



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CORRELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS DE
ESCLEROMETRIA PENDULAR E MÉTODO
CHARPY PARA AÇOS SAE 1080

MARIANE DE LACERDA CATTANEO
NATAL- RN, 2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CORRELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS DE
ESCLEROMETRIA PENDULAR E MÉTODO
CHARPY PARA AÇOS SAE 1080

MARIANE DE LACERDA CATTANEO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**, orientado pelo Prof. Dr. Fábio José Pinheiro Sousa.

NATAL - RN

2023

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Cattaneo, Mariane de Lacerda.

Correlação entre os ensaios de esclerometria pendular e método charpy para aços SAE 1080 / Mariane de Lacerda Cattaneo. - 2023.

81 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Natal, RN, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Fábio José Pinheiro Sousa.

Coorientador: Prof. Dr. Nicolau Apoena Castro.

1. Engenharia Mecânica - Dissertação. 2. Esclerometria Pendular - Dissertação. 3. Método Charpy - Dissertação. 4. Tenacidade ao Impacto - Dissertação. I. Sousa, Fábio José Pinheiro. II. Castro, Nicolau Apoena. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621(043.3)

CORRELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS DE
ESCLEROMETRIA PENDULAR E MÉTODO CHARPY
PARA AÇOS SAE 1080

MARIANE DE LACERDA CATTANEO

Dissertação **APROVADA** pelo Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Federal do Rio
Grande do Norte

Banca Examinadora da Dissertação

Prof. Dr. Fábio José Pinheiro Sousa

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Orientador

Prof. Dr. Nicolau Apoena Castro

Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Coorientador

Prof. Dr. Harim Revoredo de Macêdo

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Avaliador externo

NATAL, 24 de fevereiro de 2023.

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, Francisco e Dóris.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser concluído sem a ajuda de diversas pessoas as quais presto minha homenagem:

Agradeço aos professores Fábio José Pinheiro Sousa, meu orientador, Nicolau Apoená Castro, meu coorientador e ao professor Harim Revoredo de Macêdo. Pelas contribuições, apoio e orientações.

Agradeço à minha família pelo suporte e amor, especialmente meus pais, Francisco e Dóris, meu irmão, Eduardo e meu namorado, Luiz Felipe.

Agradeço aos laboratórios de Processamento de Materiais por Plasma (LABPLASMA), Institucional de Microscopia Eletrônica (LIME), de Ensaios Mecânicos dos Materiais (LEMAT), de Tratamentos Térmicos e Laboratório de Manufatura (LABMAN/Oficina Mecânica), assim como os colegas Alexandre, Hudson, Biatriz, Rennah, Luciano, Franklim, entre outros colegas dos referidos laboratórios.

“Nada é tão nosso quanto nossos sonhos”

Friedrich Nietzsche.

Cattaneo, M. L. **Correlação entre os ensaios de esclerometria pendular e método Charpy para aços SAE 1080**. 2023. 81 p. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2023.

Resumo

Busca-se cada vez mais praticidade e rapidez nos processos de análises de materiais. Uma das técnicas para se quantificar a tenacidade ao impacto de amostras metálicas é o método Charpy. Entretanto, a aplicação de análises esclerométricas pendulares para se obter propriedades como tenacidade ao impacto e dureza dinâmica pode ser promissora, pela rapidez e baixo custo, além disso, espera-se tratar de uma alternativa mais adequada para se medir, de forma indireta, a tenacidade ao impacto de chapas metálicas finas que são de difícil medição pelo método Charpy. Além de fatores que dificultam o uso do método Charpy como o comportamento plástico do material, as espessuras padronizadas necessárias e o tempo gasto relacionado à fabricação das amostras. Assim, busca-se a correlação entre as duas técnicas na caracterização de amostras de aço carbono SAE 1080. Este material foi escolhido devido à facilidade de se obter amostras com microestruturas homogêneas, através de tratamentos isotérmicos. Foi feita a comparação entre o método Charpy e o método do esclerômetro pendular, incluindo a preparação dos corpos de prova para ambos os equipamentos e tratamentos isotérmicos, além da análise das energias obtidas nos ensaios. Com a comparação dos resultados, foi investigada uma correlação entre ambos os ensaios. O esclerômetro pendular forneceu resultados que apresentaram uma forte correlação com os resultados dos testes Charpy realizados nas amostras, com coeficientes de correlação e de determinação de Pearson de aproximadamente 0,98 e 0,97, respectivamente. Tal correlação entre propriedades significativamente diferentes incentiva a realização de estudos mais aprofundados que possam vir não apenas a explicar os mecanismos envolvidos, mas também ampliar os conhecimentos sobre as propriedades mecânicas dos materiais.

Palavras-chave: esclerometria pendular, Charpy, tenacidade ao impacto

Cattaneo, M. L. **Correlation between pendulum scratching and Charpy method tests for SAE 1080 steels.** 2023. 81 p. Master's Dissertation in Mechanical Engineering - Federal University of Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2023.

Abstract

More and more practicality and speed in material analysis processes are sought. One of the techniques to quantify the toughness of metallic samples is the Charpy method. However, the application of pendulum scratching test analyses to obtain properties such as toughness and dynamic hardness can be promising, due to its fast execution and low cost. Furthermore, it is expected to be a more suitable alternative for indirectly measuring the impact toughness of thin metal sheets, which are difficult to measure using the Charpy method. In addition to factors that hinder the use of the Charpy method, such as the plastic behavior of the material, the required standardized thicknesses and the time spent related to the manufacture of samples. Thus, the objective is to seek for a correlation between the two techniques in the characterization of SAE 1080 carbon steel samples. This material was chosen due to the ease of obtaining samples with homogeneous microstructures, through isothermal treatments. A comparison was made between the Charpy method and the pendulum hammer method, including the preparation of the specimens for both equipment, isothermal treatments and the analysis of the energies obtained in the tests. By comparing the results, one can look for a strong correlation between both measured properties. The pendulum scratching test provided results that showed a strong correlation with the results of Charpy tests performed on the samples, with correlation coefficients and Pearson's determination of approximately 0.98 and 0.97, respectively. Such a correlation between significantly different properties encourages further studies that may not only explain the mechanisms involved, but also expand knowledge about the mechanical properties of materials.

Keywords: scratching test, Charpy, impact toughness

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Esquema de ensaio de impacto Charpy	9
Figura 2 – O efeito do tamanho dos corpos de prova na determinação da tenacidade	11
Figura 3 – Diagrama exemplo de esclerômetro pendular	13
Figura 4 – Penetradores com diferentes ângulos	14
Figura 5 – Histórico do aço	18
Figura 6 – Esquema de classificação para várias ligas ferrosas	20
Figura 7 – Fases do ferro desde a temperatura ambiente até a temperatura de fusão	23
Figura 8 – Diagrama de fases da liga Fe-C em função da temperatura e da composição	24
Figura 9 – Diagrama de Transformação-Temperatura-Tempo (TTT) de um aço eutetóide	25
Figura 10 – Grãos de Perlita e suas lamelas bem definidas para o aço 1080 eutetóide	27
Figura 11 – Bainita acicular em forma de agulhas, circundada por martensita	28
Figura 12 – Bainita produzida por tratamento isotérmico a 250°C.....	28
Figura 13 – Fotomicrografia mostrando a microestrutura martensita em aço com 0,2% de carbono resfriado continuamente	29
Figura 14 – Fração reagida isotermicamente em função do logaritmo do tempo para a transformação de austenita em perlita	32
Figura 15 – Micromecanismos	35
Figura 16 – Esclerômetro pendular	37

Figura 17 – Equipamento de Charpy.....	38
Figura 18 – Barra chata maciça de aço carbono 1080	39
Figura 19 – Cut Off CFIII.....	40
Figura 20 – Barra chata de aço 1080 cortada dentro da Cut Off CFIII.....	40
Figura 21 – Fluxograma de preparação das amostras	41
Figura 22 – Embutidora EFD 30.....	42
Figura 23 – Lixadeira e Politriz.....	42
Figura 24 – Desenho do corpo de prova segundo a norma ASTM A370 sem o entalhe	43
Figura 25 – Forno para tratamentos térmicos	44
Figura 26 – Forno para tratamentos isotérmicos com banho de sal	44
Figura 27 – Diagrama TTT do aço AISI 1080	45
Figura 28 – Amostra antes e após o riscamento pelo esclerômetro pendular	47
Figura 29 – Estereoscópio para visualização dos riscos	47
Figura 30 – Riscos nos corpos de prova através do estereoscópio.....	47
Figura 31 – Amostras para o ensaio Charpy	48
Figura 32 – Amostra riscadas pelo esclerômetro pendular.....	49
Figura 33 – Amostras sem tratamento térmico rompidas após o ensaio Charpy	49
Figura 34 – Amostras com tratamento térmico 01 rompidas após o ensaio Charpy .	50
Figura 35 – Amostras com tratamento térmico 02 rompidas após o ensaio Charpy .	50
Figura 36 – Amostras com tratamento térmico 03 rompidas após o ensaio Charpy .	50
Figura 37 – Energias dos ensaios de Charpy.....	53

Figura 38 – Energias dos ensaios de esclerometria pendular54

Figura 39 – Linha de tendência para médias das energias dos ensaios55

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Especificação da composição química dos principais aços carbono	21
Tabela 2 – Aplicações típicas e faixas de propriedades mecânicas para aços-carbono comuns temperados em óleo e revenidos	30
Tabela 3 – Especificação da composição química do aço carbono AISI 1080	39
Tabela 4 – Energias do ensaio de Charpy em kpm	51
Tabela 5 – Resultados obtidos nos ensaios de esclerometria pendular	52
Tabela 6 – Variância e desvio padrão das amostras da esclerometria pendular	53
Tabela 7 – Médias, variâncias e desvios padrão de ambos os ensaios	54
Tabela 8 – Coeficientes de Pearson	55

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Notas Técnicas
a.C.	Antes de Cristo
AISI	American Iron and Steel Institute
CCC	Cúbica de corpo centrado
CCT	Diagrama Continuous Cooling Transformation/ Transformação em Resfriamento Contínuo
CFC	Cúbica de face centrada
d.C.	Depois de Cristo
HFC	Hexagonal compacta
MLEF	Mecânica linear elástica de fratura
NL/min	Litro de gás normal por minuto
O.E.C.D.	Organization for Economic Cooperation and Development
SAE	Society of Automotive Engineers
TCC	Tetragonal de corpo centrado
TTT	Diagrama de transformação tempo temperatura
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Lista de símbolos

φ_1	Ângulo inicial
φ_2	Ângulo final
C	Comprimento de risco
E_r	Energia de deformação/riscamento (J)
e_r	Energia de deformação/riscamento específica (J/mm ³)
$\varepsilon_{plástica}$	Deformação plástica
g	Aceleração da gravidade (m/s ²)
h	Altura do centroide (m)
kpm	Kilopond-meter
l_f	Comprimento final
l_0	Comprimento inicial
m	Massa (kg)
ms	Milissegundo
P	Profundidade de risco
r	Coefficiente de correlação
r^2	Coefficiente de determinação
s	Desvio padrão
V_d	Volume removido durante e após o risco (mm ³)
\bar{x}	Média

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	3
1.2	Objetivos	4
2	Revisão Bibliográfica	5
2.1	Tenacidade	5
2.2	Mecânica da fratura	6
2.2.1	Transição dúctil-frágil.....	7
2.2.2	Ensaio de fratura por impacto	8
2.2.3	Tenacidade ao impacto (Charpy).....	8
2.3	Dureza	11
2.4	Esclerometria pendular	12
2.5	Semelhanças e diferenças entre os ensaios de esclerometria pendular e Charpy.....	15
2.6	Histórico dos aços.....	16
2.7	Aço carbono.....	18
2.7.1	Classificação dos aços	20
2.7.2	Aço carbono SAE 1080	21
2.7.3	Aspectos microestruturais (microestrutura).....	22
2.7.4	Propriedades mecânicas	29
2.7.5	Transformações isotérmicas.....	32
2.8	Tribologia	33
2.8.1	Desgaste	33
2.9	Coeficientes de Pearson	35
3	Materiais e Métodos	37
3.1	Materiais	38

3.2	Preparação dos corpos de prova	39
3.2.1	Preparação dos corpos de prova do esclerômetro pendular	41
3.2.2	Preparação dos corpos de prova Charpy	42
3.3	Tratamentos térmicos	43
3.3.1	Tratamentos térmicos escolhidos	43
3.3.2	Tratamento térmico 01 – Isotérmico a 650°C.....	44
3.3.3	Tratamento térmico 02 – Isotérmico a 300 °C.....	45
3.3.4	Tratamento térmico 03 – Têmpera em água	45
3.4	Ensaio Esclerométrico	45
3.5	Ensaio Charpy	48
4	Resultados	49
5	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	56
6	Referências	58

1 Introdução

A quantidade de ensaios de materiais necessários e a qualidade deles são importantes para a otimização da caracterização de materiais. Por isso, busca-se cada vez mais praticidade e rapidez nos processos de análises de materiais. Para o caso de quantificar a tenacidade ao impacto de amostras metálicas é comumente utilizado o método Charpy. Entretanto, a aplicação de análises esclerométricas pendulares para se obter propriedades como tenacidade ao impacto e dureza dinâmica pode ser promissora, tanto pelo tempo quanto pela economia, pois segundo Tschiptschin, Garzón e Lopez (2007) a esclerometria pendular instrumentada é uma técnica barata e rápida para avaliar a dureza dinâmica e a resistência a abrasão de diferentes materiais.

O desgaste abrasivo pode ser considerado um processo de riscamento múltiplo. Conseqüentemente, a resistência ao desgaste está intimamente relacionada à resistência ao risco. A determinação da resistência ao risco contribui então para a caracterização do produto (GONÇALVES et al., 1999).

A técnica de esclerometria pendular se baseia no princípio de riscamento de penetradores com geometria conhecida sobre a superfície de uma amostra (MORAES, 2005). Assim, o ensaio esclerométrico consiste em simular e analisar o processo abrasivo encontrado em situações reais, através de testes de laboratório (ARAÚJO NETO et al., 2016). Os dados que podem ser obtidos fornecem várias propriedades de superfícies, como a dureza ao risco, a tenacidade à fratura, a resistência à abrasão e a identificação dos vários modos de deformação específicos do material examinado (BRISCOE; PELILLO; SINHA, 1996).

Os estudos da mecânica da fratura descrevem o comportamento de estruturas ou componentes com descontinuidades, que podem ser trincas ou riscos na superfície. Inclusive, o termo “fratura mecânica” refere-se a uma especialização na mecânica em que a presença de uma fissura é assumida e busca-se encontrar relações entre o comprimento da fissura, a tensão de propagação em alta velocidade e as propriedades do material que causam a falha estrutural (ROYLANCE, 2001), como é visto no caso dos ensaios de tenacidade ao impacto pelo método Charpy.

O ensaio de impacto é amplamente aplicado na análise do comportamento à fratura de materiais devido à sua relativa facilidade de execução. Usualmente, o resultado é representado pela medida da energia absorvida do material até a fratura, que utiliza corpos de prova padronizados com entalhe de dimensões definidas. Apesar de não fornecer informações quantitativas a respeito do comportamento de estruturas nas condições de serviço, o resultado do ensaio de impacto pode ser utilizado para o controle de qualidade de processos e critério de aceitação da matéria-prima para determinadas aplicações. Trata-se, assim, de um ensaio qualitativo para avaliação da tenacidade ao impacto do material (FABRICIO, 2015).

A determinação com boa precisão das propriedades mecânicas dos materiais é um fator crucial para a aplicação dos mesmos em engenharia, desde o projeto até a produção e a utilização dos materiais, para a prevenção de falhas e melhor seleção dos materiais para cada aplicação (FABRICIO, 2015). A melhora nas propriedades mecânicas dos aços está ligada diretamente ao desenvolvimento industrial do país, pois essa necessidade surge na produção industrial, que busca meios de melhorar e desenvolver materiais de alto desempenho para aplicações que requerem alto coeficiente de segurança (TEIXEIRA, 2017).

Os aços laminados a frio com chapas finas menores que 1 mm podem ter como alternativa os ensaios de esclerometria pendular para a obtenção da tenacidade ao impacto, de forma que pode ser usado em situações de simulação de impacto de veículo automotivo de difícil previsão. Assim, é extremamente importante dados confiáveis de tenacidade ao impacto para modelagens computacionais, o que evita o ensaio prático como o crash-test, que tem alto custo, e dessa forma é capaz de economizar. A contenção de gastos é de grande interesse para fabricantes de aço e montadoras de veículos que buscam melhorias nos materiais, então a correlação existente entre esclerometria pendular e teste Charpy pode contribuir muito para estimar valores de tenacidade ao impacto para aços laminados a frio.

De forma que o aço é uma parte intrínseca do setor automobilístico, no qual o aço laminado a frio tem um desempenho melhor do que aço laminado a quente. Isso ocorre porque o aço laminado a frio é relativamente mais acabado, resistente ao desgaste e à prova de choque. Por isso, nesta indústria, é predominantemente

utilizado na fabricação de carrocerias e elementos importantes de automóveis e veículos. Além disso, pode ser usado para fabricar motores elétricos, peças de assentos automotivos, prensas, tanques de combustível, etc (WZPPGI, 2022). E, por exemplo, para a Volkswagen, cada crash-test custa de R\$ 300 mil a R\$ 400 mil para ser feito em um carro de linha, valor que pode ultrapassar R\$ 1 milhão quando se fala em protótipos. Como são feitas simulações de colisão com cerca de 350 carros por ano, o gasto anual médio da montadora fica em R\$ 140 milhões (SALWIPA, 2022).

Nesse sentido, os ensaios de esclerometria pendular podem ser uma excelente alternativa na avaliação da tenacidade ao impacto, com boas vantagens em relação aos métodos tradicionais, mais aplicados atualmente.

1.1 Motivação

A avaliação da tenacidade ao impacto pelo método Charpy para os aços em questão é complexa devido aos seguintes fatores: comportamento plástico do material, a difícil caracterização microestrutural, as medidas padrões necessárias para o corpo de prova e o tempo gasto relacionado à fabricação das amostras. Esses fatores dificultam o uso desse parâmetro para o controle de qualidade e para o desenvolvimento de aços.

Além disso, é importante quantificar a tenacidade ao impacto para materiais como chapas finas metálicas laminadas a frio de difícil medição pelo método Charpy, de modo que a avaliação da propriedade possa ser aplicada através da esclerometria pendular sem complexidade.

Assim, a motivação deste trabalho é desenvolver uma investigação experimental sobre a viabilidade técnica do uso de esclerometria pendular, com vistas apoiar estudos que possibilitem uma alternativa para a caracterização da tenacidade ao impacto de materiais metálicos. Busca-se, portanto, a comparação entre o método Charpy e o método da esclerometria pendular, pela caracterização de amostras de aço SAE 1080 em ambos os equipamentos e com a análise das energias do esclerômetro pendular e do ensaio de impacto Charpy.

1.2 Objetivos

Assim, este trabalho tem como objetivo principal avaliar uma possível correlação entre os ensaios de tenacidade ao impacto pelo método Charpy e a esclerometria pendular aplicados a aços AISI 1080 em diferentes condições de tratamento térmico.

Diante disso, pretende-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Comparar os resultados experimentais de esclerometria pendular e ensaios Charpy para amostras pareadas de aço AISI 1080 eutetóide;
- Verificar a existência de uma correlação estatística entre os resultados de ambas as técnicas de caracterização.

Ademais, a obtenção de uma boa correlação entre tais comportamentos mecânicos tão distintos acabam por incentivar novas pesquisas visando a aplicação de ensaios de esclerometria pendular para desenvolvimento e controle de qualidade de aços. Neste sentido características vantajosas podem ser citadas a facilidade e rapidez de execução, a possibilidade de utilização de corpos de prova de pequeno tamanho e o baixo custo operacional.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Tenacidade

A tenacidade é um termo mecânico que é usado em vários contextos; livremente falando, ela representa uma medida da habilidade de um material em absorver energia até a sua fratura. A geometria do corpo de prova, bem como a maneira como a carga é aplicada, são fatores importantes nas determinações de tenacidade. Para condições de carregamento dinâmicas (elevada taxa de deformação), e quando um entalhe (ou ponto de concentração de tensão) está presente, a tenacidade ao entalhe é averiguada pelo uso de um ensaio de impacto. Além disso, a tenacidade à fratura é uma propriedade indicativa da resistência do material à fratura quando este possui uma trinca (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

O comportamento dúctil-frágil dos materiais pode ser mais amplamente caracterizado por ensaios de impacto. A carga nesses ensaios é aplicada na forma de esforços por choque (dinâmicos), e o impacto é obtido por meio da queda de um martelo ou pêndulo, de uma altura determinada, sobre a peça a examinar. As massas utilizadas nos ensaios são intercambiáveis, possuem diferentes pesos e podem cair de alturas variáveis. Os ensaios mais conhecidos são denominados Charpy e Izod, dependendo da configuração geométrica do entalhe e do modo de fixação do corpo de prova na máquina (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

A grande deformação plástica que ocorre até a fratura dúctil é responsável pela absorção de uma grande quantidade de energia necessária para movimentar e multiplicar as discordâncias no material (DIETER, 1981). Três fatores principais contribuem para o surgimento da fratura frágil em materiais que são normalmente dúcteis à temperatura ambiente: (1) existência de um estado triaxial de tensões, (2) baixas temperaturas e (3) taxa ou velocidade de deformação elevada. Esses três fatores não precisam necessariamente atuar ao mesmo tempo para produzir a fratura frágil. Estados triaxiais de tensão que ocorrem em entalhes, juntamente com baixas temperaturas, foram responsáveis por muitas situações de fratura frágil em serviço. Entretanto, como esses efeitos são acentuados sob altas velocidades de aplicação de

carga, diversos tipos de ensaios de impacto passaram a ser usados na determinação da suscetibilidade de materiais à fratura frágil (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

O ensaio de impacto é um ensaio dinâmico empregado para a análise da fratura frágil de materiais. O resultado é simplesmente representado por uma medida de energia absorvida pelo corpo de prova, não fornecendo indicações seguras sobre o comportamento de toda uma estrutura em condições de serviço. Entretanto, permite a observação de diferenças de comportamento entre materiais que não são observadas em um ensaio de tração (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Os requisitos essenciais para a realização do ensaio são: corpo de prova padronizado, suporte rígido no qual o corpo de prova é apoiado ou engastado, pêndulo com massa conhecida solto de uma altura suficiente para fraturar totalmente o material e um dispositivo de escala para medir as alturas antes e depois do impacto do pêndulo (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

A fratura consiste na separação ou fragmentação de um corpo sólido em duas ou mais partes sob a ação de tensões (SOUZA, 1982). Definindo a tenacidade à fratura como a resistência contra a propagação de uma trinca, ela dá uma medida quantitativa da tenacidade à fratura. A tenacidade à fratura é a força necessária para estender uma trinca através de um membro estrutural. Em circunstâncias especiais, a força de extensão da trinca torna-se independente das dimensões da amostra e esse parâmetro, então, pode ser usado para uma classificação de matérias por ordem de tenacidade à fratura. Para isto é usada a mecânica linear elástica de fratura (MLEF) que se admite que sempre haverá defeitos em um elemento estrutural e busca-se a resposta à pergunta: dada uma certa tensão, qual o maior tamanho de trinca que pode ser tolerado sem ocorrer a falha do membro? (MEYERS, CHAWLA, 1982).

2.2 Mecânica da fratura

O termo “mecânica da fratura” se refere ao estudo dentro da mecânica dos sólidos, onde é assumida a presença de uma trinca, ou uma descontinuidade com o objetivo de estudá-la com relação à sua resistência, comprimento, tensão, propagação, dentre outras (ROYLANCE, 2001). Os primeiros estudos da mecânica da fratura se deram por volta do século XIX, conduzidos por Inglis, que por sua vez o

seu trabalho serviu de modelo para tantos outros posteriores (METLER, 2016). Na grande maioria das vezes, os carregamentos em que os materiais são submetidos são alternados, complexos e de grande intensidade.

A Mecânica da fratura foi então dividida em duas grandes áreas, que são: a mecânica da fratura Linear-elástica e a mecânica da fratura Elasto-Plástica. A mecânica da fratura linear-elástica ocorre quando a trinca ocorre ainda no regime elástico (linear), com baixa deformação plástica nas bordas da trinca. Isso normalmente ocorre com materiais de altíssima resistência ou de grandes espessuras. Já a mecânica da fratura elasto-plástica por sua vez ocorre quando a trinca aparece em regime plástico ou em elevada deformação plástica (FABRICIO, 2015).

2.2.1 Transição dúctil-frágil

A fratura frágil está associada a pequena quantidade de energia absorvida durante o processo de fratura, enquanto que a fratura dúctil está associada às elevadas quantidades de energia durante o processo (METLER, 2016). A temperatura de transição dúctil-frágil corresponde a temperatura em que a fratura muda de cisalhamento para clivagem, como por exemplo, com a simples redução da temperatura, que resulta na falha do material logo após o limite de escoamento (METLER, 2016). O fenômeno pode ser ativado pela temperatura e também pela aplicação de cargas (BOEIRA; BECK, 2007). As condições que reduzem a capacidade do material de se deformar plasticamente são as baixíssimas temperaturas, elevadas taxas de deformação ou carregamento e um estado de tensão triaxial (CALLISTER, 2002). O limite de escoamento fornece uma estimativa da máxima tensão suportada pelo material sem que este apresente deformação plástica apreciável (SCHON, 2009).

Em aços ferríticos de baixo e médio carbono a temperatura de transição dúctil-frágil aumenta com o aumento do tamanho de grão da ferrita. Esse efeito fragilizante associado a granulometria grosseira pode ser atribuído à concentração de tensões nos finais das bandas de deslizamento, nos contornos de grão. Quanto maior for o tamanho de grão, maiores serão as bandas de deslizamento e maiores as concentrações de tensões. Essas concentrações de tensões elevadas induzem uma

nucleação de micro trincas nos contornos de grão causando a fratura catastrófica prematura do material, por clivagem (DIETER, 1981).

2.2.2 Ensaios de fratura por impacto

Como os resultados dos ensaios de tração e compressão existentes antes da mecânica da fratura não eram capazes de determinar as características da fratura dos materiais, iniciou-se a prática dos ensaios de fratura por impacto. Por exemplo, não era possível saber o porquê que materiais dúcteis sob certas condições fraturavam com pouca deformação plástica abruptamente (CALLISTER, 2002).

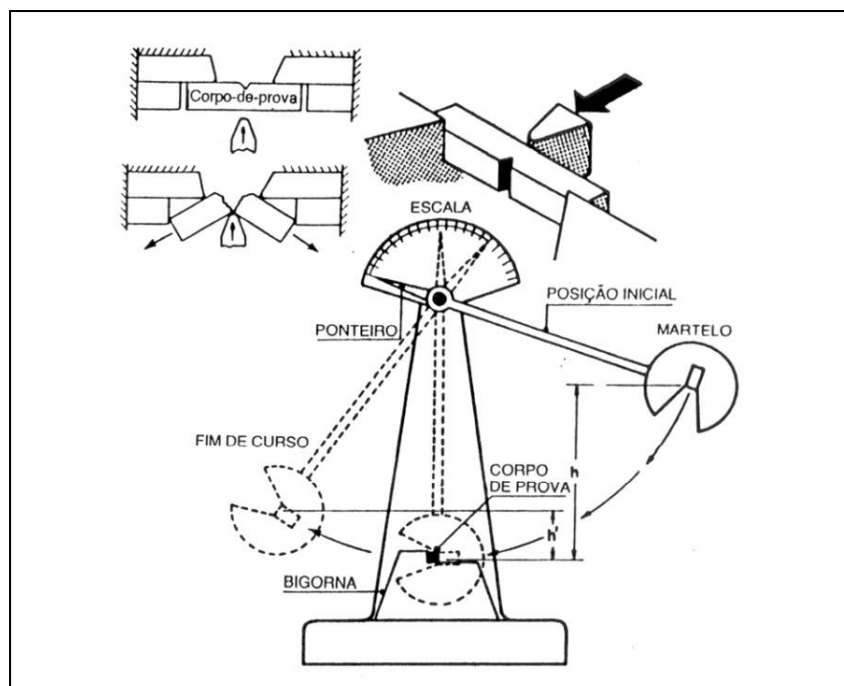
Entretanto, os ensaios de impacto já existiam desde antes da 2ª guerra mundial e não era ainda considerado para fins de especificação, sem identificar a fase dúctil-frágil dos aços. Dada a grande utilização de navegação e conseqüentemente alto número de falhas em navios durante as guerras, a utilização destes ensaios tornou-se necessidade (BAPTISTA, 2016). Dentre os vários ensaios dinâmicos relacionados a fratura frágil, os ensaios de impacto com pêndulo são os mais utilizados. Existem sobretudo dois tipos principais que são as técnicas Charpy e Izod.

2.2.3 Tenacidade ao impacto (Charpy)

G. Charpy desenvolveu o que agora é conhecido como Charpy V-Notch Impact Test, ou simplesmente o teste Charpy, por volta de 1901. O entalhe, a alta taxa de deformação de teste e as baixas temperaturas de teste possíveis suprimem a plasticidade e favorecem a fratura de baixa energia (quebradiça). Este teste foi uma contribuição muito importante para a triagem adequada de materiais, mas não poderia ser usado para prever analiticamente as condições (ou seja, cargas, comprimentos de rachadura, etc.) sob as quais ocorre a fratura. No entanto, foi muito importante para solucionar o problema de controle de fratura e é amplamente utilizada até hoje, especialmente na comparação e seleção de materiais (ANTOLOVICH; SAXENA; GERBERICH, 2018). O ensaio de impacto foi o primeiro e até hoje o mais empregado para estudo de fratura frágil nos metais. É um ensaio dinâmico usado principalmente para avaliação de materiais que tem sua aplicação em baixas temperaturas, como teste de aceitação do material (SOUZA, 1982).

Uma máquina de impacto Charpy (Fig. 1) é aquela em que uma amostra entalhada é quebrada por um único golpe de um pêndulo oscilando livremente. O pêndulo é liberado de uma altura fixa. Visto que a altura a qual o pêndulo é elevado antes de seu balanço e a massa do pêndulo são conhecidas, a energia do golpe é predeterminada. Os valores de teste medidos podem ser a energia absorvida na quebra da amostra, a porcentagem de fratura por cisalhamento, a expansão lateral oposta ao entalhe ou uma combinação das mesmas (NORMA ASTM A370/ ASME A-730, 2004).

Figura 1 – Esquema de ensaio de impacto Charpy



Fonte: (EMYGDIO, 2012)

A energia de impacto Charpy é composta pela energia de iniciação da fratura e energia de propagação. O campo de deformação plástica é fortemente formado logo após o impacto do pêndulo, e a fratura começa na ponta do entalhe ao longo da direção altamente ativada pela tensão de cisalhamento resolvida crítica. Na região impactada pelo pêndulo, a deformação compressiva é rapidamente acumulada, juntamente com algum encruamento, enquanto o estado de tensão compressiva dinâmica está funcionando ativamente. No momento do impacto do pêndulo, o campo de deformação plástica atua fortemente na região da ponta do entalhe, e a fratura se inicia ao longo da direção do entalhe, na qual a tensão de cisalhamento resolvida

crítica aplicada pela tensão de tração é altamente ativada. Uma vez que o estado de tensão compressiva dinâmica está trabalhando fortemente na região impactada pelo pêndulo dentro de 5 a 10 ms do momento de impacto, uma deformação compressiva de 5 a 10% é acumulada junto com algum encruamento. Essas deformações compressivas e encruamento influenciam diretamente o processo de propagação da fratura do corpo de prova de impacto Charpy, conseqüentemente a tenacidade Charpy resultante. A fim de interpretar razoavelmente a energia de propagação, portanto, são essencialmente necessárias análises microestruturais de espécimes compactados dinamicamente (KIM, H *et al.*, 2015).

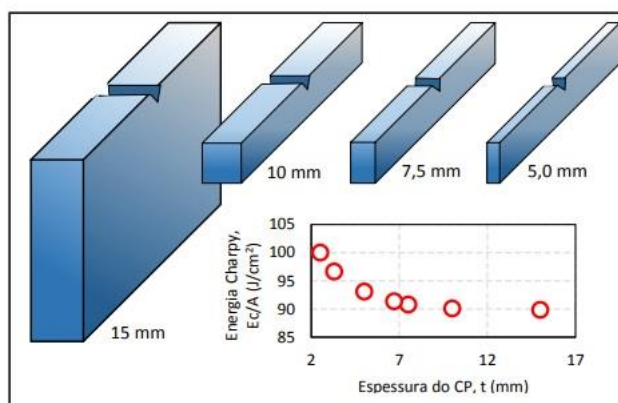
O Charpy é uma técnica muito utilizada devido ao seu nível de confiança e precisão, porém, apesar de não ser possível a identificação de comportamento das estruturas, mesmo o ensaio trazendo respostas de tenacidade ao impacto do material analisado, ainda assim, o resultado obtido pode ser utilizado como controle de produção e fabricação (FABRICIO, 2015). A norma ASTM A370 rege os procedimentos concernentes ao ensaio de impacto pelo método Charpy, estabelecendo ainda as condições do corpo de prova adotado, os equipamentos utilizados, metodologia de teste, entre outros.

O entalhe no corpo de prova gera um estado triaxial de tensões, por se tratar de um concentrador de tensões. Sem o entalhe, o corpo de prova poderia apenas deformar plasticamente e não quebrar, o que invalidaria o ensaio (GOUVEIA, 2013). Por isso, é importante que no preparo dos corpos de prova sejam seguidas rigorosamente as características especificadas para o entalhe, pois resultados diferentes podem ser obtidos com pequenas variações dimensionais (EMYGDIO, 2012). Garcia *et al.* (2012) comentam que apesar da praticidade e das vantagens do ensaio de impacto, é preciso atentar à padronização do corpo de prova, que é essencial para garantir a reprodutibilidade do ensaio. Fazendo isso, quando se ensaiam diversos materiais sob as mesmas condições do ponto de vista da execução do ensaio, será possível então comparar as características desses materiais com a certeza de que não há outras interferências nos resultados obtidos. Askeland e Phulé (2006) também comentam sobre a influência do entalhe na tenacidade do material, e acrescentam que além da presença do entalhe, é importante também atentar à

qualidade da usinagem deste entalhe, uma vez que esta operação, se realizada grosseiramente, pode resultar numa condição ainda mais crítica quanto à concentração de tensões, o que pode ser extremamente crítico para materiais que apresentem grande sensibilidade ao entalhe (GOUVEIA, 2013). Sendo assim, algumas vezes, o entalhe significa mais uma variável de confusão e uma amostra sem entalhe pode eliminar possíveis erros relacionados à qualidade do entalhe.

Sabe-se que em uma superfície, ou em chapas muito finas, não atuam tensões normais, condição que gera estado de tensões plano. À medida que a espessura é aumentada, induz-se estados complexos de tensões, em deformação plana, diminuindo a tenacidade aparente, conforme ilustrado pelos dados da figura 2, caso a espessura dos corpos de prova não influenciasse nos resultados, o valor da energia para fratura (tenacidade) seria constante com a área, o que não ocorre. Portanto, a espessura torna-se relevante para a determinação da tenacidade dos materiais com certa plasticidade, dando-se preferência nesses ao uso de corpos de prova mais espessos, nos quais os resultados de tenacidade são mais conservadores (menores) (MORAIS et al., 2020).

Figura 2 – O efeito do tamanho dos corpos de prova na determinação da tenacidade



Fonte: MORAIS et al., 2020.

2.3 Dureza

Dureza é uma propriedade mecânica definida como uma medida da resistência de um material a uma deformação plástica localizada. Os métodos desenvolvidos (ensaios) para aferir quantitativamente a dureza empregam o uso de

um penetrador (identador) que é forçado sobre a superfície do material a ser testado, sendo que parâmetros como o formato do penetrador, carga aplicada, taxa de aplicação e tempo de penetração são controlados. Então, o valor de dureza do material é determinado pela relação entre a carga aplicada e a profundidade, ou o tamanho, da impressão deixada pelo penetrador, quanto mais profundo, ou maior, for a impressão resultante, menor será o índice de dureza do material (OLIVEIRA, 2019)

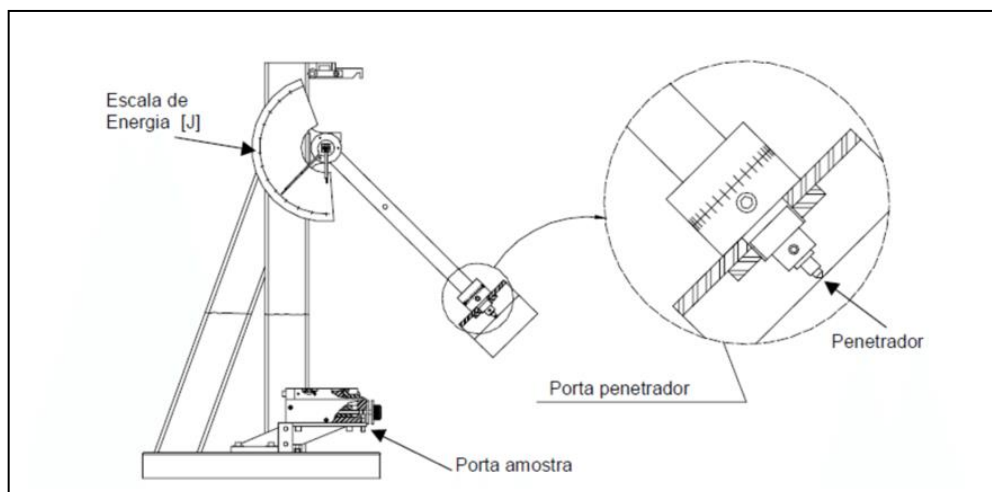
Para materiais metálicos, a dureza está intrinsecamente ligada à sua microestrutura cristalina, assim, qualquer processamento que altere o estado da microestrutura irá refletir sobre a dureza. Logo, conformação mecânica, tratamentos térmicos e termoquímicos são comumente empregados para modificar a dureza de peças metálicas. Os principais ensaios de dureza empregados tanto na indústria quanto no meio acadêmico são: Rockwell, Brinell, Knoop e Vickers (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

Importante observar que o índice de dureza é uma medida que melhor descreve a resistência da superfície de uma peça do que de seu interior. Portanto, as condições de contato entre uma peça e outros componentes indicam qual o valor ideal de dureza almejado, que será maior de acordo com o aumento do desgaste superficial previsto (OLIVEIRA, 2019).

2.4 Esclerometria pendular

A esclerometria pendular é uma técnica tribológica que consiste em promover um movimento de pêndulo usando identadores com diferentes ângulos de ponta, que atinge as amostras com um único risco abrasivo em forma de meia-lua (Fig. 3). A energia dissipada gerada pelo risco é determinada pela variação da energia potencial do pêndulo (ARAÚJO NETO et al., 2016). A esclerometria é uma técnica que fornece parâmetros capazes de caracterizar a energia específica de risco, a dureza ao risco, a resistência a abrasão e a usinabilidade dos materiais (BEZERRA, 2022)

Figura 3 – Diagrama exemplo de esclerômetro pendular



Fonte: (FINZI et al., 2016)

O ensaio esclerométrico consiste em simular e analisar o processo abrasivo encontrado em situações reais através de ensaios de laboratório. O contato entre o agente abrasivo e a superfície é determinado pelo conjunto de parâmetros físico-químicos e mecânicos atuantes no tribosistema (ARAÚJO NETO, et al., 2016). A energia específica de riscamento, dada pela relação entre a energia necessária para gerar um risco e o volume ou a massa removida, é um parâmetro de rápida obtenção, e representativo da usinabilidade e da resistência à abrasão dos materiais para várias situações práticas (FONSECA; LUCENA JUNIOR; LIMA, 2016).

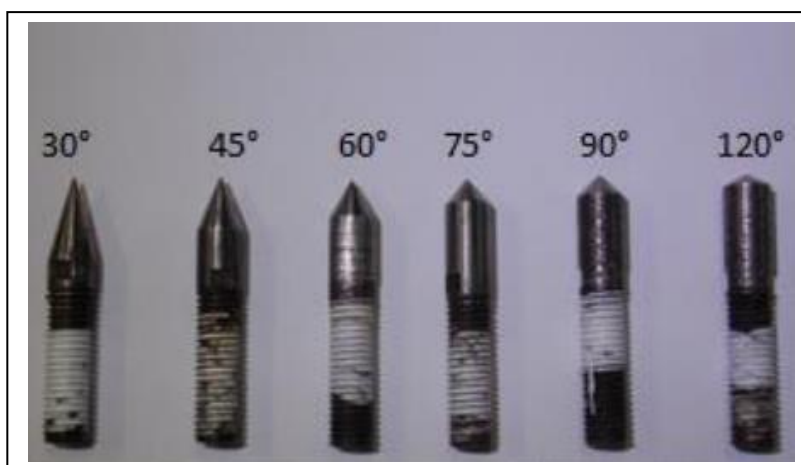
A energia dissipada gerada pelo risco é determinada pela variação da energia potencial do pêndulo. Este tipo de teste é utilizado para determinar a energia de deformação em condições dinâmicas de abrasão e onde a remoção do material ocorre em condições de elevada taxa de deformação (ARAÚJO NETO, et al., 2016). Além disso, a esclerometria pendular permite, através de interrupções instantâneas, a análise de diversos mecanismos de formação e remoção de cavacos no material durante a abrasão. Os Ensaio Não Destrutivos (END) são considerados importantes ferramentas para a avaliação estrutural e de qualidade de elementos construtivos. (OLIVERIA, 2019).

Dentre os diversos métodos esclerométricos existentes, destacam-se os seguintes tipos: retilíneo, rotativo e pendular. O primeiro tipo caracteriza-se, fundamentalmente, pelo movimento retilíneo da amostra em relação à partícula dura. Em geral, este movimento ocorre com o uso baixas velocidades e permite, através do

dispositivo porta-penetrador, a variação dos ângulos laterais e de ataque da partícula. O segundo tipo consiste na fixação do penetrador em um volante que, sob rotação, produz sucessivos riscos na amostra. Este tipo de esclerômetro é, normalmente, utilizado em estudos de usinagem por abrasão. Finalmente, o terceiro tipo, objeto deste estudo, utiliza um penetrador fixado à extremidade de um pêndulo que percute sobre uma amostra plana. Essa técnica é particularmente adaptada às situações dinâmicas, onde a remoção de matéria ocorre com elevadas deformações e sob altas taxas de deformação plástica (FRANCO, 1989).

É de altíssima importância a configuração do penetrador e do ângulo de ataque. O penetrador representa a partícula abrasiva, o que facilita as interpretações do mecanismo e fatores de abrasão. O ângulo de ataque é formado entre a superfície frontal do penetrador e a superfície da amostra (MORAES, 2005). Para penetradores cônicos e piramidais, a mudança na profundidade do risco não altera, em princípio, a deformação imposta, o defeito da ponta influencia à parte. No entanto, para um penetrador esférico, uma mudança na carga normal também trará uma mudança na deformação efetiva, já que o indentador esférico tem uma relação não linear entre a profundidade de penetração e o volume removido. (BRISCOE; SINHA, 2003). Abaixo, exemplos de penetradores de diferentes angulações (Fig. 4).

Figura 4 – Penetradores com diferentes ângulos



Fonte: (FONSECA; LUCENA JUNIOR; LIMA, 2016).

A dureza ao risco representa a resistência média a penetração oferecida pelo material. Também computa efeitos dinâmicos e isso permite avaliar o comportamento do material quando submetido a diversas condições de riscamento, tais como

variações de velocidade de avanço, da carga normal aplicada e do uso de diferentes geometrias e ângulos de arraste do indentador. A ocorrência de falhas por desgaste, bem como o amplo emprego de processos industriais como usinagem desperta interesse prático e econômico sobre o estudo de fenômenos decorrentes do atrito, já que, propriedades tribológicas, como resistência ao desgaste, são de difícil quantificação. Para tanto, é necessário o uso de modelos e técnicas experimentais idealizadas para cada fim específico. A técnica da esclerometria é uma delas. Os resultados são obtidos com base na morfologia do risco e nas componentes normal e tangencial da força aplicada para promover o riscamento (SOUSA et al., 2005).

O esclerômetro pendular possui variação da profundidade do risco, possibilidade de mais de um ensaio por amostra através de deslocamento lateral da amostra e possibilidade de execução de interrupções instantâneas do processo, com vistas ao estudo dos mecanismos de perda de matéria (FRANCO, 1989). Um esclerômetro é capaz de determinar as forças atuantes em diferentes fases do mesmo material, avaliar a eficiência de um lubrificante, ou a aderência entre as camadas finais, analisar o efeito da microestrutura no ciclo de vida de um componente e obter dureza ao risco, coeficiente de atrito e energia específica dos materiais (SOUSA et al., 2006).

2.5 Semelhanças e diferenças entre os ensaios de esclerometria pendular e Charpy

O princípio de funcionamento da esclerometria pendular consiste na liberação do pêndulo, onde o penetrador é fixado, para gerar na amostra fixa na parte inferior da trajetória um risco cuja seção transversal depende da forma do penetrador utilizado e da profundidade de riscamento ajustada. A energia dissipada para produzir o risco é determinada pela variação da energia potencial do pêndulo, de maneira similar ao ensaio Charpy (CHIAVERINI, 2008). Comparando as duas técnicas, logo é vista a semelhança em relação ao pêndulo, em que é usada a energia potencial para realizar os testes, tanto que, na sua maioria, os esclerômetros se constituem em modificações de instrumentos do tipo Charpy (FRANCO, 1989).

Já as diferenças se dão principalmente no grau de destruição da amostra, o esclerometro pendular é uma técnica não destrutiva enquanto o método Charpy é destrutivo. O esclerômetro, além de grande funcionalidade, apresenta uma pequena energia de percussão, de forma a ser mais representativo das situações reais. Dentre as suas principais características, destacam-se a possibilidade de avaliar as energias específicas associadas a micro riscos. Já o ensaio de Charpy apresenta uma alta energia associada e maiores dificuldades de operação. Além da região de dissipação da energia, em que no esclerômetro ocorre na superfície da amostra e no ensaio Charpy no material como um todo (FRANCO, 1989).

2.6 Histórico dos aços

Na última fase da pré-história, conhecida como idade dos metais, por volta de 4000 a.C., o Bronze começou a ser trabalhado e produzido. Evidências arqueológicas demonstram que a descoberta veio como uma consequência do manuseio do cobre em 5000 a.C. (COPPERMETAL, 2021). Os primeiros artefatos de ferro foram encontrados no Egito na grande pirâmide de Gizé por volta de 2900 a.C. e na tumba de Abidos aproximadamente em 2600 a.C. Ainda próximo a isso, fogueiras foram construídas a partir de rochas de minério de ferro que com o contato de partículas quente de carbono obteve como resultado uma massa escura, que permitiu a deformação plástica com o que viria a ser conhecido como forjamento (NOLDIN JÚNIOR, 2002). Foi em 1400 a.C., através das necessidades militares, que começou a ser usado em ferramentas e armas, chapas de ferro e aço, e foi atestado uma maior dificuldade na manufatura e maior dureza com relação ao bronze anteriormente usado (COSIAÇO, 2016).

No século VI a.C., Nabucodonosor, rei da Babilônica, construiu os primeiros portões com pilares e vigas cobertas de cobre e reforçadas com estruturas de ferro. Por volta do século V a.C. os chineses, que já haviam inventado a roda, começaram a fabricar o ferro carburado, que viria a ser chamado de ferro-gusa. Logo o império se tornaria um dos maiores dominadores graças ao conhecimento das técnicas do ferro (ARAUJO, 2005).

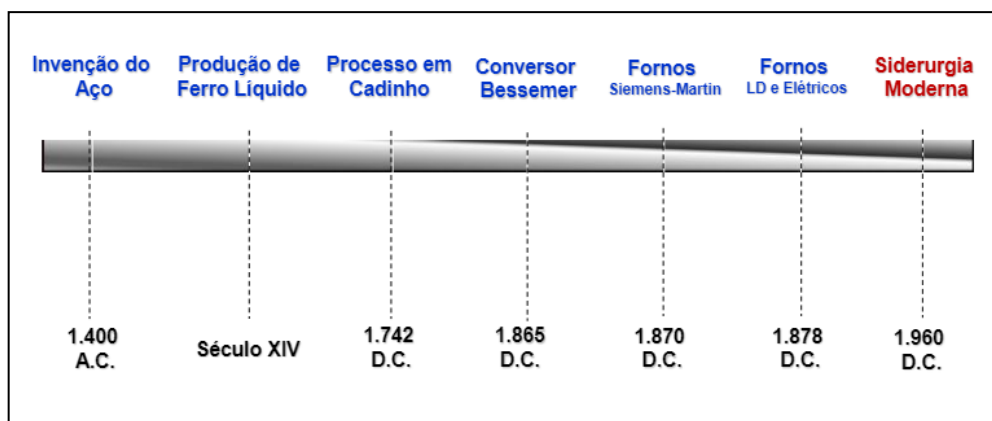
Aos poucos as técnicas de obtenção dos ferros foram ganhando outros ares. No final do século III a.C., cresceu muito o número de fornos, como o forno de redução africano e o forno de exaustão natural dos gregos. Estes fornos foram utilizados até o século VIII na idade média, quando surgiu a pequena forja, conhecida como forja catalã (ARAUJO, 2005). Desenvolvida na Península Ibérica, consistia basicamente numa lareira industrial. Obtinha-se uma massa pastosa com um tipo grosseiro de ferro fundido pela redução direta do minério. Solidificado, tornava-se frágil e quebradiço, exigindo que os artefatos fossem grossos e pesados (MORO; AURAS, 2007).

Mas somente em 23-79 d.C., houve os primeiros estudos metalúrgicos com os manuscritos de Pliny. No primeiro milênio d.C. surgiu o aço de Damasco (RUCHERT, 2016) que devido às suas boas propriedades foi utilizado nos materiais militares. Na história da civilização islâmica, a espada de Damasco foi um símbolo de poder cultural e militar. O desenho de suas lâminas, as curvas, arte delicada, demonstram o alto nível tecnológico da civilização islâmica medieval (SLAUGHTER; GOLDENSTEIN, 2014).

Após o século XIV, foram desenvolvidos fornos que são capazes de transformar o óxido de ferro em ferro metálico e também fundir, o que permitiu que o ferro em estado líquido pudesse com maior facilidade ser moldado nas formas desejadas (COLPAERT, 2008). Até o final do século XVIII, transforma-se ferro-gusa fundido em um ferro de baixo teor de carbono forjado usando fornos desenvolvidos por Henry Cort em 1784. Em 1860, já existia mais de 300 fornos empilhados na Grã-Bretanha, mesmo diante de baixa mão-de-obra. Ainda assim, na Alemanha foi produzido um processo conhecido como cementação aumentando o teor de carbono no ferro fundido (COSIAÇO, 2016).

Abaixo imagem resumida da evolução do aço ao longo da história, até o fim do século XX (Fig. 5).

Figura 5 – Histórico do aço



Fonte: (RUCHERT, 2016)

2.7 Aço carbono

Os aços carbono são conhecidos como materiais de uso geral porque podem ser usados em uma variedade de aplicações, porém possuem limitações técnicas, especialmente em baixas temperaturas e ambientes corrosivos (DA LUZ et al., 2020). Quando se trata da indústria automobilística, nas carrocerias de caminhões especiais, o aço continua sendo o material predominante, devido à sua resistência, durabilidade e custo relativamente baixo. A desvantagem do aço, no entanto, tem sido tradicionalmente seu peso, o que pode ser decisiva em uma era de altos preços dos combustíveis (LYDEN, 2012).

O aquecimento do minério de ferro com carvão de madeira ou coque resulta na formação de ferro metálico. Por sua vez, o ferro faz ligação com o átomo de carbono formando uma liga de ferro e carbono, que corresponde a liga mais comum dentre as ligas de ferro (AQUINO, 2006). Ligas com maior teor de carbono tem ponto de fusão mais baixo, que são mais adequados a fundição, e são denominadas de ferros fundidos (COLPAERT, 2008).

Os aços são ligas de ferro com uma pequena porcentagem de carbono que podem conter também outros elementos de ligas. Normalmente, as propriedades mecânicas e a classificação dos aços estão relacionadas com o teor de carbono, que geralmente corresponde a 1% do valor total e pode ser de até 2,11% (CALLISTER, 2002). Os aços ligas são adicionados elementos intencionalmente buscando propriedades específicas, enquanto que no aço carbono contém apenas baixas

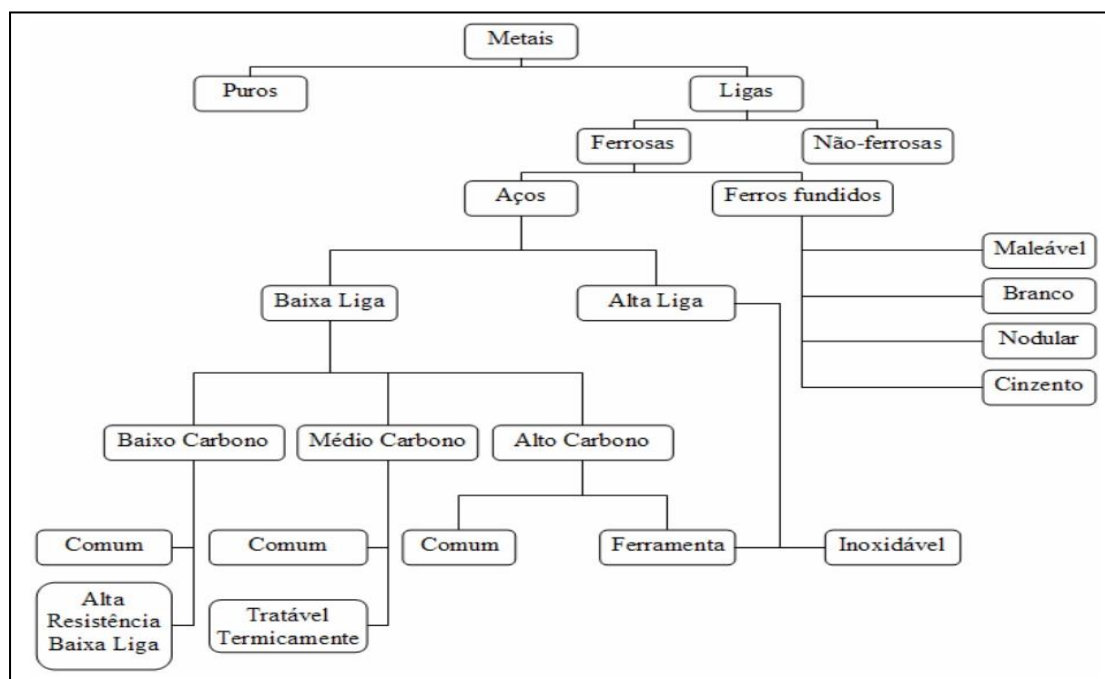
concentrações de impurezas, além do carbono e manganês (CALLISTER, 2002). Para melhor compreender estas definições é importante entender a classificação dos aços em baixa e alta liga.

Os aços-ligas são caracterizados pela presença de ligas que proporcionam características como resistência a corrosão, como é o caso dos aços inoxidáveis, ou elevada dureza, que é o caso dos aços ferramenta. Os elementos residuais mais encontrados são o fósforo, enxofre, silício e manganês, a depender do processo de fabricação. O teor total desses elementos de liga nos aços de alta liga é de no mínimo 10% (CHIAVERINI, 2008).

Nos aços carbono, que são aços de baixa liga, o teor de elementos de liga é menor, em torno de 3% a 3,5%. O aço carbono é uma liga de ferro-carbono constituída de carbono entre 0,008% a 2,11%. Existe um limite inferior de 0,008% que corresponde à máxima solubilidade do carbono na temperatura ambiente, bem como um limite superior de 2,11% que corresponde à máxima quantidade de carbono que dissolve no ferro ocorrendo a 1148 °C. A quantidade máxima que se dissolve no ferro depende não só da temperatura, mas também da presença de outros elementos de ligas ou elementos residuais (CHIAVERINI, 2008).

Para melhor compreensão das diversas divisões e subdivisões dos materiais ferrosos, a figura 6 apresenta um esquema simplificado de classificação geral.

Figura 6 – Esquema de classificação para várias ligas ferrosas



Fonte: BOEIRA; BECK, 2007.

2.7.1 Classificação dos aços

Existe uma grande quantidade de tipos de aços no mercado, principalmente para a construção mecânica, de forma que a classificação dos aços é necessária. Cada tipo de aço tem uma determinada aplicação (TSCHIPTSCHIN, 2020). Para a classificação dos aços existem designações que foram especificadas por meio de diversas normas. As normas mais utilizadas são SAE (Society of Automotive Engineers) e AISI (American Iron and Steel Institute), existe ainda a norma brasileira ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) (TSCHIPTSCHIN, 2020).

Os sistemas de classificação de aços especiais para construção mecânica SAE/AISI (normas americanas) e ABNT (normas brasileiras) utilizam em geral quatro algarismos na forma ABCD onde A e B são números que identificam os principais elementos de liga presentes no aço e seus teores, dados em porcentagem em peso, C e D representam o teor de carbono multiplicado por 100. Por exemplo, no caso do aço AISI 1080 o número 10 indica que é uma liga de aço carbono e o número 80 indica que existe 0,80% de carbono. Estes aços são classificados por estes 4 números, e pode vir ainda precedidos por uma letra maiúscula que especifica o processo de fusão.

Eventualmente, a especificação pode apresentar ainda, de forma complementar, letras após o quarto número (BRUNATTO, 2016).

Há três subdivisões tradicionais dos aços carbono de acordo com seu teor de carbono: os aços baixo carbono que contêm menos de 0,25% de carbono; aços médio carbono com teor de 0,25% a 0,60%; e os aços alto carbono que possuem de 0,60% a 1,4% (OLIVEIRA, 2019). A subdivisões dos aços carbono são mais fáceis de serem visualizadas por meio da Figura 6.

2.7.2 Aço carbono SAE 1080

O aço carbono AISI 1080 por ter 0,80% de carbono em sua constituição, é considerado um aço de alto carbono. A tabela 1 evidencia os dados da composição química dos principais aços carbonos, destacando-se para este trabalho o aço AISI 1080, um aço de alto carbono e baixa liga, em que C, Mn, P, S e Fe correspondem a carbono, manganês, fósforo, enxofre e ferro, respectivamente.

Tabela 1 – Especificação da composição química dos principais aços carbono

SAE/AISI	C %	Mn %	P %	S %	Fe %
1010	0,08-0,13	0,30-0,60	0,030 máx.	0,050 máx.	*
1020	0,18-0,23	0,30-0,23	0,030 máx.	0,050 máx.	*
1040	0,37-0,44	0,60-0,90	0,030 máx.	0,050 máx.	*
1045	0,43-0,50	0,60-0,90	0,030	0,050 máx.	*
1080	0,75-0,88	0,60-0,90	0,030 máx.	0,050 máx.	*
1095	0,90-1,03	0,30-0,90	0,030 máx.	0,050 máx.	*

* O que sobra do balanço químico

Fonte: Adaptado (GERDAU, 2002).

O aço SAE 1080, possui uma boa resistência mecânica e capacidade de tratamento térmico. Portanto, podem ser utilizados em aplicações que exigem grandes tensões de conformação e bons índices de dureza no produto final, principalmente quando são feitos tratamentos térmicos de têmpera que aumentam esses índices de dureza. Existem várias aplicações para o aço em estudo, portanto, ele pode ser utilizado como parafusos, barras de direção, eixos de comandos de válvulas, árvores secundárias, engrenagens para caminhões, cruzetas, coroas, pinhões e virabrequins.

Ele também é utilizado na fabricação de rolamentos cementados, em trilhos e rodas de trem e em vários outros tipos de aplicações. Na maioria das aplicações são necessários trabalhos de conformação mecânica como usinagem, forjamento, laminação entre outros (BRITO, 2017). Dessa forma, o aço SAE 1080 é muito aplicável industrialmente, na cutelaria, em ferramentas de corte e é comum e de fácil obtenção, o que torna também obtenção de seus dados de literatura com facilidade.

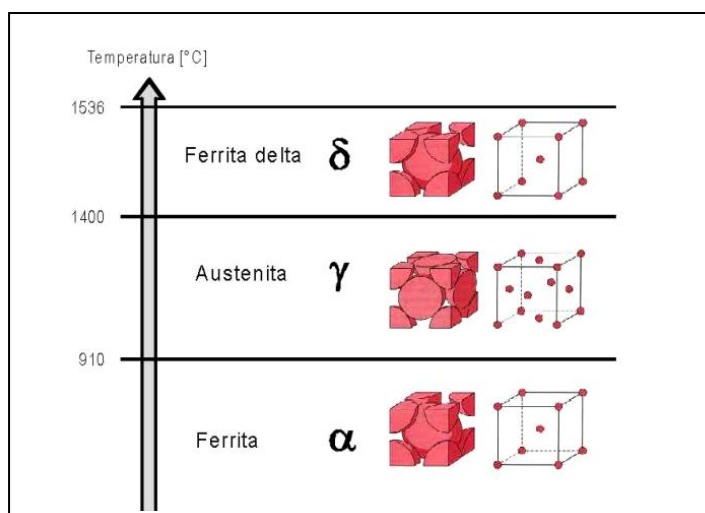
2.7.3 Aspectos microestruturais (microestrutura)

São quatro fases principais que constituem os aços carbonos: austenita, ferrita, cementita e martensita. A proporção da quantidade de cada uma dessas fases junto com a microestrutura em que se organizam afetam diretamente as propriedades da liga, sendo inclusive um contribuinte para que os aços carbonos sejam facilmente soldáveis (OLIVEIRA, 2019).

A maioria dos metais apresenta uma única estrutura cristalina em pressão ambiente. O ferro por sua vez apresenta duas estruturas cristalina em pressão ambiente a depender da temperatura. As estruturas cristalinas mais comuns são CCC (Cúbica de corpo centrado), CFC (Cúbica de face centrada) e HFC (Hexagonal compacta). A baixas temperaturas até 910°C, o ferro tem estrutura CCC. Após isso, até 1394°C, a estrutura CFC se torna mais estável. Acima da temperatura de 1394°C e até a temperatura de fusão do ferro, a estrutura torna-se a ser CCC (COLPAERT, 2008).

O ferro se caracteriza por apresentar várias fases alotrópicas, a estrutura CCC em baixas temperaturas, a forma alotrópica correspondente é chamada de alfa, com a fase Ferrita, ou ferro alfa, enquanto que acima de 1394°C é a forma alotrópica delta ou ferro delta, ainda com Austenita no estado alotrópico gama (IMIANOWSKY; WALENDOWSKY, 2017), conforme pode ser visto na figura 7.

Figura 7 – Fases do ferro desde a temperatura ambiente até a temperatura de fusão



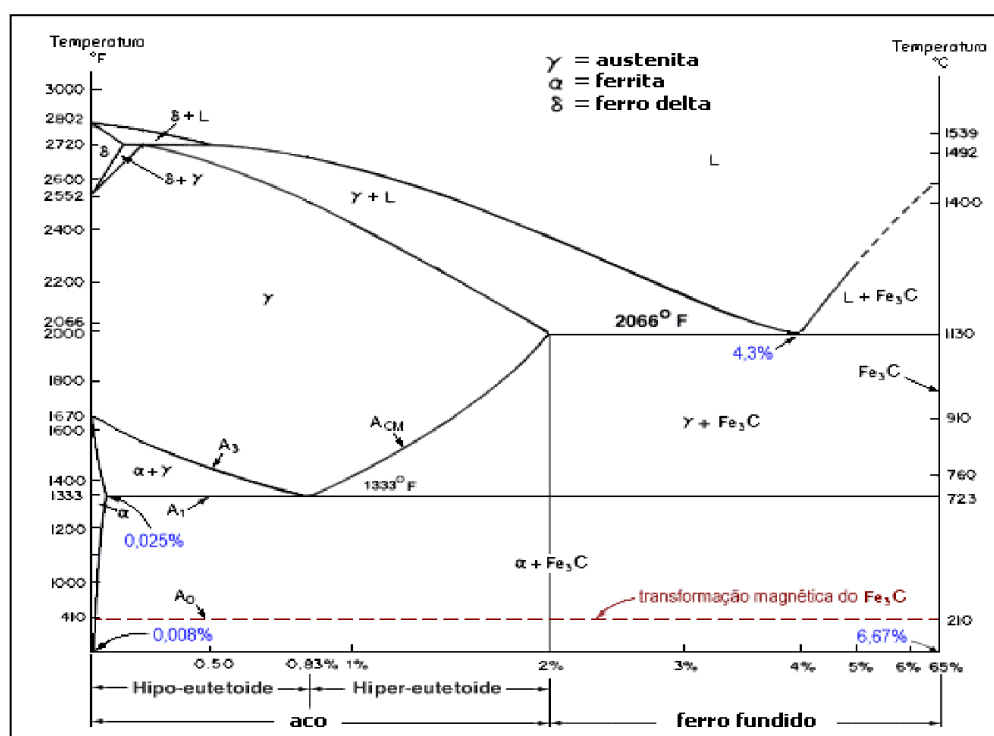
Fonte: (HECK, 2009)

Com a caracterização dos materiais, é possível prever a relação entre os comportamentos macroscópicos (mecânicos) e a microestrutura (tamanho de grão, frações volumétricas das diferentes fases, distribuição geométrica das fases) dos mais diversos materiais utilizados nas indústrias. Uma alternativa à otimização das propriedades mecânicas dos materiais é a realização de tratamentos térmicos, que consistem nas operações de aquecimento e resfriamento dos aços e ligas e visa melhorias de suas características (SILVA; MEI, 1988). O principal objetivo do tratamento térmico é melhorar as propriedades mecânicas do aço, como dureza, resistência ao escoamento, resistência à tração, ductilidade e resistência ao impacto (AGBOOLA et al., 2020).

A fase austenita está presente na maioria dos tratamentos térmicos (austenitização). Trata-se de uma solução sólida de carbono em ferro gama (CFC), com solubilidade de 2,11% no máximo, sendo uma fase tenaz e dúctil, porém com baixa resistência. A fase chamada Ferrita também é uma solução sólida de carbono em Ferro alfa (CCC), com solubilidade de 0,022% no máximo, sendo uma fase tenaz e dúctil, pouco resistente e de baixa dureza. A fase chamada Cementita (Fe_3C) é o carboneto de ferro com estrutura ortorrômbica, sendo caracterizado por uma microestrutura bem dura (CALLISTER, 2002)

Para o conhecimento dos aços, é importante destacar a interpretação do diagrama de fases da liga Fe-C, que está representado através da figura 8, com o limite de percentagem de carbono de 6,7%, em que está formado o composto Fe_3C (CHIAVERINI, 2008).

Figura 8 – Diagrama de fases da liga Fe-C em função da temperatura e da composição



Fonte: Adaptado (CHIAVERINI, 2008)

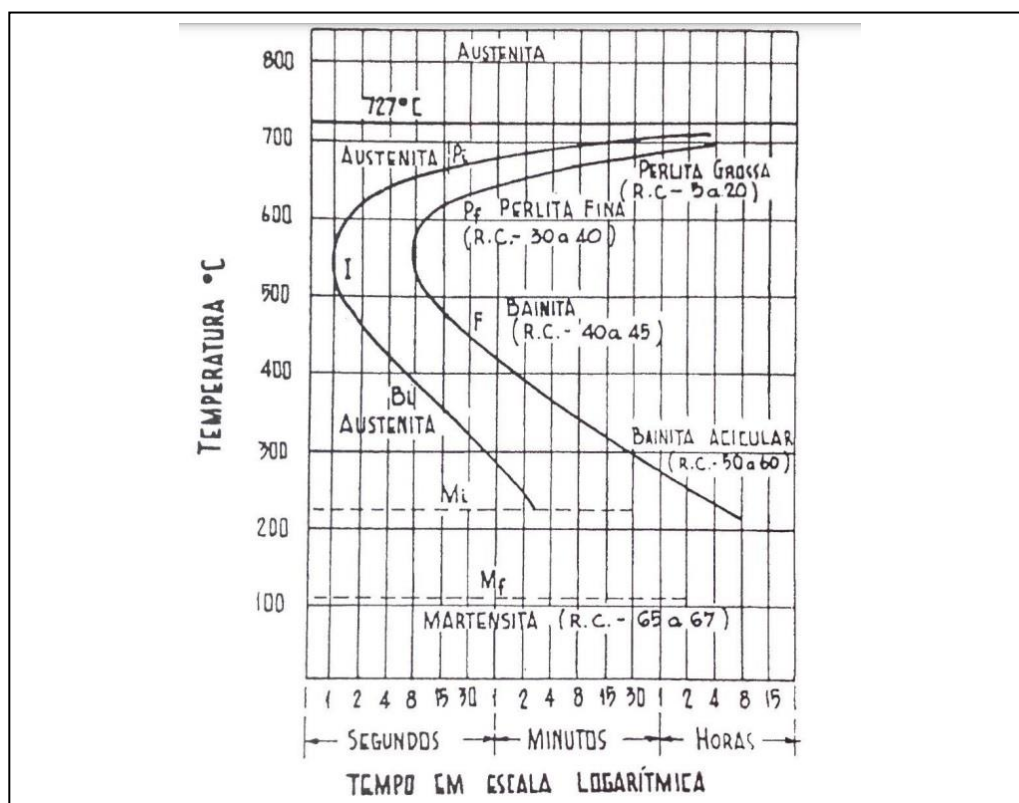
No diagrama de fases acima, são consideradas duas regiões principais, os aços carbono, que ficam no intervalo entre 0,008% e 2,14% de carbono, e a região representada pelo ferro fundido, que fica entre 2,14% e 6,7% de carbono. A ferrita dissolve apenas 0,004% de carbono em massa à temperatura ambiente, transformando austenita em ferrita, os átomos de carbono que não foram solubilizados irão se concentrar nas redondezas, resultando na formação de um outra fase (OLIVEIRA, 2019), o carboneto de ferro, de forma que a porcentagem de carbono é aumentada através do aparecimento de uma mistura mecânica entre a ferrita e a cementita com maior porcentagem de carbono (HECK, 2009).

No diagrama ferro-cementita há uma reação eutetóide no ponto em que há 0,77% de carbono e 727°C (OLIVEIRA, 2019). A transformação de austenita em ferrita em temperaturas ligeiramente abaixo de 727°C resulta em constituintes de ferro alfa

de um lado e cementita do outro, dispendo-se em lâminas distribuídas alternativamente, muito próximas umas das outras e são observadas somente mediante grandes ampliações. O novo constituinte de forma lamelar é chamado de perlita (ferrita e cementita), passando a existir nos aços hipoeutetóides ferrita e perlita, nos aços hipereutetóides cementita e perlita (CHIAVERINI, 2008). Portanto, a ferrita, cementita e perlita são os principais constituintes do aço carbono simples quando submetidos a taxas de resfriamentos lentas, para evitar a formação de fases metaestáveis (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006).

Muito embora o diagrama de equilíbrio Fe-C seja de grande valia, ele contém as suas limitações, visto que as fases presentes são apenas as identificadas através da figura 9, todavia através de tratamentos térmicos é possível chegar a outras fases e microestruturas que proporcionem características mecânicas interessantes. Para este caso, os diagramas de Transformação, Tempo, Temperatura (TTT) e Transformação em Resfriamento Contínuo (CCT) são mais interessantes de serem avaliados (RASMA, 2015).

Figura 9 – Diagrama de Transformação-Temperatura-Tempo (TTT) de um aço eutetóide

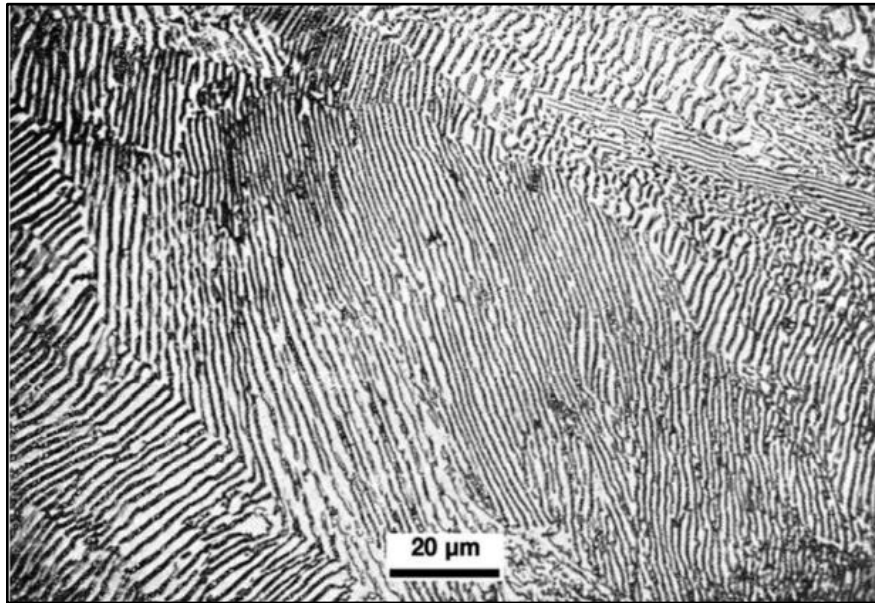


Fonte: (CHIAVERINI, 2008)

Nas seções seguintes serão descritos os microconstituintes perlita, bainita e martensita que são obtidos de acordo com a fig. 9 que mostra o diagrama de Transformação-Temperatura-Tempo (TTT) de um aço eutetóide. O diagrama TTT apresenta no eixo vertical a temperatura e no eixo horizontal o tempo em escala logarítmica. Duas curvas sólidas retratam o processo de transformação: a primeira à esquerda indica o tempo de início da transformação em cada temperatura; enquanto a seguinte indica o tempo de término. Uma curva tracejada entre as curvas sólidas corresponde ao tempo no qual 50% da transformação está concluída. Além disso, a reta tracejada superior representa a temperatura eutetóide e as linhas M_i (M_s) e M_f horizontais marcam o início e o fim da transformação martensítica (CHIAVERINI, 2008).

A perlita recebeu esse nome, devido a sua semelhança com a madrepérola. Ela se comporta como uma colônia orientadas em uma mesma direção, sendo a ferrita representada por lamelas mais claras e grossas, enquanto que a cementita lamelas mais escuras e finas (CHIAVERINI, 2008). A perlita é formada por lamelas paralelas e alternadas de cementita e ferrita, conforme se vê na Figura 10, sendo a ferrita as lamelas claras e grossas, e as lamelas escuras e finas cementita, resultando também na junção das propriedades. Na composição eutetóide, a perlita ocupa 100% da microestrutura. Haverá tanto maior quantidade de ferrita quanto menos carbono o aço contiver e tanto maior quantidade de perlita quanto mais se aproximar o aço do ponto eutetóide (CHIAVERINI, 2008).

Figura 10 – Grãos de Perlita e suas lamelas bem definidas para o aço 1080 eutetóide

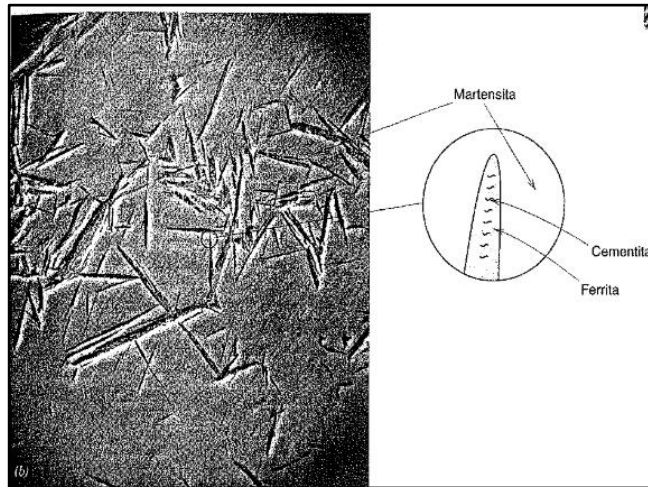


Fonte: Adaptado (COLPAERT, 2008).

Por ser formado por ferrita e cementita, mecanicamente a perlita apresenta condições intermediárias entre as propriedades macia e dúctil da ferrita, como também frágil e dura da cementita (CALLISTER, 2002).

O nome Bainita se deve a Edgar Bain que com Davenport descobriu esse microconstituente durante os estudos da decomposição isotérmica da austenita (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2006). Conforme Bhadeshia e Honeycombe (2006), a estrutura consiste em um agregado escuro acicular, conforme figuras 11 e 12, também composto por ferrita acicular metaestável e carbonetos de partículas discretas, como a cementita, obtido a partir de transformações isotérmicas de austenita, com temperaturas acima da martensita e abaixo da perlita, sendo ainda assim circundada por martensita.

Figura 11 – Bainita acicular em forma de agulhas, circundada por martensita



Fonte: (CALLISTER, 2002).

Figura 12 – Bainita produzida por tratamento isotérmico a 250°C



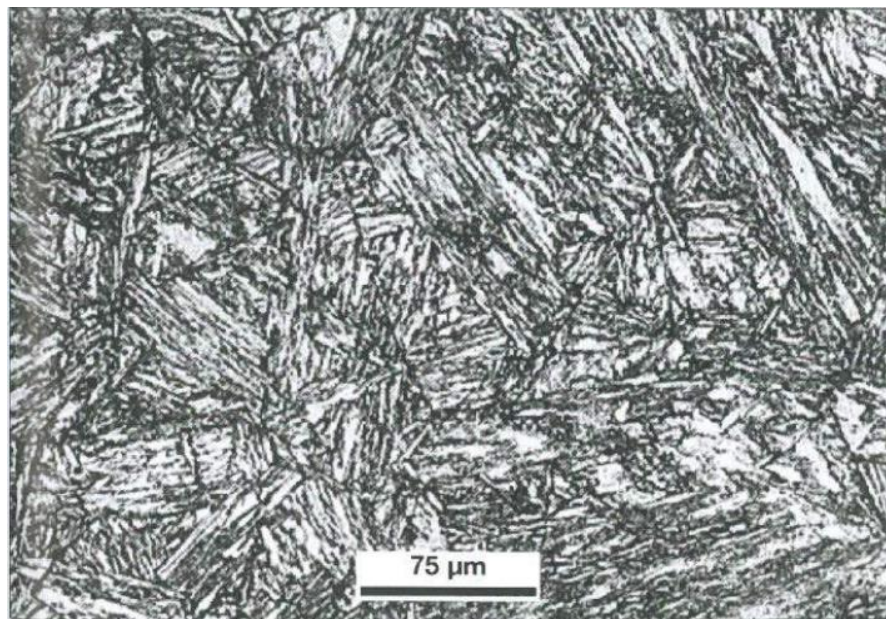
Fonte: (CALLISTER, 2002).

Os aços de estrutura bainítica são resistentes graças a grande quantidade de discordâncias, em função da estrutura acicular não direcional (COLPAERT, 2008). Formada em temperaturas logo abaixo do cotovelo do diagrama TTT de um aço carbono, a bainita superior se constitui de feixes de ferrita com forma de penas e partículas alongadas de Fe₃C entre esses feixes; diversamente, a bainita inferior se origina em temperaturas abaixo de 350°C e é composta por grandes placas aciculares de ferrita com carbonetos finos dispersos dentro delas (CHIAVERINI, 2008).

A martensita é uma fase metaestável que aparece com a transformação de resfriamento brusco da austenita, como por exemplo através do uso de água ou óleo. A sua estrutura é TCC (tetragonal de corpo centrado) diferente das outras antes tratadas, sem difusão, apresentando maior dureza. (SILVA; MEI, 1988). Ela pode ser considerada como um produto da transformação que concorre com a perlita e a bainita (CALLISTER; RETHWISCH, 2018)

A martensita assume uma aparência de placas ou de agulhas, como indicado na figura 13. Para os aços carbono, a martensita é a fase formada por transformação adifusional. Quando o aço carbono austenitizado em alta temperatura é muito rapidamente resfriado até uma temperatura específica, a formação da martensita se inicia instantaneamente e prossegue conforme o resfriamento rápido continuar até que se alcance uma temperatura chave de término desta transformação, então toda a austenita terá virado martensita (CHIAVERINI, 2008).

Figura 13 – Fotomicrografia mostrando a microestrutura martensita em aço com 0,2% de carbono resfriado continuamente



Fonte: (COLPAERT, 2008).

2.7.4 Propriedades mecânicas

Neste tópico as propriedades mecânicas são expostas de maneira geral. As propriedades mecânicas relacionam a deformação com uma carga ou força que é

aplicada; os exemplos incluem o módulo de elasticidade (rigidez), a resistência e a tenacidade, como já falado anteriormente. Propriedades mecânicas importantes para um projeto são rigidez, resistência, dureza, ductilidade e tenacidade. As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas pela realização de experimentos de laboratório cuidadosamente planejados, que reproduzem, da forma mais fiel possível, as condições de serviço. Entre os fatores a serem considerados, incluem-se a natureza da carga aplicada e a duração da sua aplicação, assim como as condições ambientais. A carga pode ser de tração, de compressão ou de cisalhamento, e sua magnitude pode ser constante ao longo do tempo ou pode variar continuamente. O tempo de aplicação pode ser de apenas uma fração de segundo ou pode se estender ao longo de um período de muitos anos. A temperatura de trabalho também pode ser um fator importante (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

As propriedades mecânicas dos aços carbono de alto teor, estão demonstradas através da tabela 2.

Tabela 2 – Aplicações típicas e faixas de propriedades mecânicas para aços-carbono comuns temperados em óleo e revenidos

Número AISI/SAE	Limite de Resistência à tração (Mpa)	Limite de Escoamento	Ductibilidade (%AL em 50mm)	Aplicações Típicas
1040	605-780	430-585	33-19	Virabrequins, parafusos
1080	800-1310	480-980	24-13	Talhadeiras, martelos
1095	760-1280	510-830	26-10	Facas, lâminas de serra

Fonte: Adaptado (CALLISTER, 2002).

Dentre as propriedades estão ductilidade, dureza, ductibilidade, tenacidade, elasticidade e plasticidade. A ductilidade pode ser expressa quantitativamente como um alongamento percentual. O alongamento percentual, %AL, é a porcentagem de deformação plástica na fratura, e pode ser calcula pela equação 1, em que l_f e l_0 são

comprimentos final e inicial, respectivamente e $\varepsilon_{plástica}$ é a deformação plástica. (CALLISTER; RETHWISCH, 2018)

$$AL\% = \left(\frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \cdot 100 = \varepsilon_{plástico} \cdot 100 \quad (1)$$

A dureza é uma medida da resistência de um material a uma deformação plástica localizada (por exemplo, uma pequena impressão ou risco) (CALLISTER; RETHWISCH, 2018). Já a ductibilidade é a capacidade do material de se deformar plasticamente sem se romper e é definida pela extensão do patamar de escoamento (BANDEIRA, 2008).

Por outro lado, a tenacidade é a capacidade do material de absorver energia quando submetido à carga de impacto. Enquanto a elasticidade é a capacidade de um material a retornar a forma do estado inicial, após a submissão de uma carga de tração ou compressão. Neste quesito, a deformação é proporcional ao esforço aplicado. E o conceito de plasticidade é de certa forma inverso ao da elasticidade, porque é quando ocorre uma deformação definitiva devido a ação das forças de compressão e tração acima do limite de escoamento do aço (BANDEIRA, 2008).

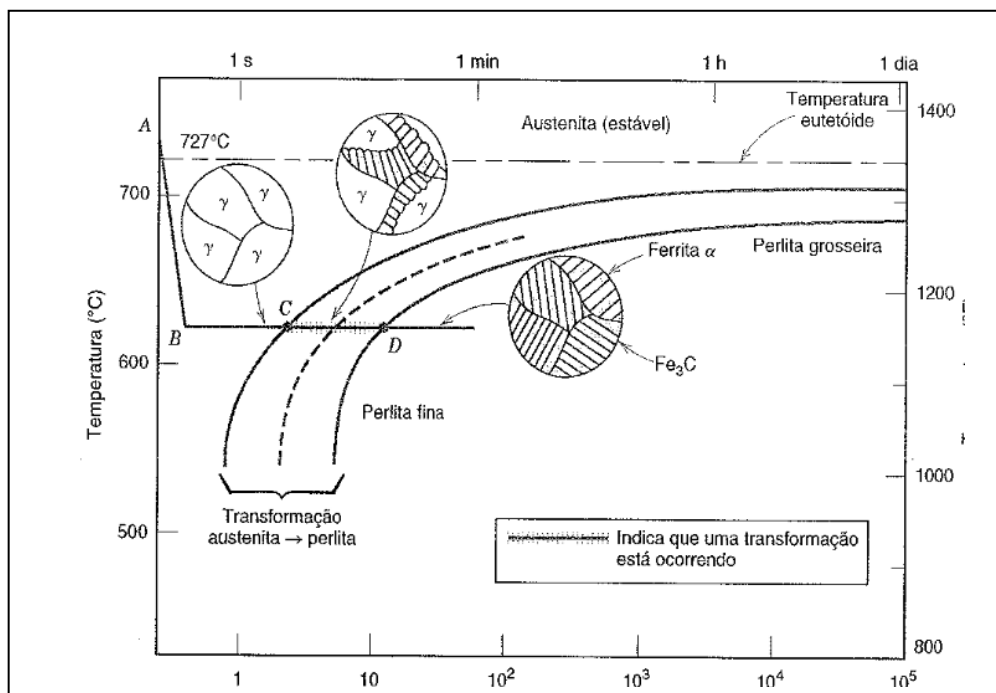
Desta forma, quando os metais apresentam elevada resistência à fratura eles são ditos tenazes ou de elevada tenacidade à fratura. O oposto, quando os metais são poucos resistentes à fratura, caracteriza uma condição de baixa tenacidade à fratura, em cujo extremo situam-se os metais de comportamento frágil. Ao comportamento tenaz normalmente está associado um modo de fratura característico, dúctil. O comportamento frágil, por outro lado, está normalmente associado à fratura por clivagem (EMYGDIO, 2012)

Apesar das boas características, os aços carbono não são resistentes à corrosão e erosão, que gera resíduos contaminantes indesejáveis. É por esse motivo que os aços carbonos não podem ser utilizados em locais que podem causar contaminação sobre o material, até porque a corrosão será intensificada. Entretanto são realizados revestimentos de materiais sobre o aço carbono com o objetivo de proporcionar proteção contra a corrosão. Estes materiais podem ser metálicos ou não (DA LUZ et al., 2020).

2.7.5 Transformações isotérmicas

Com resfriamento, a austenita que possui concentração de carbono intermediária, se transforma em uma fase ferrita, que possui um número muito menor quantidade de carbono, como também em cementita que está em maior concentração de carbono. Pela união de uma série de curvas de transformação isotérmica geradas em uma larga faixa de temperaturas, é possível expor como se configura a relação da transformação de fases vigente com o tempo e a temperatura em um único gráfico com mais clareza e maior riqueza de detalhes. Esse gráfico é nomeado de diagrama TTT (transformação tempo temperatura) e está exemplificado na figura 14 (OLIVEIRA, 2019).

Figura 14 – Fração reagida isotermicamente em função do logaritmo do tempo para a transformação de austenita em perlita



Fonte: (CALLISTER, 2002).

Uma conclusão no contexto dos tratamentos térmicos é a relação entre a microestrutura, as propriedades e o processamento. Usando-se de processamentos, deseja-se uma determinada microestrutura, que por sua vez possuirá determinadas propriedades associadas (HECK, 2009).

Os diagramas TTT são aplicados para determinação dos parâmetros de tratamentos térmicos, conforme a microestrutura e as propriedades mecânicas visadas.

2.8 Tribologia

A tribologia teve uma das suas primeiras utilizações antes mesmo de 3000 a.C, com a furadeira de arco em pó egípcia, que utilizava a técnica do atrito. Em 2400 a.C, os egípcios notaram a necessidade de lubrificação para facilitar o movimento de um colosso nos trenós. Por volta de 700 a.C, os assírios, em semelhança ao feito pelo egípcios, incrementaram a utilização de roletes sob o trenós (PURQUERIO; FORTULAN, 2016).

Na tribologia são levados em consideração os aspectos geométricos, mecânicos e físico-químico. A região afetada pelo deslizamento relativo quando dois ou mais corpos estão em contato é denominada sistema tribológico (SOUSA et al., 2009).

2.8.1 Desgaste

A O.E.C.D. (Organization for Economic Cooperation and Development) define o desgaste como sendo a perda progressiva de matéria da superfície de uma peça, em consequência do movimento relativo de um outro corpo sobre a mesma (FRANCO, 1989). Na maioria das situações práticas, quando dois corpos deslizam um sobre o outro, as superfícies possuem lubrificação, e o desgaste é denominado de desgaste deslizante lubrificado. Quando não existe a presença da lubrificação, mesmo que ocorrendo na presença de ar (fluido ambiente), o desgaste resultante é chamado de desgaste por deslizamento a seco (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

O desgaste é, usualmente, considerado de forma empírica e qualitativa. Isto se deve, principalmente, ao fato de o desgaste não ser uma propriedade intrínseca do material, mas do sistema atuante. Isto torna delicado o estabelecimento de modelo e a transposição de resultados. Entretanto, a necessidade de materiais com melhor performance e a elevada soma de valores envolvidos motivaram, ao longo dos anos, um avanço considerável nesta área (FRANCO, 1989). Em tribologia, uma área

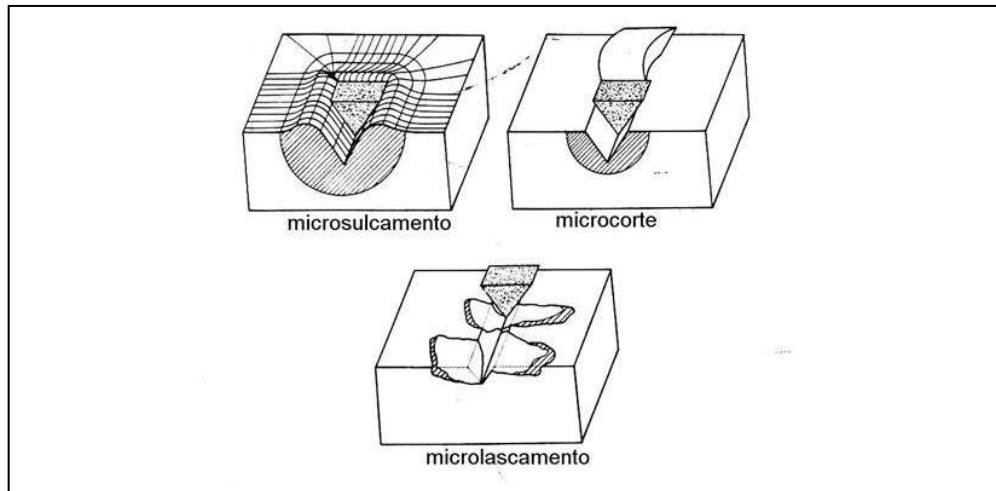
multidisciplinar (de grande interesse industrial quanto ao domínio científico e tecnológico dos fenômenos inerentes aos movimentos relativos de superfícies) as perdas econômicas e o impacto ambiental pelo efeito negativo dos atritos e desgastes chamam atenção nas estatísticas. Cerca de 1% a 6% do produto interno bruto de países desenvolvidos são desperdiçados no desgaste tribológico e 20% dessas perdas podem ser evitadas com aplicação do conhecimento já existente em desgaste, atrito e lubrificação (CGEE, 2010).

As previsões de durabilidade de um componente submetido ao desgaste estão fortemente relacionadas ao sistema tribológico. Durante o desgaste surgem tensões junto à região de contato que em função das condições geométricas, reológicas e físico-químicas do contato podem resultar nos seguintes mecanismos de remoção de material, ilustrados na figura 15 (FRANCO, 1989):

- a- Microsulcamento – o material deforma-se plasticamente sem perda de matéria, gerando um sulco de acúmulos frontais e laterais. Mediante sucessivas deformações plásticas, micro fragmentos podem ser formados na superfície, devida à formação de trincas e/ou delaminação nas regiões deformadas.
- b- Microcorte – caracteriza-se pela formação de microcavacos.
- c- Microlascamento – caracteriza-se pela formação de grandes partículas de abrasão, devido à nucleação e interação de fissuras. Este tipo de mecanismo surge quando as tensões impostas superam as tensões críticas para a formação de propagação de trincas. Este mecanismo é restrito aos materiais frágeis.

Em função das variáveis atuantes no tribosistema, mais de um destes micromecanismos podem atuar simultaneamente (FRANCO, 1989).

Figura 15 – Micromecanismos



Fonte: (FRANCO, 1989)

2.9 Coeficientes de Pearson

O coeficiente de determinação é capaz de quantificar o quanto que o modelo de regressão se adequa ao sistema, indicando a proporção da variação de y que pode ser explicada em função de x pela regressão. É possível ainda calcular o coeficiente de correlação a partir do coeficiente de determinação, bastando-se aplicar a raiz. O coeficiente de correlação indica se as variáveis aleatórias analisadas possuem linearidade e proporcionalidade (BEZERRA, 2022).

Correlação é uma medida de associação bivariada (força) do grau de relacionamento entre duas variáveis. A correlação mensura a direção e o grau da relação linear entre duas variáveis quantitativas. O coeficiente de correlação de Pearson (r) é uma medida de associação linear entre variáveis. Sua fórmula está representada na equação 4, sendo n o número de variáveis, x e y as duas variáveis, s é o desvio padrão (eq. 2) e \bar{x} significa a média dos valores de x (eq. 3). Outra relação importante é o coeficiente de determinação que é o quadrado do coeficiente de correlação (r^2) (FIGUEIREDO FILHO, SILVA JÚNIOR, 2009).

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum x_i \quad (3)$$

$$r = \frac{1}{n-1} \sum \left(\frac{x_i - \bar{X}}{s_x} \right) \left(\frac{y_i - \bar{Y}}{s_y} \right)$$

(4)

3 Materiais e Métodos

Um esclerômetro pendular recém modificado foi utilizado de modo a realizar o ensaio esclerométrico com maior fonte de confiança, precisão, repetitividade, facilidade de execução, e automação. A estrutura principal do esclerômetro é em alumínio, assim como o próprio pêndulo físico, o qual foi adaptado e aperfeiçoado. De forma que o esclerômetro pendular foi validado por Bezerra (2022). A estrutura do esclerômetro pendular está representada na figura 16, em que apenas o eixo central é feito de aço carbono no qual é apoiada a parte móvel do pêndulo simples e está localizado no Laboratório de Processamento de Materiais por Plasma – LABPLASMA.

Figura 16 – Esclerômetro pendular



Fonte: Elaborada pelo autor

Os ensaios de Charpy foram realizados em um equipamento Charpy (Fig. 17), localizado nas instalações do Laboratório de Ensaios Mecânicos dos Materiais – LEMAT.

Figura 17 – Equipamento de Charpy



Fonte: Elaborada pelo autor

Foi necessário testar amostras metálicas no método Charpy, também testar amostras metálicas no esclerômetro pendular, além de medir comprimento e largura do risco, bem como analisar as energias dos testes e comparar os resultados. Por fim, foi preciso quantificar a correlação entre ambos os ensaios realizados. Os estudos foram baseados nos resultados obtidos pelas análises após os ensaios de tenacidade ao impacto através do método Charpy e de riscamento por esclerometria pendular em amostras do aço SAE 1080 submetidas a tratamentos isotérmicos, de modo que foram realizadas análises de cada ensaio e correlações entre eles utilizando os coeficientes de Pearson.

Na próxima seção serão descritos os materiais utilizados para os ensaios e os métodos seguidos das análises das amostras ensaiadas.

3.1 Materiais

O material utilizado para a produção das amostras e a realizações dos ensaios esclerométrico e de Charpy foi fornecido para o Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, sendo classificado como aço carbono SAE/AISI 1080, de baixa liga e de alto teor de carbono. O aço SAE/AISI 1080 eutetóide foi escolhido pela facilidade de se obter amostras com microestruturas homogêneas, através de tratamentos isotérmicos em diferentes

temperaturas subcríticas, de modo a se obter Perlita grosseira, Bainita superior e Martensita (CHIAVERINI, 2008). Além de possuir uma boa resistência mecânica e capacidade de tratamento térmico (BRITO, 2017). As amostras foram preparadas a partir de barras chatas de dimensões 400 x 50 x 5,10 mm (Fig. 18). A composição química em peso dos elementos do aço carbono SAE 1080 está representada na Tabela 3.

Tabela 3 – Especificação da composição química do aço carbono AISI 1080

SAE/AISI	C %	Mn %	P %	S %	Fe %
1080	0,75-0,88	0,60-0,90	0,03 máx.	0,05 máx.	*

* O que sobra do balanço químico.

Fonte: Adaptado (GERDAU, 2002).

Figura 18 – Barra chata maciça de aço carbono 1080



Fonte: Elaborada pelo autor

3.2 Preparação dos corpos de prova

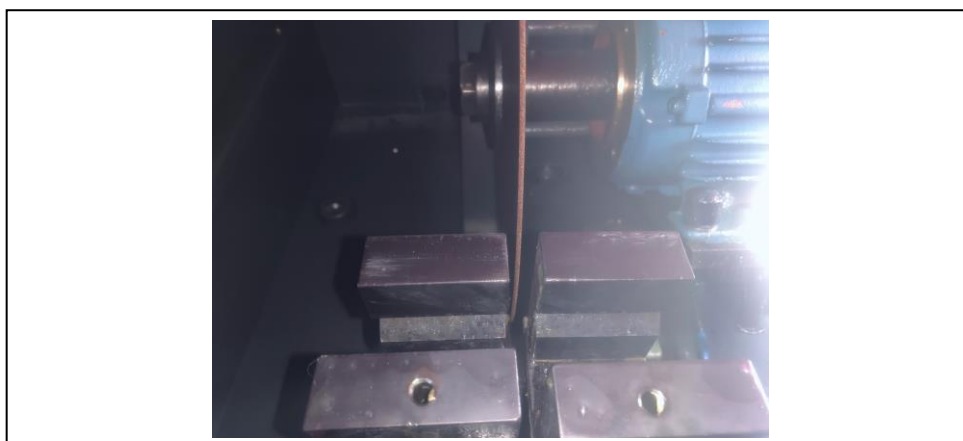
Para a produção dos corpos de prova a partir da barra chata de aço AISI 1080 inicialmente foram removidos cupons, que são corpos metálicos de formas e materiais diversos como os corpos de prova, no LIME – Laboratório Institucional de Microscopia Eletrônica utilizando o equipamento *Cut Off*, com refrigeração a água, conforme a Figuras 19 e 20. E na figura 21 é representado um fluxograma da preparação das amostras tanto do ensaio de Charpy quanto da esclerometria pendular.

Figura 19 – Cut Off CFIII



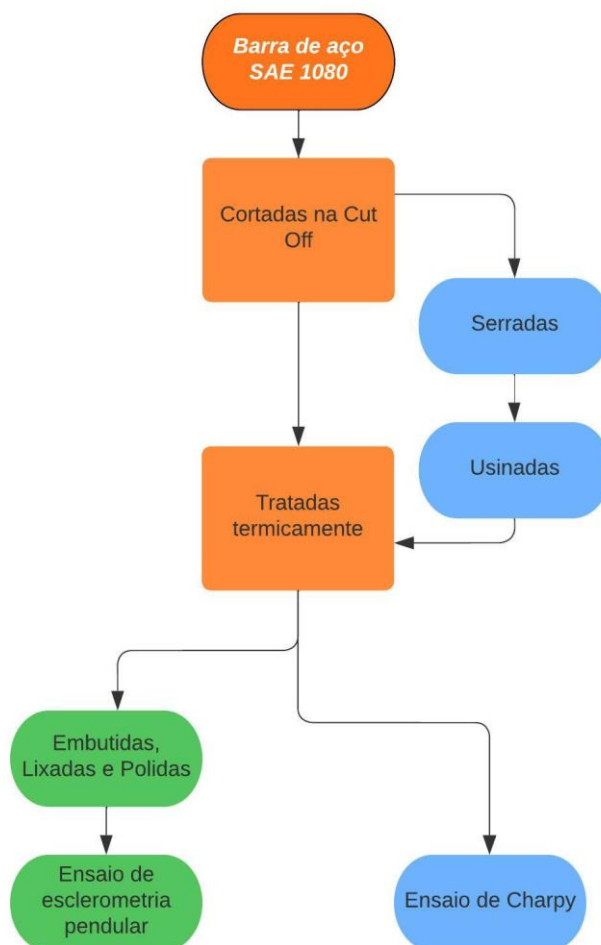
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 20 – Barra chata de aço 1080 cortada dentro da Cut Off CFIII



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 21 – Fluxograma de preparação das amostras



Fonte: Elaborada pelo autor

3.2.1 Preparação dos corpos de prova do esclerômetro pendular

Apesar de não existir uma norma específica para o esclerômetro pendular, todos os corpos de prova seguiram o mesmo processo, no LIME – Laboratório Institucional de Microscopia Eletrônica, de forma que os cupons primeiramente tratados termicamente foram embutidos na embutidora (Fig. 22) utilizando pó de resina fenólica, logo após foram lixados e polidos na lixadeira e politriz (Fig. 23) para obtenção de uma superfície de ensaio lisa. No lixamento foram usadas as lixas #400, #600 e #1200, e no polimento foram aplicadas suspensões diamantadas de 6, 3 e 1 micrometros, por um período de 5 minutos cada etapa de lixamento e de polimento.

Figura 22 – Embutidora EFD 30



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 23 – Lixadeira e Politriz



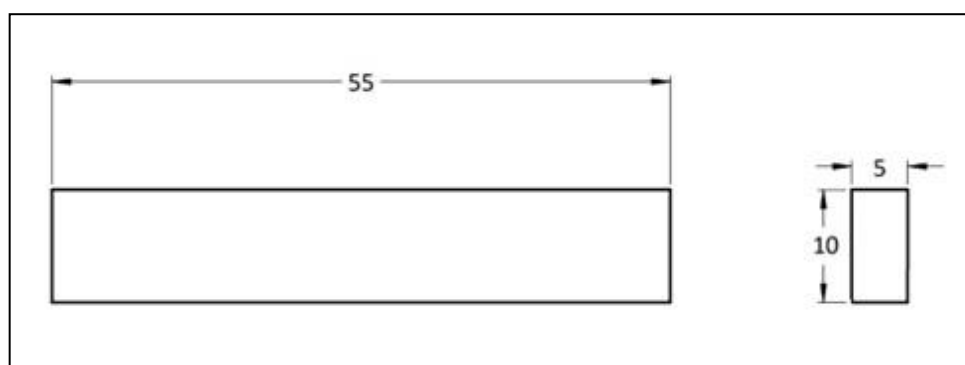
Fonte: Elaborada pelo autor

3.2.2 Preparação dos corpos de prova Charpy

Após serem removidos os cupons da barra foram produzidos os corpos de prova. Eles foram confeccionados segundo a norma ASTM A370 na oficina do laboratório de manufatura da UFRN (LABMAN), de forma que foram usinados na direção longitudinal de laminação da barra, e a Figura 24 mostra um desenho dos corpos de prova produzidos, após este processo, eles foram tratados termicamente. As amostras tiveram como 55 mm de comprimento, com seção transversal de 5 mm por 10 mm sem entalhe, já que, algumas vezes, o entalhe significa mais uma variável de confusão e uma amostra sem entalhe pode eliminar possíveis erros relacionados à qualidade do entalhe, desta forma, garantir a reprodutibilidade do ensaio, como explicado na seção 2.2.3. Para isto, foi realizado um teste com uma amostra sem

tratamento térmico, representando o pior caso para o rompimento do material, de forma que garantiria a fratura das amostras com aços tratados termicamente. Isto posto, foram preparadas três amostras para cada aço tratado e quatro amostras para o corpo de prova sem tratamento térmico.

Figura 24 – Desenho do corpo de prova segundo a norma ASTM A370 sem o entalhe



Fonte: Elaborada pelo autor

3.3 Tratamentos térmicos

Os tratamentos térmicos foram executados no Laboratório de Tratamentos Térmicos do Departamento de Materiais e Tecnologia da UFRN. Os equipamentos utilizados para a realização dos tratamentos foram dois fornos industriais das marcas SHANCIS e INTI.

3.3.1 Tratamentos térmicos escolhidos

Para a formação de diferentes estruturas, compostas por diferentes frações microestruturais, foram definidos o tipo de tratamento térmico com base na temperatura de aquecimento.

Inicialmente os corpos de prova foram austenitizados a 900°C através do forno (Fig. 25) por 60 minutos em atmosfera de argônio na taxa de NL/min de argônio, em seguida foram submetidos aos tratamentos isotérmicos em banho de sal fundido (mistura de nitratos e nitritos alcalinos) no forno conforme figura 26, e nas temperaturas 650°C, 300°C, e na têmpera em água, de modo a produzir material com microestrutura homogênea e de fácil caracterização, conforme mostrado anteriormente, nas seções 2.7.3 e 2.7.5 da revisão.

Figura 25 – Forno para tratamentos térmicos



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 26 – Forno para tratamentos isotérmicos com banho de sal

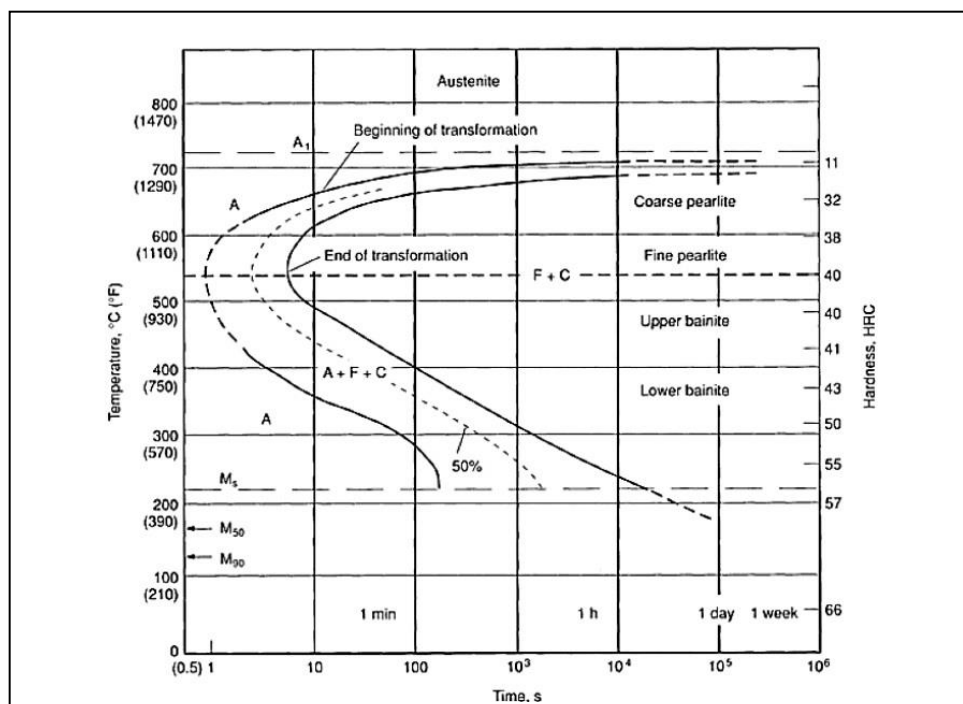


Fonte: Elaborada pelo autor

3.3.2 Tratamento térmico 01 – Isotérmico a 650°C

Após a austenitização, para obtenção de perlita grossa foi feito um tratamento isotérmico a 650°C, mantido por 1200 segundos, sendo em seguida desligado o forno até que as amostras atingissem a temperatura ambiente com uma taxa de resfriamento de 150°C/hora. De acordo com as temperaturas obtidas e pelo lento resfriamento, a microestrutura esperada é a perlita grossa. O único constituinte produto da etapa isotérmica deveria ser perlita, logo seria necessário um valor acima de 550 °C a fim de impedir a formação de bainita (OLIVEIRA, 2019). Junto das condições estabelecidas com a leitura do diagrama TTT do aço 1080 (fig. 27), foi então selecionada a temperatura de 650°C por 1200s.

Figura 27 – Diagrama TTT do aço AISI 1080



Fonte: OLIVEIRA, 2019

3.3.3 Tratamento térmico 02 – Isotérmico a 300 °C

Já para a obtenção da bainita inferior, após a austenitização, foi feito um tratamento isotérmico a 300°C, mantido por 7200 segundos, sendo em seguida desligado o forno até que as amostras atingissem a temperatura ambiente com uma taxa de resfriamento de 150°C/hora. A bainita inferior se origina em temperaturas abaixo de 350°C por isso foi selecionada a temperatura de 300°C, de acordo com o diagrama da figura 27.

3.3.4 Tratamento térmico 03 – Têmpera em água

Para a obtenção da martensita foi feita a austenitização completa a 900°C, seguida de têmpera em água. Já que a têmpera em água à temperatura ambiente cumpre o intento de interromper a transformação perlítica imediatamente após a amostra ser retirada do forno, conforme visto também no diagrama da figura 27.

3.4 Ensaio Esclerométrico

No ensaio de esclerometria pendular, a técnica tribológica que consiste em promover um movimento de pêndulo usando os indentadores com diferentes ângulos

de ponta que são liberados a partir de altura inicial 'h' e atinge a amostra com um único passo abrasivo. Então, o pêndulo é lançado com uma altura inicial padrão em que é acionado por um ímã. Depois de riscar a amostra, o pêndulo atinge uma altura final do movimento permitido pela energia restante que não foi dissipada durante o risco. A energia de deformação é calculada usando a equação 5 abaixo (ARAÚJO NETO, et al., 2016).

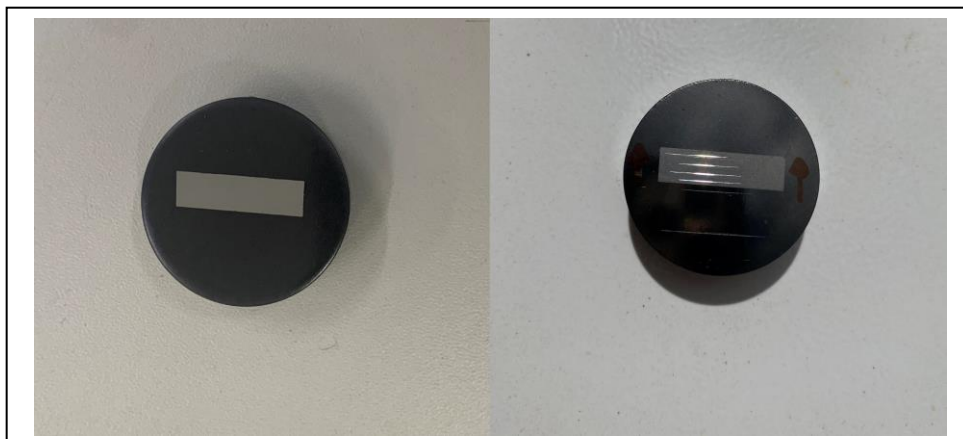
$$e_r = \frac{m \cdot g \cdot h \cdot [\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2]}{V_d} \quad (5)$$

Em que e_r é a energia de deformação específica (J/mm^3), m é a soma das massas do pêndulo e do indentador (kg), g a aceleração da gravidade (m/s^2), h é altura do centroide da massa m , φ_1 e φ_2 são os ângulos, inicial e final, respectivamente e V_d o volume removido durante após o risco (mm^3) (ARAÚJO NETO, et al., 2016).

De forma a padronizar a metodologia experimental, diminuindo a ocorrência de erros sistemáticos nos ensaios, foram utilizados os mesmos tipos de indentadores cônicos com angulação de 40° e ponta de carbeto de tungstênio e corpos de prova com dimensões próximas, a mesma altura inicial do pêndulo e riscador, mesmo sistema de fixação das amostras, mesmo sistema de otimização e reconhecimento de resultados e mesmas condições ambientais. Foram variadas apenas a penetração do riscador e os tratamentos térmicos do material.

Após os ensaios, os riscos esclerométricos gerados nas superfícies dos corpos de provas (fig. 28) foram caracterizados através de um estereoscópio (fig. 29), em que o comprimento total e a largura máxima foram avaliadas como mostra a figura 30, com esta medida é possível obter o volume removido V_d . Em resumo foram ensaiadas quatro amostras com quatro riscos em cada, com exceção da amostra sem tratamento térmico que foi ensaiada uma amostra a mais totalizando nove riscos nos dois corpos de prova da amostra sem tratamento.

Figura 28 – Amostra antes e após o riscamento pelo esclerômetro pendular



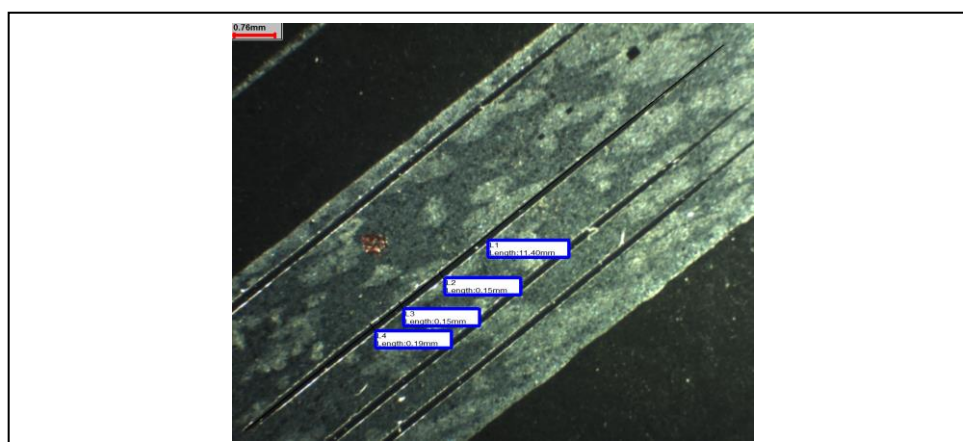
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 29 – Estereoscópio para visualização dos riscos



Fonte: Bezerra, 2022

Figura 30 – Riscos nos corpos de prova através do estereoscópio



Fonte: Elaborada pelo autor

3.5 Ensaio Charpy

O ensaio Charpy será realizado seguindo a metodologia descritiva segundo a ASTM 370 para as amostras de aço carbono AISI 1080. Após o primeiro ensaio da amostra sem entalhe e sem tratamento térmico, são feitos mais três ensaios das mesmas amostras, logo em seguida são ensaiadas as nove amostras com tratamento térmico, sendo três para cada caso. Na figura 31 são mostrados os corpos de prova antes do ensaio.

Figura 31 – Amostras para o ensaio Charpy



Fonte: Elaborada pelo autor

4 Resultados

As amostras riscadas pelo esclerômetro pendular apresentadas na figura 32 foram de fácil e rápida preparação, assim como os ensaios no esclerômetro pendular puderam ser realizados de forma simples. A figura contém as amostras A01 (sem tratamento térmico), A02 (com o tratamento isotérmico 01), A03 (com o tratamento isotérmico 02) e A04 (com tratamento isotérmico 03).

Figura 32 – Amostra riscadas pelo esclerômetro pendular



Fonte: Elaborada pelo autor

As figuras 33, 34, 35 e 36 abaixo mostram o resultado dos ensaios de Charpy nos quatro diferentes tipos de amostras: A01, A02, A03 e A04, respectivamente, todas elas se romperam totalmente como esperado, mesmo sem a realização dos entalhes.

Figura 33 – Amostras sem tratamento térmico rompidas após o ensaio Charpy



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 34 – Amostras com tratamento térmico 01 rompidas após o ensaio Charpy



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 35 – Amostras com tratamento térmico 02 rompidas após o ensaio Charpy



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 36 – Amostras com tratamento térmico 03 rompidas após o ensaio Charpy



Fonte: Elaborada pelo autor

A tabela 4 mostra os dados de energias obtidas no ensaio Charpy na unidade de medida kpm (kilopond-meter) para as quatro amostras A01 (sem tratamento

térmico), três amostras A02 (tratamento térmico 1), três amostras A03 (tratamento térmico 2) e três amostras A04 (tratamento térmico 3), seguidas dos valores das variâncias e desvios padrões dos quatro materiais analisados, o menor desvio padrão, conseqüentemente menor variância foram das amostras A04 em que apresentaram o mesmo valor de energia 0,2, seguida das amostras A03 com valores baixos, depois as amostras A02 apresentando também valores baixos de desvio padrão e variância e por último as amostras A01 que possuíram maiores valores, porém, ainda assim foram obtidos valores baixos de variância e desvio padrão.

Tabela 4 – Energias do ensaio de Charpy em kpm

Amostras	A01	A02	A03	A04
e_r	12,2	11,2	1	0,2
e_r	13,8	12	1,4	0,2
e_r	14	12,2	1,4	0,2
e_r	11,04			
Variância	1,4728	0,1867	0,0356	0
Desvio Padrão	1,2136	0,4320	0,1886	0

Fonte: Elaborada pelo autor

Na tabela 5 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de esclerometria pendular, dessa forma, foram realizados nove riscos na amostra A01 (sem tratamento térmico) e quatro riscos nas outras amostras, A02 (tratamento térmico 1), A03 (tratamento térmico 2) e A04 (tratamento térmico 3), em que E_r representa a energia de riscamento, P a profundidade de risco, C o comprimento de risco medido no estereoscópio, V_r o volume removido do risco e e_r a energia específica de riscamento. Seguida da tabela 6 que mostra os valores de variância e desvio padrão dos valores obtidos nos ensaios de esclerometria pendular para os quatro tipos de amostra, percebe-se que o menor desvio padrão é a amostra A03, seguida da A04, A01 e por último a A02 com o maior desvio padrão entre elas e como a variância é o quadrado dos desvios padrões, conseqüentemente, se tornaram valores superiores. Apesar de possuírem desvios e variâncias acima das encontradas no método Charpy, os valores são aceitáveis para a avaliação de comparação em questão. Segundo Bezerra (2022), tendo em vista a realização de um risco de pequenas dimensões, qualquer fator externo tem a capacidade de alterar os resultados levantados. Foi

observado durante a realização dos ensaios que o ar-condicionado provocou uma alteração nos resultados da energia de riscamento, assim como o próprio processo de carregamento do notebook usado para obter os dados experimentais fornecidos pelo esclerômetro pendular. Quando o notebook era alimentado pela fonte, os resultados foram maiores ou do que quando suprido pela bateria. Esta informação é importante, pois durante a realização dos ensaios é preciso que seja realizado o maior controle possível das variáveis e parâmetros envolvidos, de forma a reproduzir a realidade experimental.

Tabela 5 – Resultados obtidos nos ensaios de esclerometria pendular

Amostras	E_r (J)	P (mm)	C (mm)	V_r (mm ³)	e_r (J/mm ²)
A01	0,0876	0,0240	9,65	0,002554	34,30
	0,1305	0,0314	11,05	0,005028	25,95
	0,0924	0,0240	9,65	0,002554	36,18
	0,1257	0,0304	10,87	0,004632	27,14
	0,2253	0,0383	12,20	0,008249	27,31
	0,2253	0,0392	12,34	0,008733	25,80
	0,1352	0,0311	11,00	0,004915	27,51
	0,2442	0,0412	12,66	0,009926	24,60
	0,0972	0,0279	10,42	0,003749	25,93
A02	0,1827	0,0328	11,29	0,005598	32,63
	0,1447	0,0334	11,40	0,005877	24,62
	0,1305	0,0347	11,62	0,006466	20,18
	0,0924	0,0332	11,36	0,005774	16,00
A03	0,0686	0,0367	11,94	0,007407	9,26
	0,121	0,0386	12,25	0,008419	14,37
	0,1162	0,0392	12,35	0,008769	13,25
	0,0686	0,0353	11,72	0,006749	10,16
A04	0,0113	0,0207	8,98	0,001782	6,34
	0,0400	0,0262	10,09	0,003192	12,53
	0,0495	0,0465	13,45	0,013435	3,68
	0,0781	0,0351	11,68	0,006635	11,77

Fonte: Elaborada pelo autor

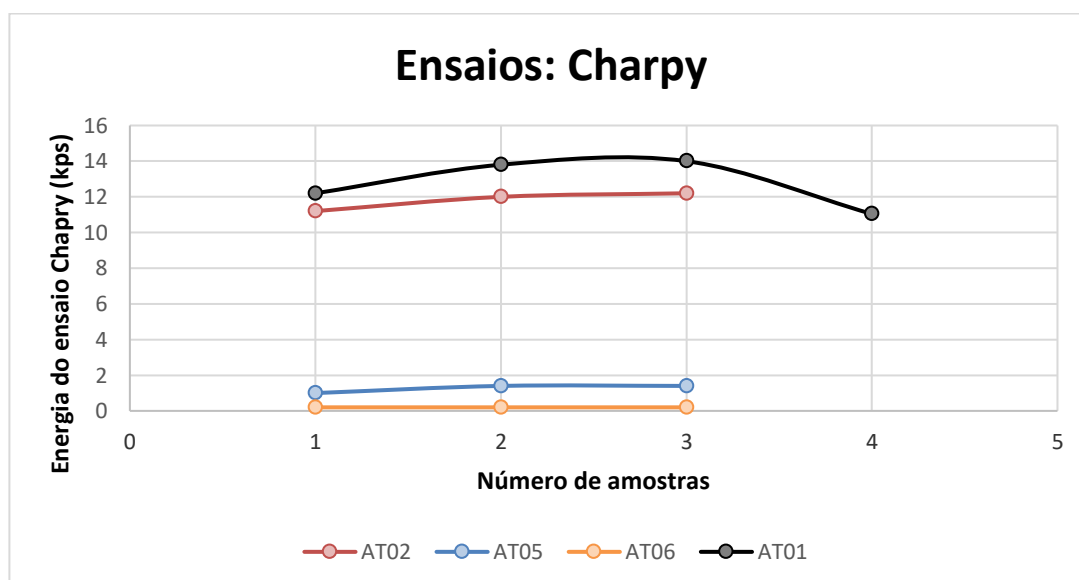
Tabela 6 – Variância e desvio padrão das amostras da esclerometria pendular

Amostras	A01	A02	A03	A04
Variância	14,67	37,96	4,46	13,70
Desvio padrão	3,83	6,16	2,11	3,70

Fonte: Elaborada pelo autor

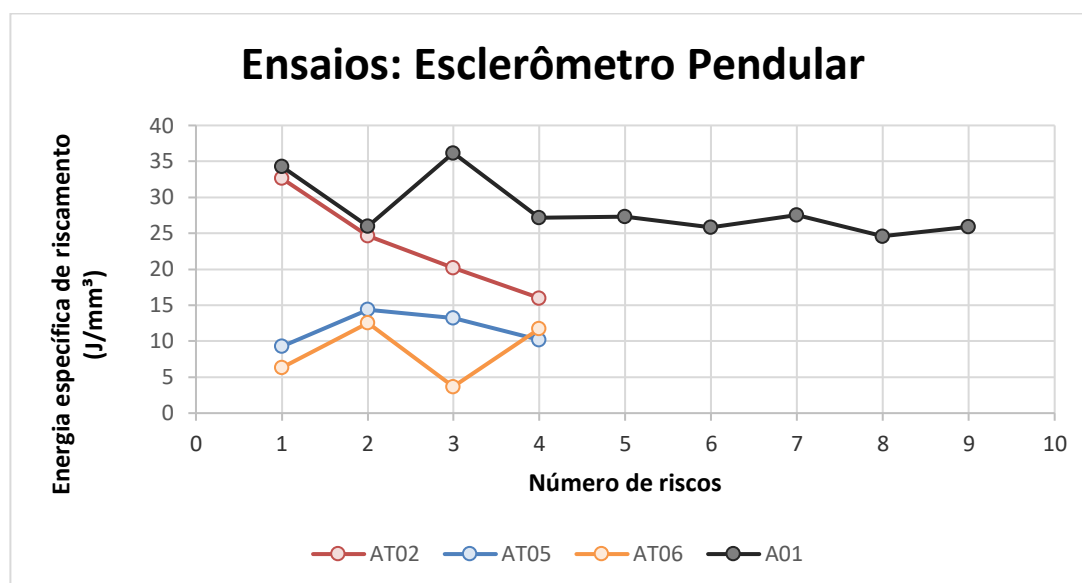
As figuras 37 e 38 abaixo exibem as energias dos ensaios de Charpy e de esclerometria pendular, respectivamente, para cada tipo de amostra. É possível verificar certa linearidade nas energias do ensaio Charpy e nas energias do esclerometro pendular é possível verificar principalmente na amostra A01 com maior número de riscos. Também há sincronismo entre os valores de mesmo material e que apresentam uma ordem de energias como esperado de maior energia as amostras de A01 para menor energia de A04, tanto de riscamento de esclerometria pendular quanto de tenacidade ao impacto dos ensaios Charpy, o que induz uma correlação entre as medidas.

Figura 37 – Energias dos ensaios de Charpy



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 38 – Energias dos ensaios de esclerometria pendular



Fonte: Elaborada pelo autor

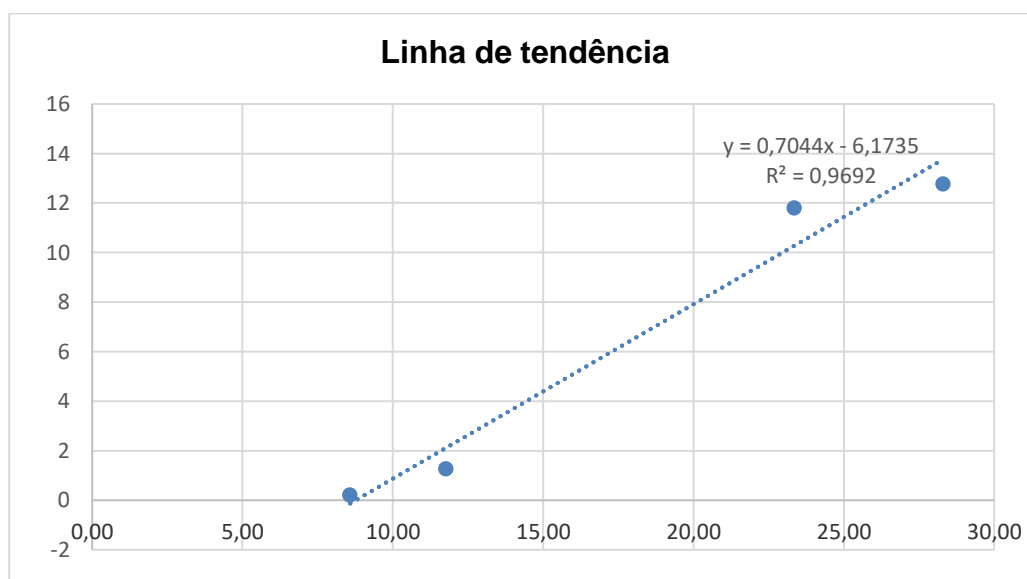
A tabela 7 abaixo apontam as médias de energias para os dois ensaios, assim como as variâncias e desvios padrão entre as médias das diferentes amostras obtidas para cada equipamento. Os valores de variâncias e desvio padrão entre as amostras são relativamente altos quando comparados com os valores obtidos em uma mesma amostra. Na figura 39 é exposta a linha de tendencia das médias da tabela 7, em que o eixo x apresentam os valores para as médias do esclerômetro pendular e o eixo y as médias do ensaio Charpy, e apesar de poucos pontos representados o gráfico demonstra certa linearidade entre eles e um sincronismo linear.

Tabela 7 – Médias, variâncias e desvios padrão de ambos os ensaios

Amostras	Média Esclerômetro	Média Charpy
A01	28,30	12,76
A02	23,36	11,8
A03	11,76	1,27
A04	8,58	0,2
Variância	65,61	33,59
Desvio Padrão	8,10	5,79

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 39 – Linha de tendência para médias das energias dos ensaios



Fonte: Elaborada pelo autor

Com o resultado dos gráficos gerados pelo ensaio utilizando o método Charpy (Fig. 37) bem como os ensaios de riscamento utilizando o esclerômetro pendular (Fig. 38) foi calculado o coeficiente de correlação e de determinação de Pearson entre ambos os ensaios, para identificação do sincronismo de comportamento e proporcionalidade entre os resultados de ambas as técnicas, mostrado na tabela 8. Nota-se uma forte correlação entre os métodos já que o valor é próximo de 1. Almeida Junior (2019) apresenta como poderia ser feita a interpretação do r^2 de forma prática: os valores $0,71 \leq r^2 \leq 1,00$ possuem uma dependência forte. Em termos práticos, pode-se afirmar, portanto, que para o caso das variáveis energia específica de riscamento e tenacidade ao impacto, mais de 96% da variabilidade obtida nos resultados de qualquer uma dessas variáveis pode ser explicada pela variabilidade da outra.

Tabela 8 – Coeficientes de Pearson

Coeficiente de correlação (r)	0,9845
Coeficiente de determinação (r^2)	0,9693

Fonte: Elaborada pelo autor

Com base nos resultados obtidos, observou-se que o ensaio de esclerometria pendular apresentou sensibilidade suficiente para diferenciar aços com microestruturas e propriedades mecânicas distintas. Além disso, houve uma excelente correlação entre os resultados de esclerometria pendular e ensaio de Charpy,

indicando que o método tem potencial para avaliação de tenacidade ao impacto em aços, com vantagens relevantes em relação aos métodos tradicionais.

5 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

O presente estudo permitiu chegar às seguintes conclusões:

- A energia específica de riscamento obtida pela técnica de esclerometria foi utilizada como parâmetro para correlacionar com valores de tenacidade ao impacto obtidos pelo ensaio de Charpy em amostras de aço SAE 1080 com quatro tipos de microestrutura, obtidas por meio da aplicação de tratamentos térmicos. Foi realizada uma comparação entre os ensaios de tenacidade ao impacto pelo método Charpy e riscamento utilizando a esclerometria pendular.
- Foi observada uma correlação entre os ensaios de tenacidade ao impacto pelo método de Charpy e a energia específica de riscamento pela técnica de esclerometria pendular aplicados a aços AISI 1080 em diferentes condições de tratamento térmico.
- O coeficiente de correlação de Pearson, a partir do teste de sincronismo linear, aponta uma forte correlação entre os métodos estudados. Desta forma, os aços laminados a frio com chapas finas, por exemplo, podem ter como alternativa os ensaios de esclerometria pendular para a obtenção da tenacidade ao impacto, de forma que poderia, em princípio, ser usado em situações de simulação de impacto de veículo automotivo de difícil previsão, nesse caso, dados confiáveis de tenacidade ao impacto são muito importantes para aplicação na indústria.

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se:

- A partir da forte correlação dos parâmetros avaliados pelas técnicas estudadas poderão ser iniciadas pesquisas mais aprofundadas visando a identificação dos mecanismos que explicam a correlação encontrada. Uma vez suficientemente compreendida em termos fenomenológicos, a relação encontrada poderá ser aplicada para dar subsídio ao

desenvolvimento e controle de qualidade de aços, apresentando como características interessantes a facilidade de execução, a utilização de corpos de prova pequenos e o baixo custo operacional, além de viáveis ensaios de riscamento em chapas finas sem complexidade.

- Pesquisar a correlação entre o esclerometro pendular e o ensaio Charpy utilizando mais ensaios e incluindo outros materiais como aços avançados de alta resistência.
- Pesquisar e buscar compreender a correlação encontrada, junto a variáveis testadas.
- Aplicar a correlação para a medição de tenacidade ao impacto a partir da esclerometria pendular, buscando desenvolvimento e controle de qualidade de aços e aplicar a esclerometria pendular para chapas com aços de alto desempenho.
- Aplicar a tenacidade ao impacto em função da temperatura, utilizando um sistema de controle de temperatura acoplado como criogenia.

6 Referências

AGBOOLA, O. O. et al. Optimization of heat treatment parameters of medium carbon steel quenched in different media using Taguchi method and grey relational analysis. **Heliyon**, v. 6, n. 7, p. e04444, 2020.

ALMEIDA JÚNIOR, Racine Peixoto de. **Análise da correlação dos ensaios de esclerometria e ultrassom com a resistência à compressão do concreto**. Fortaleza, CE: 2019. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil.

ANTOLOVICH, S. D.; SAXENA, A.; GERBERICH, W. W., Fracture Mechanics- An Interpretive Technical History. **Mechanics Research Communications**, v. 91, p. 46-86, 2018.

AQUINO, Isabella Pacífico. **Caracterização da superfície do aço-carbono ABNT 1008 revestida com organo-silanos por meio de técnicas eletroquímicas e físico-químicas**. São Paulo: 2006. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.

ARAUJO, L. A. DE. **Manual de Siderurgia**. 2. ed. São Paulo: Arte e Ciência, 2005. 470 p.

ARAÚJO NETO, A. P., et al., Avaliação De Esclerometria Pendular Em Compósitos Com Matriz De PTFE. *In*: CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 22., 2016, Natal, RN. **Anais** [...] Natal: metallum, 2016. p. 4454–4463.

ASKELAND, Donald R.; PHULÉ, Pradeep P. **The science and engineering of materials**. 5 ed. Austrália: Thomson Learning, 2006.

BANDEIRA, A. A. DE C. **Análise do uso de estruturas de aço em edificações habitacionais de interesse social**. Belo Horizonte, MG: 2008. 109 f. Monografia (Curso de Especialização) - Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia de Materiais e Construção.

BAPTISTA, C. **Ensaio de impacto e transição dúctil-frágil**. Universidade de

São Paulo. Escola de Engenharia de Lorena. 2016. Disponível em: <http://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/471420/LOM3011/EM_cap6_Impacto_2016.pdf>. Acesso em: 11 set. 2021.

BEZERRA, A. M. M., **Aperfeiçoamento de um esclerômetro pendular: projeto e execução**. 2022. 109 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

BHADESHIA, H. K. D.; HONEYCOMBE, R. W. K. **Steels Microstructure and properties**. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. 344 p.

BOEIRA, A. P.; BECK, Daniel. **Tecnologia dos materiais**. Passo Fundo, RS: 2007. 97 f. Curso Técnico em Mecânica Industrial. Centro Federal de Educação Tecnológica de Pelotas. Unidade de Ensino Passo Fundo.

BRISCOE, B. J., PELILLO, E., SINHA, S. K.. Scratch Hardness and Deformation Maps for Polycarbonate and Polyethylene. **Polymer Engineering and Science**, v. 36, n. 24, p. 2996-3005, 1996.

BRISCOE, B. J., SINHA, S. K. Scratch Resistance and Localized Damage Characteristics of Polymer Surfaces – a Review. **Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik**. v. 34, n. 10/11, p. 989-1002, 2003.

BRITO, Carlos Magno Gomes de. **Influência dos tratamentos térmicos de recozimento pleno e normalização na microestrutura e propriedades mecânicas de aços com baixo e alto teor de carbono**. Fortaleza, CE: 2017. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal do Ceará. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Curso de Engenharia Metalúrgica.

BRUNATTO, S. F. **INTRODUÇÃO AOS ESTUDOS DOS AÇOS**. 2016.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589 p.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de**

Materiais: Uma Introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018. 1014 p.

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, **Materiais avançados no Brasil 2010-2022.** Brasília, 2010.

CHIAVERINI, V. **Aços Ferros Fundidos.** 7. ed. São Paulo: ABM, 2008. 599 p.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns.** 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008. 652 p.

COPPERMETAL. **Ferro e Aço Carbono.** Disponível em: <<https://www.coppermetal.com.br/blog/aco-carbono/ferro-e-aco-carbono>>. Acesso em: 11 set. 2021.

COSIAÇO. **A História do Aço a Partir da Idade do Ferro.** Pinhais, PR, 1 out. 2016. Disponível em: <<https://www.cosiaco.com.br/blog/a-historia-do-aco-a-partir-da-idade-do-ferro/>>. Acesso em: 11 set. 2021.

DA LUZ, F. S., et al. Mechanical properties and microstructural characterization of a novel 316L austenitic stainless steel coating on A516 Grade 70 carbon steel weld. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 1, p. 636–640, 2020.

DIETER, G. E., **Metalurgia Mecânica.**, Editora Guanabara Dois S.A., segunda edição, 1981.

EMYGDIO, Guilherme Zeemann Pinho. **Relação microestrutura x tenacidade ao impacto de flanges forjados de aço C-Mn para trabalho em baixas temperaturas e efeitos de tratamentos térmicos.** Rio de Janeiro, RJ: 2012. 67 f. Projeto de graduação – UFRJ/Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Materiais.

FABRICIO, D. A. K. **Garantia Da Qualidade De Ensaios Mecânicos De Materiais Metálicos.** Porto Alegre, RS: 2015. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.

FINZI, M. B. D. A. F. et al. Avaliação De Fluidos De Corte Em Ensaios De Esclerometria Pendular. *In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, 9., 2016, Fortaleza. **Anais [...]** Fortaleza: ABCM, 2016.

FIGUEIREDO FILHO, D. B., SILVA JÚNIOR, J. A. da. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, v. 18, n. 1, p. 115-146, 2009.

FONSECA, M. H.; LUCENA JUNIOR, U. P.; LIMA, R. O. C. AVALIAÇÃO DE ESCLEROMETRIA PENDULAR EM COMPÓSITOS COM MATRIZ DE PTFE. **22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal, RN, Brasil**, n. 2, p. 4885–4895, 2016.

FRANCO, Sinésio Domingues. **Contribuição ao Estudo do Desgaste Abrasivo de Materiais Polifásicos**. Uberlândia, MG: 1989. 115 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia.

GARCIA; Amauri; SPIM; Jaime Alvares; SANTOS; Carlos Alexandre dos. **Ensaios dos materiais**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 384 p.

GERDAU, A. FINOS. **Manual de aços**. 2002.

GONÇALVES, R. A., et al., Determinação da dureza através da técnica esclerométrica - um método comparativo ao ensaio de dureza mohs. *In: Congresso Brasileiro de Cerâmica*, 43., 1999, Florianópolis. **Anais [...]** Florianópolis: ABCERAM, 1999. p. 26201-26211.

GOUVEIA, Kátia Cristina. **Investigação dos métodos de determinação da temperatura de transição dúctil-frágil (TTDF) utilizando ensaio de impacto charpy**. São Bernardo do Campo, SP: 2013. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Centro Universitário da FEI.

HECK, N. C. **Introdução à engenharia metalúrgica**. Porto Alegre, RS: 2009. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul. Escola de Engenharia. Departamento de Metalurgia.

HUTCHINGS, I. M.; SHIPWAY, P. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. 412 p.

IMIANOWSKY, G. W.; WALENDOWSKY, M. A. **Os principais aços carbono utilizados na construção civil**. Brusque, SC: 2017. 22 f. Centro Universitário de Brusque.

KIM, H *et al.* Interpretation of cryogenic-temperature Charpy fracture initiation and propagation energies by microstructural evolution occurring during dynamic compressive test of austenitic Fe–(0.4,1.0)C–18Mn steels. **Materials Science & Engineering A**. v. 641, p. 340–347, 2015.

LYDEN, S. **'Steel' Yourself for the Future of Truck Bodies**. Jacksonville, Fla, 4 set. 2012. Disponível em: <<https://www.worktruckonline.com/148238/steel-yourself-for-the-future-of-truck-bodies>>. Acesso em: 27 set. 2021.

METLER, R. F. **Tenacidade ao Impacto e Resistência a Fadiga de Aço API5L X70 Modificado ao Nb**. São Carlos, SP: 2016. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos.

MEYERS, M. A., CHAWLA K. K.; **Princípios de metalurgia mecânica**. São Paulo, Brasil: Edgard Blücher, 1982.

MORAES, Juliano Oséias. **Avaliação da Resistência ao Desgaste Abrasivo de Risers Flexíveis – Proposição de uma Nova Metodologia de Teste**. Uberlândia, MG: 2005. 40 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Mecânica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

MORAIS, W. A. de, et al. Descrição da Tenacidade por Impacto Charpy ao Redor de Juntas Soldadas de Aço Estrutural e Simulação de suas Curvas Dinâmicas Força x Tempo. **Unisanta Science and Technology**. v. 9, n. 1, p. 10-20, 2020.

MORO, N., AURAS, A. P. **Processos de Fabricação - Fundição**. Florianópolis, SC: 2007. 29 f. Centro Federal De Educação Tecnológica De Santa Catarina. Gerência Educacional De Metal Mecânica. Curso Técnico De Mecânica Industrial.

NORMA ASTM A370/ ASME A-730, 2004. **ASTM A370 / ASME SA-370ASTM International.**

NOLDIN JÚNIOR, José Henrique. **Contribuição ao estudo da cinética de redução de briquetes auto-redutores.** Rio de Janeiro: 2002. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento De Ciência dos Materiais e Metalurgia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica.

OLIVEIRA, Gabriel Almeida. **Análise da cinética da transformação isotérmica a 665 °C e caracterização eos seus efeitos na microestrutura e na dureza do aço sae 1080.** Fortaleza, CE: 2019. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Ceará. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

PURQUERIO, B.M.; FORTULAN, C. A. **Projeto mecânico: Tribologia – atrito / desgaste.** São Carlos, SP: 2016. 56 f. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos.

RASMA, E. T. **Caracterização estrutural e mecânica do aço aisi/sae 4140 tratado sob diferentes tratamentos térmicos.** Campos dos Goytacazes, RJ: 2015. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade estadual do Norte Fluminense. Centro de Ciência e Tecnologia. Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais.

ROYLANCE; D.; **Introduction to Fracture Mechanics.** Cambridge, USA: 2001. 17 f. Massachusetts Institute of Technology. Class Lecture, Department of Material Science and Engineering.

RUCHERT, C. O. F. T. **Aços e Ferros Fundidos. São Paulo: Editora Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais–ABM,** 2016. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2125206/mod_resource/content/1/LOM302-2-MIQ-4-AÇOS E FERROS FUNDIDOS Mod Cassius.pdf>. Acesso em: 19 set. 2021.

SALWIPA. **Quanto custa bater o carro? Para a Volkswagen, cerca de R\$ 400 mil a cada crash test.** Disponível em:

<<https://www.salwipa.com.br/noticias/ver/13/quanto-custa-bater-o-carro-para-a-volkswagen-cerca-de-r-400-mil-a-cada-crash-test>>. Acesso em: 28 nov. 2022.

SILVA, A. L. DA C.; MEI, P. R. **Acos e Ligas Especiais**. 2. ed. Sumaré, SP: Eletrometal S.A. Metais Especiais, 1988. 512 p.

SCHON, Cláudio Geraldo. **Mecânica dos Materiais: Apostila redigida para uso nos cursos “PMT2405- Mecânica dos Materiais” e “PMT5860- Teoria da plasticidade e da fratura dos materiais”**. 4. ed. São Paulo, SP: C. G. Schon, 2009. 364 p.

SLAUGHTER, C.; GOLDENSTEIN, H. A Lenda Da Espada De Damasco- História E Tecnologia. **Tecnol. Metal. Mater. Miner.** v. 11 n. 2, p. 155–162, 2014.

SOUSA, F. J. P. et al. Evaluation of abrasive wear of ductile cast iron in a single pass pendulum device. **Measurement**, v. 39, n. 2006, p. 594–604, 2009.

SOUSA, F. J. P. et al., Evaluation of measurement uncertainties for a scratching tester. **Journal of the International Measurement Confederation**. v. 39, n. 7, p. 594-604, 2006.

SOUSA, F. J. P. et al., Influência do ângulo de arraste na dureza ao risco de materiais dúcteis. *In*: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – Cobef, 3., 2005, Joinville, SC. **Anais** [...] Joinville: Ensaio, 2005. p. 72-83.

SOUZA, S. A., **Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos, Fundamentos Teóricos e Práticos**. 5ª Edição, Editora EDGRAD BLUCHER LTDA, 1982.

TEIXEIRA, Leone Braga. **Efeito do Tratamento Criogênico nas Propriedades Mecânicas e Estruturais do Aço SAE 4340**. Brasília, DF: 2017. 54 f. Dissertação - Universidade de Brasília. Faculdade UnB Gama. Engenharia Automotiva.

TSCIPTSCHIN, A. P.; GARZÓN, C. M.; LOPEZ, D. M. Efeito do nitrogênio na usinabilidade do aço inoxidável austenítico: uma avaliação utilizando a técnica da esclerometria pendular instrumentada. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 60, n. 1, p. 75–82, 2007.

TSCHIPTSCHIN, André Paulo. Tipos de Aço e sua Classificação – normas SAE/AISI/ABNT. **Gerdau Website**, São Paulo, 18 mar. 2020. Disponível em: <<https://www2.gerdau.com.br/blog-do-aco/acos-especiais/tipos-de-aco-e-sua-classificacao-normas-sae-aisi-abnt/>>. Acesso em: 15 ago. 2021.

WZPPGI. **Para que serve o aço laminado a frio?**. Disponível em: <<https://wzppgi.com/pt/what-is-cold-rolled-steel-used-for/>>. Acesso em: 28 nov. 2022.