



UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

MARIA RITA ARAÚJO DE ALMEIDA

**AVALIAÇÃO DA TENACIDADE AO IMPACTO DE UM AÇO SAE 1644 SUBMETIDO
A TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTAÇÃO**

MARABÁ-PA

2017

MARIA RITA ARAÚJO DE ALMEIDA

AVALIAÇÃO DA TENACIDADE AO IMPACTO DE UM AÇO SAE 1644 SUBMETIDO A
TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTAÇÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais. Orientador: Prof. Márcio Paulo de Araújo Mafra.

MARABÁ-PA

2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Biblioteca II da UNIFESSPA. CAMAR, Marabá, PA

Almeida, Maria Rita Araújo de

Avaliação da tenacidade ao impacto de um aço SAE 1644 submetido a tratamento termoquímico de cementação / Maria Rita Araújo de Almeida; orientador, Márcio Paulo de Araújo Mafra. — 2017.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Materiais, Curso de Engenharia de Materiais, Marabá, 2017.

1. Aço – Tratamento térmico. 2. Aço - Metalurgia. 3. Cementação. I. Mafra, Márcio Paulo de Araújo, orient. II. Título.

CDD: 23. ed.: 672.36

MARIA RITA ARAÚJO DE ALMEIDA

**AVALIAÇÃO DA TENACIDADE AO IMPACTO DE UM AÇO SAE 1644 SUBMETIDO
A TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia de Materiais da
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
em cumprimento as exigências para obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

DATA DA AVALIAÇÃO:

CONCEITO: _____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Márcio Paulo de Araújo Mafra
ORIENTADOR – UNIFESSPA – IGE – FEMAT

Prof. Dr. Elias Fagury Neto
MEMBRO – UNIFESSPA – IGE – FEMAT

Prof. Carlos Vinícius de Paes Santos
MEMBRO EXTERNO - IFPA

Dedico este trabalho as pessoas que sempre me apoiaram e incentivaram a seguir meus sonhos, e fizeram de mim o que sou hoje. Meus pais Rômulo Francisco de Almeida e Lucimar da Silva Araújo de Almeida. Uma dedicatória especial ao meu exemplo de vida (que infelizmente não se encontra mais entre nós) Ramiro Francisco de Almeida, meu avô.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida, por me sustentar nas diversas adversidades pelas quais passei, sem Ele eu não seria ninguém e nada disso estaria acontecendo.

Agradeço aos meus pais Rômulo Francisco de Almeida e Lucimar da Silva Araújo de Almeida meus dois amores, as duas pessoas que fizeram e fazem de tudo por mim, sempre dei muito trabalho e dor de cabeça aos dois com os meus constantes problemas de saúde e vocês estavam sempre lá por mim, me deram uma excelente educação, uma família linda, obrigada por tudo.

Os meus irmãos João Paulo Araújo de Almeida e Rômulo Ancelmo Araújo de Almeida, apesar das nossas brigas amo muito os dois.

Aos meus familiares que direta ou indiretamente me ajudaram durante esses 5 anos de faculdade, vocês são parte dessa conquista.

Quero agradecer ao meu orientador e professor Márcio Paulo de Araújo Mafra, pela paciência, amizade, companheirismo e dedicação. Durante esses 5 anos me ajudou e orientou de diversas maneiras, serei eternamente grata.

A todos os professores da Faculdade de Engenharia de Materias por contribuírem na minha formação acadêmica.

Agradeço ao Everthon Lima de Oliveira uma das pessoas mais importantes da minha vida, que apesar de tudo me ajudou a ser uma pessoa melhor. Você vai estar pra sempre no meu coração.

Aos meus amigos que conheci na universidade e fizeram dessa jornada mais leve e alegre, Samara Alves, Pamella Bianca, Dayane Antunes, Wilker Oliveira, Paulo Cesar, Hilbenária Mercedes, Fiama Costa, Wirland Melo, sem vocês não teria graça. Muito obrigada.

A minha amiga de longa data Adrielly Tayana, obrigada por tudo.

Queria agradecer à Vitória Haidar, por tudo o que fez e fazes por mim, mesmo com a distância você me ajudou e apoiou de todas as formas possíveis, você ta no meu coração.

Quero fazer um agradecimento especial ao meu avô Ramiro Francisco de Almeida, como eu queria que o Senhor estivesse aqui, sempre me apoiou e confiou em mim e na minha capacidade. Você se foi muito cedo, mas eu sei que o Senhor ta orgulhoso de mim,

saibas que nunca vou te esquecer e nada disso seria possível sem a sua batalha pra dar a família Almeida condições melhores de vida. Eu te amo!

E agradeço a todas pessoas que de alguma maneira fizeram parte dessa caminhada.

E acrescentou: "Seja forte e corajoso! Mãos ao trabalho! Não tenha medo nem desanime, pois Deus, o Senhor, o meu Deus, está com você. Ele não o deixará nem o abandonará até que se termine toda a construção do templo do Senhor.

1 Crônicas 28:20

RESUMO

Sendo um dos produtos mais versáteis do mundo, o aço é utilizado desde embalagens de alimentos até na fabricação de grandes estruturas da construção civil ou naval. O presente trabalho faz um estudo sobre a tenacidade do aço SAE 1644, um aço que é pouco conhecido e estudado. Este foi analisado após ser submetido a tratamentos termoquímicos de cementação, e tratamento térmico pós cementação (têmpera e revenido), com temperatura fixa e tempo variável, foram analisadas 6 (seis) condições diferentes de pós-tratamento termoquímico. Para as análises experimentais, foram confeccionados 15 corpos de provas para o ensaio de impacto com as dimensões definidas pela norma internacional ASTM E23-94 e 05 amostras de aproximadamente 30 mm de comprimento por 20 mm de largura e 10 mm de espessura, para ensaio de dureza e metalografia. Foram realizadas análises das imagens metalográficas das amostras com tratamento e sem o tratamento termoquímico, para verificar a mudança da microestrutura para posteriormente, avaliar a resistência mecânica através do ensaio de impacto e dureza. Após as avaliações dos resultados de impacto e dureza do aço SAE 1644, os resultados apresentados mostraram-se bastante interessantes, principalmente os observados na condição 3.

PALAVRAS CHAVES: Aço 1644, tratamento termoquímico, tratamento térmico, cementação, tenacidade ao impacto.

ABSTRACT

Being one of the most versatile products in the world, steel is used from food packaging to a manufacturing of large building constructions or naval. The present work does a study on a steel tenacity SAE 1644, a steel that is little known studied. This was analyzed after being submitted to thermochemical treatments of cement, with post-cement heat treatment, with fixed temperature and variable time, 6 different conditions of post-thermochemical treatment were analyzed. For the experimental analyzes, 15 test bodies for impact tests with dimensions defined by the international standard ASTM E23-94 and 05 samples of approximately 30 mm long by 20 mm wide and 10 mm thick were prepared for the test of Hardness and metallography. Analyzes of the metallographic images of the samples with treatment and without the thermochemical treatment were carried out, to verify the change of the microstructure for the purpose, to evaluate the mechanical resistance through the impact test and hardness. After evaluating the results of the impact and the hardness of the steel, the results were very interesting, especially those observed in condition 3.

KEYWORDS: 1644 steel, thermochemical treatment, heat treatment, bonding, impact toughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Diagrama de Fase Ferro-Carbeto de ferro (Fe-Fe ₃ C).	21
Figura 2 -Transformações alotrópicas e características geométricas do ferro puro.	24
Figura 3 - Efeito do fósforo na ductilidade do aço.....	28
Figura 4 - Ação relativa na dureza do aço de alguns elementos de liga.....	29
Figura 5 - Representação esquemática do tratamento térmico de têmpera.....	32
Figura 6 - Representação esquemática de um microscópio óptico.	37
Figura 7 - Etapas do processo de ensaio de dureza.	39
Figura 8 - Representação esquemática do ensaio de impacto.....	40
Figura 9 - Fluxograma da metodologia. utilizada.	42
Figura 10 - Corpo de prova para o ensaio de impacto.	44
Figura 11 - Corpos de prova para ensaio de impacto.	45
Figura 12 - Caixa metálica utilizada no tratamento.....	47
Figura 13 - Amostras distribuídas sobre a camada de coque de injeção.	48
Figura 14 - Peças já cobertas com camadas de coque de injeção e sílica.	49
Figura 15 - Termopar usado no processo de cementação.....	50
Figura 16 - Amostras dentro do forno.	50
Figura 17 - Durômetro de bancada utilizado.....	53
Figura 18 - Máquina de ensaio de impacto utilizada.	54
Figura 19 - Micrografia observada do aço SAE 1644 antes dos tratamentos, ataque Picral 4%, com aumento de (a) 100x (b) 200x.....	57
Figura 20 - Micrografia observada do aço SAE 1644 pós-tratamento termoquímico, ataque Picral 4%, com aumento de (a) 100x (b) 200x. Condição 3.....	57
Figura 21 - Média e Desvio Padrão de Dureza.	61
Figura 22 - Média e Desvio Padrão da Tenacidade.	61
Figura 23 - Gráfico de Dureza x Tenacidade.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Código SAE.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 2 - Composição química do aço SAE/AISI 1644.....	31
Tabela 3 - Distribuição das amostras e dos tratamentos.....	46
Tabela 4: Proporção dos elementos na cementação.	46
Tabela 5 - Distribuição das amostras para ensaio de dureza e metalografia.	52
Tabela 6 - Análise química do aço SAE 1644 realizada por espectrometria de emissão ótica (THERMO).	55
Tabela 7 - Análise química do aço SAE 1644 pós-tratamento realizada por espectrometria de emissão ótica (THERMO).	56
Tabela 8 - Média e desvio padrão de dureza.....	59
Tabela 9 - Média e desvio padrão da tenacidade.	60

LISTA DE EQUAÇÕES

L (líquido) + δ (ferrita delta) \rightarrow γ (austenita); (Equação 1)	22
L (líquido) \rightarrow γ (austenita) + Fe ₃ C (cementita); (Equação 2)	22
γ (austenita) \rightarrow α (ferrita) + Fe ₃ C (cementita); (Equação 3)	22
(Equação 4)	35

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1-	OBJETIVO	18
1.1.1.	Objetivo geral	18
1.1.2.	Objetivo específico	18
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1.	AÇOS	19
2.1.1.	Definição	19
2.1.2.	Nomeclatura dos aços	Erro! Indicador não definido.
2.1.3.	Diagrama Ferro-Carbono (Fe-Fe₃C)	20
2.1.4.	Transformações de fase	25
2.1.5.	Efeito das impurezas	25
2.1.5.1.	Manganês	27
2.1.5.2.	Fosforo	27
2.1.6.	Elementos de liga	28
2.1.7.	Aço SAE 1644	30
2.2.	TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇO	31
2.2.1.	Têmpera	31
2.2.2.	Revenido	33
2.3.	TRATAMENTO TERMOQUÍMICO	35
2.3.1.	Cementação	35
2.4.	ANÁLISE METALOGRAFICA	36
2.4.1.	Microscopia óptica	36
2.5.	PROPRIEDADES MECÂNICAS	37
2.5.1.	Ensaio de dureza	37
2.5.2.	Dureza por risco	38
2.5.3.	Dureza por choque	38
2.5.4.	Dureza por penetração	38
2.5.5.	Ensaio de impacto	39
3.	METODOLOGIA	41
3.1.	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	43
3.2.	TRATAMENTO TERMOQUÍMICO	45

3.2.1. Cementação	46
3.3. TRATAMENTO TÉRMICO	51
3.3.1. Têmpera	51
3.3.2. Revenido	51
3.4. ANÁLISE QUÍMICA	51
3.5. ENSAIO DE DUREZA	52
3.6. ENSAIO DE IMPACTO	53
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1.1. Análise química	55
4.1.2. Análise metalográfica	56
4.1.3. Análise de impacto	58
5. CONCLUSÕES	63
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

CAPITULO I

1. INTRODUÇÃO

O aço é um dos produtos mais versáteis do mundo, sendo utilizado desde embalagens de alimentos até na fabricação de grandes estruturas da construção civil ou naval. A vasta utilização desse material mundo a fora se deve a sua versatilidade no que se referem as suas propriedades mecânicas, isso aliado ao seu baixo custo quando comparado a outros materiais metálicos. Há muitos séculos atrás o homem descobriu que com aquecimento e resfriamento podia modificar as propriedades mecânicas de um aço, isto é, torná-los mais duro, mais mole, mais maleável, etc. Mais tarde, descobriu também que a rapidez com que o aço era resfriado e a quantidade de carbono que possuía influía decisivamente nessas modificações [1].

Os tratamentos termo-químicos visam o endurecimento superficial dos aços, pela modificação parcial da sua composição química nas secções que se deseja endurecer. A aplicação de calor em meio apropriado pode levar a essa alteração da composição química do aço até uma profundidade que depende da temperatura de aquecimento e do tempo de permanência a temperatura de tratamento em contato com o meio em questão. A modificação parcial da composição química, seguida geralmente de tratameto térmico apropriado, produz também uma alteração na estrutura do material, resultando, em resumo uma modificação igualmente parcial das propriedades mecânicas. O objetivo principal é aumentar a dureza e a resistência ao desgaste superficial, ao mesmo tempo que o núcleo do material permanece dúctil e tenaz [2].

Essa probabilidade de se aliar uma superfície dura com um núcleo mais mole e tenaz é de grande importância em inúmeras aplicações, sobretudo porque, pelo emprego de aços com elementos de liga, pode-se conseguir núcleo de elevada resistência e tenacidade, com superfície extremamente dura, resultando num material capaz de suportar em alto grau certos tipos de tensões [2].

O processo clássico de endurecimento superficial é a cementação, isto é, o enriquecimento superficial de carbono de certos aços, aquecidos convenientemente em contato com substâncias carbonáceas [2].

O propósito do seguinte trabalho tinha como objetivo a avaliação da tenacidade ao impacto de um aço raramente produzido, o aço SAE 1644, visando a obtenção de

suas propriedades características, por meio de ensaio de dureza e impacto e análises microestruturais e químicas.

1.1- OBJETIVO

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho foi a avaliação da tenacidade ao impacto de um aço SAE 1644 após tratamento termoquímico de cementação.

1.1.2. Objetivo específico

Analisar o efeito do tratamento termoquímico de cementação e tratamentos térmicos (têmpera e revenido) pós cementação na microestrutura e propriedades mecânicas do aço SAE 1644.

Analisar metalograficamente através das imagens feitas com o microscópio óptico as amostras tratadas e não tratadas termoquímicas, para verificar a mudança da microestrutura.

Avaliar a resistência mecânica do aço SAE 1644 através dos ensaios de Impacto (Ensaio de Charpy) e dureza das amostras tratadas e não tratadas termoquímicas.

CAPITULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. AÇOS

2.1.1. Definição

O aço é uma liga de natureza relativamente complexa e sua definição não é simples, visto que, a rigor os aços comerciais não são ligas binárias. De fato, apesar dos seus principais elementos de liga serem o ferro e o carbono, eles contêm sempre outros elementos secundários, presentes devido aos processos de fabricação. Nestas condições, a definição adotada nesta obra é a seguinte:

“Aço é liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação”. Nessas condições será necessário, para se ter uma definição mais precisa, considerar dois tipos fundamentais de aço [2].

-aço-carbono ou “liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até cerca de 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais resultantes dos processos de fabricação” [2];

O aço-carbono pode ser subdividido em:

- Aços de baixo teor de carbono, com C inferior a 0,2%;
- Aços de médio carbono, com C entre 0,2 e 0,5%;
- Aços de alto teor de carbono, com C acima de 0,5%.

-aço-liga ou “aço-carbono que contém outros elementos de liga ou apresenta os elementos residuais em teores acima dos que são considerados normais”.

Os aços liga, podem ser divididos em 2 grupos:

- Aços de baixo teor de ligas, com elementos de liga abaixo de 8%;
- Aços de alto teor de ligas, com elementos de liga acima de 8% [2].

A versatilidade dos aços como materiais de engenharia é evidenciada pelos muitos tipos de aços que são fabricados. Num extremo, os aços podem ser muito macios, próprios para estampagens profundas como as utilizadas na fabricação de

para-lamas de automóveis e painéis de uso doméstico. Por outro lado, podem ser extremamente duros e resistentes, empregados na produção de engrenagens e escavadeiras. Alguns aços devem possuir uma excepcional resistência a corrosão [5].

Aços para certas aplicações elétricas, como por exemplo, placas de transformadores, devem ter características especiais de modo a poderem ser magnetizados e desmagnetizados muitas vezes a cada segundo, com pequena perda de potência. Outros já devem ser completamente não-magnéticos, como os aplicados em relógios de pulso e detectores de minério. Os diagramas de fase podem ser usados para auxiliar no entendimento de cada uma das características citadas [5].

2.1.2. Diagrama Ferro-Carbono (Fe-Fe₃C)

Os diagramas de fase ou diagramas de equilíbrio como também são denominados têm como finalidade mostrar alterações de estado físico e de estrutura que sofrem as ligas metálicas, em decorrência de aquecimentos ou resfriamentos lentos.

O diagrama de fases Ferro-Carbono é obviamente o diagrama mais estudado entre todas as ligas metálicas presentes na atualidade, fato facilmente explicado já que os aços carbono, além de serem os materiais metálicos mais utilizados pelo homem, apresentam variadas e interessantes transformações no estado sólido. O estudo do diagrama de fases permite-nos compreender porque variações do teor de carbono nos aços resultam na obtenção de diferentes propriedades, e dessa maneira, possibilitam a fabricação de aços de acordo com propriedades desejadas [7].

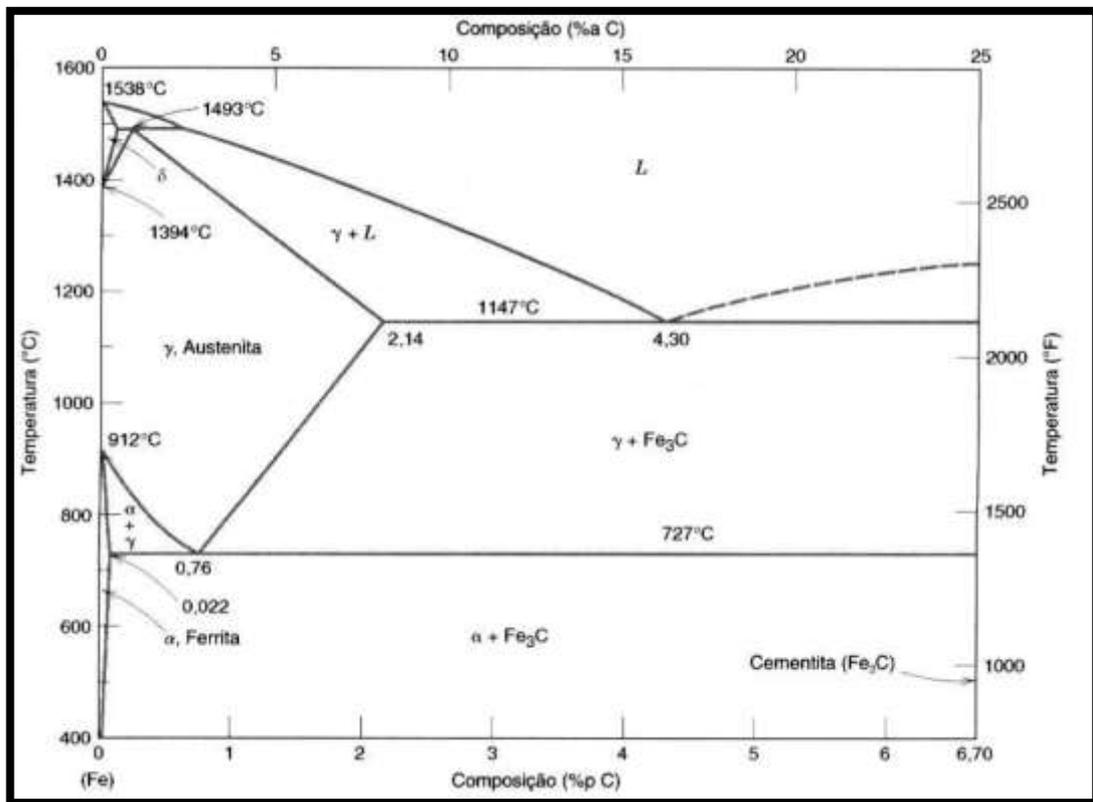
O diagrama pode ser dividido em duas faixas de porcentagem de carbono, a faixa correspondente aos aços, de 0,008% até 2,11% de C, e a faixa correspondente aos ferros fundidos, com porcentagens de carbono acima de 2,11%. Os aços com porcentagem de carbono acima de 0,8% (composição eutetóide) são denominados aços hipereutetóides, enquanto que os aços com porcentagem de carbono inferior a 0,8% são denominados aços hipoeutetóides. Analogamente, os ferros fundidos com porcentagem de carbono acima de 4,3% (composição eutética) são denominados ferros fundidos hipereutéticos, e os ferros fundidos com porcentagem de carbono inferior a 4,3% são denominados ferros fundidos hipoeutéticos [7].

Os aços carbono podem ainda ser divididos em três grupos distintos, classificados em função do teor de carbono presente. São eles:

- Aços de baixo teor de carbono, com % de C inferior a 0,2%;
- Aços de médio teor de carbono, com % de C entre 0,2% e 0,5%;
- Aços de alto teor de carbono, com % de C superior a 0,5%.

Deve-se ressaltar que o diagrama Fe-C é um diagrama dependente somente da temperatura e da porcentagem de carbono, e as transformações microestruturais que ocorrem sob aquecimento e resfriamento lentos são transformações ditas de equilíbrio. Para transformações rápidas o suficiente a ponto de evitar as transformações de equilíbrio estuda-se um diagrama distinto, o diagrama TTT(tempo-temperatura-transformação) [7].

Figura 1- Diagrama de Fase Ferro-Carbeto de ferro (Fe-Fe₃C).



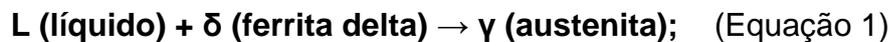
Fonte: [8]

O ferro puro ao ser aquecido passa por duas transformações até a sua total fusão. O ferro a temperatura ambiente (25°C), ou seja, o ferro puro (isento de carbono) apresenta-se até 912°C sob a forma alotrópica alfa (α) (ou ferrita) e acima de 912°C até 1354°C no estado alotrópico (γ) (ou austenita). Essas formas alotrópicas se caracterizam por possuírem reticulados cristalinos diferentes para os átomos de ferro:

o ferro α possui reticulado cúbico de corpo centrado (CCC) e o ferro γ possui reticulado cúbico de face centrada (CFC).

O carbeto de ferro ou cementita é formado em uma concentração de 6,70%p C. Dessa maneira podemos dividir o diagrama de fase em duas partes, sendo a primeira com a composição rica em ferro que vai até 6,70%p C e a segunda parte para composição que varia de 6,70%p C até 100%p C (grafita pura).

Existem três pontos invariantes muito importantes no diagrama de fase: o peritético, o eutético e o eutetóide. A reação peritética encontra-se a uma temperatura de 1493°C e a 0,17%C, no resfriamento ocorre a seguinte transformação [1,3]:



Já a reação eutética a temperatura é de 1148°C e a 4,3% de C, no resfriamento ocorre a seguinte transformação:



E por fim, temos a reação eutetóide a uma temperatura de 727°C e 0,77% de C, no resfriamento teremos a seguinte transformação [1].



Outro aspecto importante do diagrama de fase está relacionado ao controle dos procedimentos dos tratamentos térmicos é o desenvolvimento da microestrutura, a microestrutura determinar as propriedades físicas e o comportamento do material [1].

O ferro puro tem alterada sua estrutura cristalina duas vezes antes de se fundir, passando de CCC para CFC a 912 °C (1673 °F), no aquecimento. Mais acima essa alteração é revertida a 1394 °C (2540 °F). A variedade alotrópica CCC permanece estável até a fusão do ferro a 1538 °C (2800 °F) [3].

Ferrita, ou ferro – α : A configuração estrutural do ferro puro à temperatura ambiente é denominada, alternativamente, ferro – α ou ferrita. A ferrita é uma fase dúctil apresentando dureza e resistência mecânicas baixas; com a pureza comercialmente

encontrada, sua resistência à tração é menor que 310 MPa (45.000 psi). É um material ferromagnético a temperaturas inferiores a 770 °C (1418 °F) [3, 11].

Como a ferrita tem uma estrutura cúbica de corpo centrado, os interstícios são pequenos e pronunciadamente alongados, não podendo acomodar com facilidade nem mesmo um pequeno átomo esférico de carbono. Desta forma, a solubilidade de carbono na ferrita é muito baixa (< 1 átomo de carbono para 1000 átomos de ferro), assim o átomo de carbono é pequeno demais para uma solução sólida substitucional e muito grande para uma solução sólida intersticial extensa [3].

Austenita, ou ferro – γ : A configuração de face centrada do ferro é denominada austenita, ou ferro – γ . É a forma estável do ferro puro a temperaturas entre 912 °C e 1394 °C. É difícil comparar as propriedades mecânicas entre ferrita e austenita porque isto teria que ser efetuado para temperaturas diferentes. Contudo pode-se dizer que nas temperaturas de sua estabilidade, a austenita é macia e dúctil, sendo conseqüentemente bastante proveitosa aos processos de fabricação. Na maioria das operações de laminação e forjamento de aços é conduzida a temperaturas iguais ou superiores a 1100 °C (2000 °F), quando então o ferro é cúbico de face centrada. A austenita não é ferromagnética qualquer que seja a temperatura [3].

A estrutura cúbica de face centrada do ferro tem espaçamentos interatômicos maiores que os da ferrita. Mesmo assim, os vazios naturais da estrutura CFC são escassamente longos o suficiente para aglomerar átomos de carbono nos interstícios e este aglomerado introduz deformações na estrutura. Desta forma nem todos os vazios podem ser preenchidos num só tempo (\approx 6% a 912 °C). A solubilidade do carbono é maior na austenita podendo chegar a 2,04% a 1146 °C, sendo que sua solubilidade máxima é de somente 2,11% (9% atômicos) em peso de carbono. Por definição, os aços contêm menos de 1,2% de carbono, desta forma, a altas temperaturas, os aços têm seu carbono inteiramente dissolvido na austenita [3, 11].

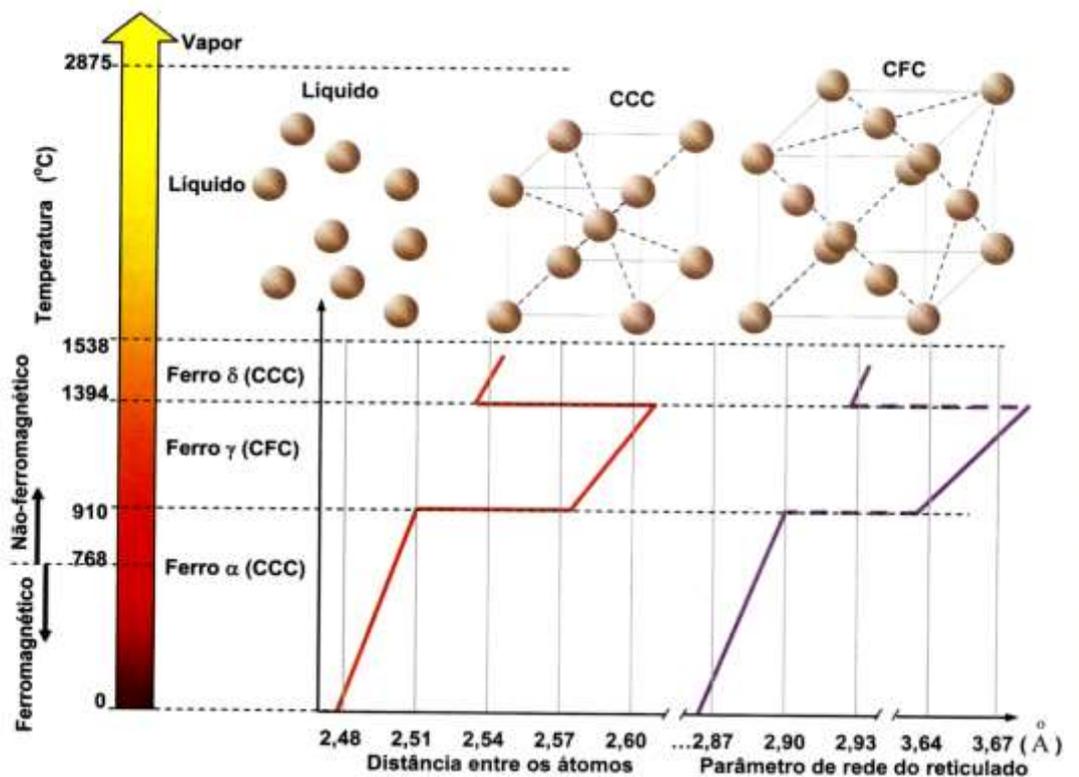
Ferro – δ : Acima de 1394 °C (2540 °F), a austenita não é mais, a longo alcance, a forma estrutural mais estável do ferro, uma vez que volta a prevalecer a configuração cúbica de corpo centrado, agora denominado ferro – δ . Ela é idêntica ao ferro – α , exceto quanto a faixa de temperatura s, e pela semelhança, é normalmente chamada de ferrita – δ . A solubilidade do carbono nessa estrutura é apreciavelmente maior que na ferrita – α , como decorrência das típicas temperaturas elevadas, tendo como limite máximo de solubilidade de 0,09% a 1492 °C [3, 11].

Carbeto de ferro (cementita): Nas ligas ferro carbono, o carbono que excede o limite de solubilidade deve formar uma segunda fase, mais comumente o carbeto de ferro, que possui composição química do Fe_3C . Isso não significa que o carbeto de ferro forme moléculas de Fe_3C , mas, simplesmente, que o reticulado cristalino contém átomos de ferro e de carbono numa proporção de 3 para 1, respectivamente. O Fe_3C tem uma célula unitária ortorrômbica com 12 átomos de ferro e 4 átomos de carbono por célula e, portanto, um conteúdo de 6,7% de carbono em peso [3, 11].

Comparativamente à austenita e à ferrita, a cementita é muito dura. A presença de carbeto de ferro na ferrita dos aços aumenta grandemente a resistência mecânica. Entretanto sendo o carbeto de ferro puro, não dúctil, não consegue se ajustar diante de concentrações de tensão; logo é relativamente frágil em si mesmo [3].

A figura 2 mostra as transformações alotrópicas e algumas características do ferro puro.

Figura 2 -Transformações alotrópicas e características geométricas do ferro puro.



Fonte: [3]

2.1.3. Transformações de fase

Uma variedade de transformações de fases é importante no processamento de materiais, geralmente envolvendo alguma mudança na microestrutura. Para os objetivos dessa discussão, essas transformações estão divididas em três classificações. Em um grupo estão as transformações simples, dependentes de um processo de difusão, onde não existe qualquer alteração, quer no número quer na composição das fases presentes. Essas transformações incluem a solidificação de um metal puro, as transformações alotrópicas, e a recristalização e o crescimento do grão [3].

Em outro tipo de transformação que também depende da difusão, existe alguma alteração nas composições das fases e, com frequência, também no número de fases presentes; geralmente, a microestrutura final consiste em duas fases. O terceiro tipo de transformação é independente da difusão e na qual se produz uma fase metaestável.

Com as transformações de fases, normalmente pelo menos uma nova fase é formada, a qual possui características físicas/químicas diferentes e /ou uma estrutura diferente daquela da fase que a originou. Além disso, a maioria das transformações de fases não ocorre instantaneamente. Em vez disso, elas começam pela a formação de numerosas partículas pequenas da(s) nova(s) fase(s), as quais aumentam em tamanho até que a transformação tenha terminado. O progresso de uma transformação de fases pode ser dividido em dois estágios distintos: **nucleação** e **crescimento**.

A nucleação envolve o surgimento de partículas, ou núcleos, muito pequeno da nova fase (que consistem, com frequência, em apenas umas poucas centenas de átomos), que são capazes de crescer. Durante o estágio de crescimento, esses núcleos aumentam em tamanho, o que resulta no desaparecimento de parte ou de toda fase original. A transformação atinge o seu final se for permitido que o crescimento dessas partículas da nova fase prossiga até que uma fração de equilíbrio seja alcançada [3].

2.1.4. Efeito das impureza

Os aços contêm em sua composição alguns elementos além do carbono. As impurezas, como o manganês, o silício, o fósforo, o enxofre e o alumínio fazem parte das matérias-primas usadas no processo de produção do aço. Elas podem estar presentes no minério ou ser adicionadas para provocar alguma reação química desejável, como a desoxidação, por exemplo [9].

A introdução de elementos de liga nos aços-carbono é feita com o objetivo de se conseguir um ou mais dos efeitos descritos a seguir:

- a) Aumentar a dureza e a resistência mecânica;
- b) Conferir resistência uniforme através de toda a seção em peças de grandes dimensões;
- c) Diminuir o peso (em consequência do item a), de modo a reduzir a inércia de uma parte;
- d) Em movimento ou reduzir a carga-morta em um veículo ou em uma estrutura;
- e) Conferir resistência à corrosão;
- f) Aumentar a resistência ao calor;
- g) Aumentar a resistência ao desgaste;
- h) Aumentar a capacidade de corte;
- i) Melhorar as propriedades elétricas e magnéticas.
- j) Diminuir o peso (em consequência do item a), de modo a reduzir a inércia de uma parte;
- k) Em movimento ou reduzir a carga-morta em um veículo ou em uma estrutura;
- l) Conferir resistência à corrosão;
- m) Aumentar a resistência ao calor;
- n) Aumentar a resistência ao desgaste;
- o) Aumentar a capacidade de corte;
- p) Melhorar as propriedades elétricas e magnéticas.

Os três primeiros efeitos são conseguidos porque os elementos de liga aumentam a resistência da ferrita e formam ainda outros carbonetos, além do Fe_3C , contribuindo para a melhoria da resistência do aço, sobretudo em seções que, caso se tratasse de aços-carbono comuns, dificilmente teriam a resistência alterada. Geralmente, esse aumento de resistência é conseguido pela adição de um ou vários

elementos de liga em teores relativamente baixos (não ultrapassando sua soma o valor de 5%) [9].

A obtenção dos outros requisitos requer a introdução dos elementos de ligas em teores mais elevados, produzindo-se alterações mais profundas na ferrita, além de resultarem na formação de carbonetos mais complexos. Esses aços são mais difíceis de fabricar e tratar termicamente, de modo que são muito dispendiosos, mesmo porque alguns dos elementos de liga utilizados são relativamente raros [9].

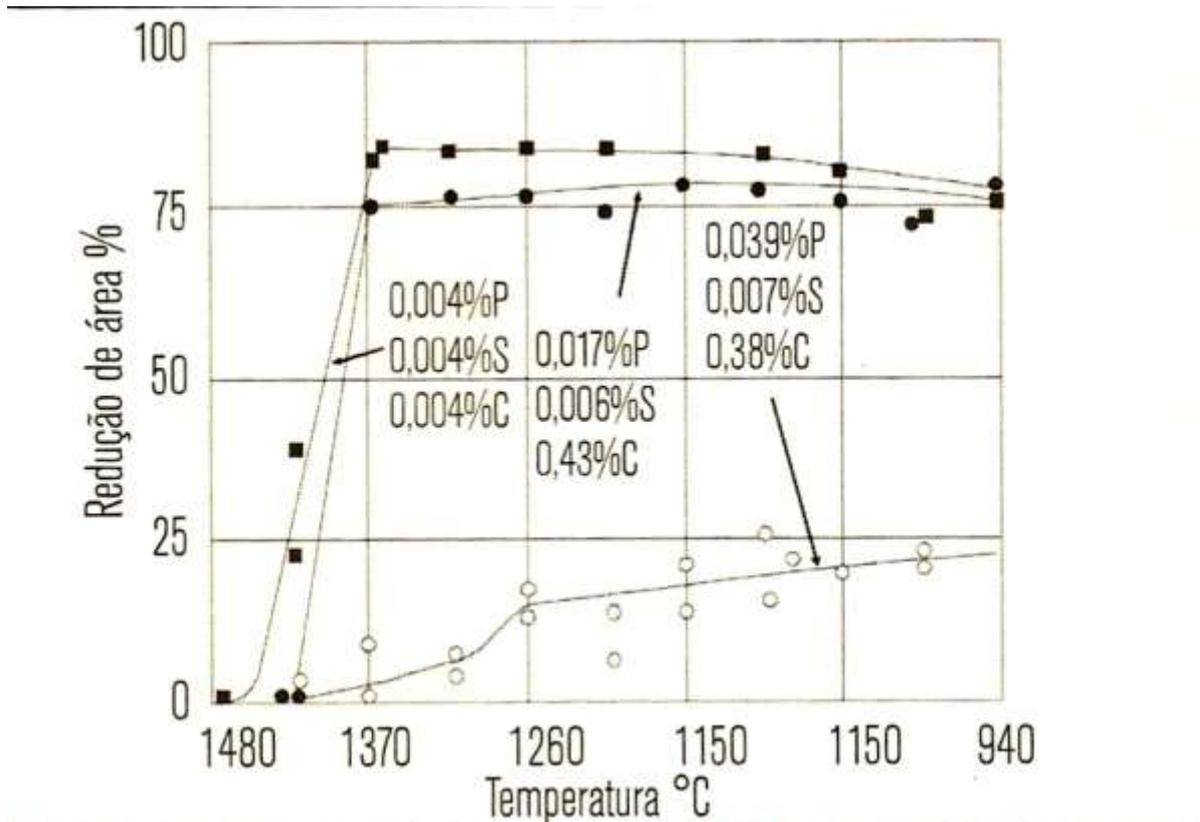
2.1.4.1. Manganês

O manganês tem como função o controle dos efeitos negativos do enxofre, formando inclusões de MnS, contrabalanceando a fragilidade causada pelo S, podendo ainda ser utilizado como desoxidante. Levando em consideração essa finalidade sua adição geral é menor que 1%, já para aços estruturais são utilizados teores de 1,5%.

2.1.4.2. Fosforo

O teor máximo de fósforo necessita ser rigorosamente controlado nos aços e situa-se entre 0,005 e 0,1%, de acordo com a qualidade desejada e a aplicação que se destina o aço, pois o fósforo dissolve-se na ferrita, endurecendo-a, e causando fragilidade a frio. O resultado é uma baixa resistência ao choque e uma baixa tenacidade, o que é acentuado pelo aumento da porcentagem de carbono, também é responsável pelo fenômeno de fragilidade no revenido. No entanto o fósforo apresenta algumas vantagens, como aumento da resistência ao desgaste e a corrosão, melhoria da usinabilidade dos aços de corte rápido e aumento na resistência mecânica [11].

Figura 3 - Efeito do fósforo na ductilidade do aço.



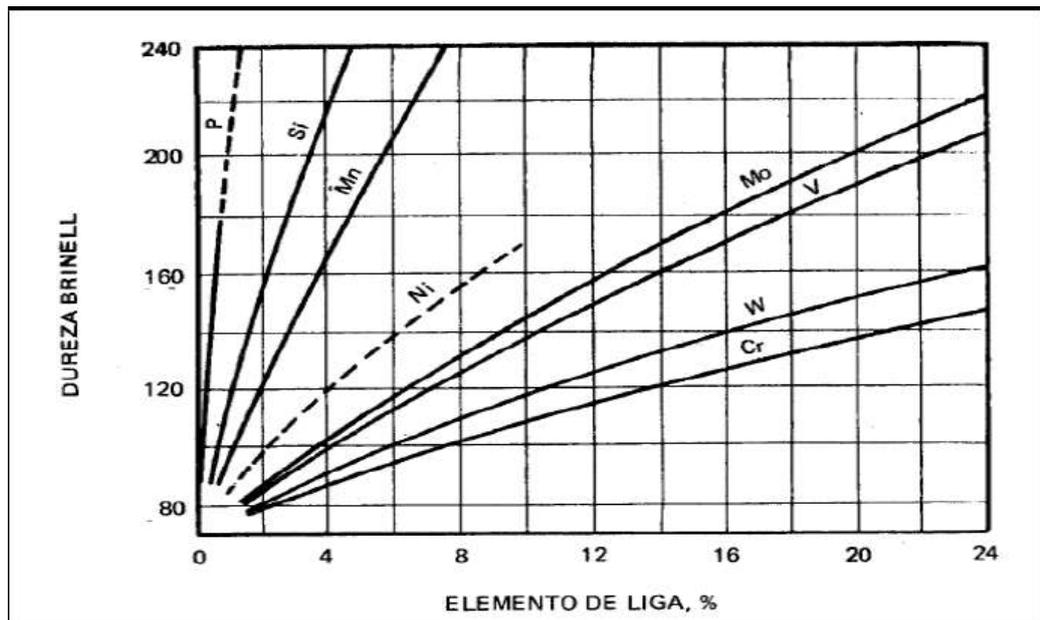
Fonte: [15]

2.1.5. Elementos de liga

Os elementos de liga são adicionados em teores e em números mais variados. A não ser em casos que se desejem características especiais, como refratariedade, dureza a quente, etc. Os teores elevados de um ou mais elementos de liga são destinados exatamente para os casos em que se procuram características especiais. Atualmente a tendência é adicionar vários elementos de liga simultaneamente, em teores baixos e médios.

O aumento dos valores das propriedades mecânicas como dureza e resistência a tração, é conseguido pelo fato de que os elementos de liga, além de aumentar a resistência da ferrita, formam outros carbonetos, além do Fe_3C [3].

Figura 4 - Ação relativa na dureza do aço de alguns elementos de liga.



Fonte: [6]

2.1.6. Nomeclatura dos aços

É possível notar a grande importância do aço através das suas diversas aplicações, como na fabricação de peça por fundição, trilhos, tubos, arames, fios, molas, chapas para estruturas em geral, e diversas outras aplicações. A classificação dos aços é normalmente realizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Sociedade dos 16 Engenheiros Automotivos (SAE), American Iron and Steel Institute (AISI) e American Society for Testing and Materials (ASTM) [5].

A importância do carbono no aço tornou desejável indicar o seu conteúdo no esquema de identificação desse tipo de liga. Desta forma foi adotado um sistema de 4 algarismos, nos quais os dois últimos indicam os centésimos percentuais do conteúdo de carbono, mostrado na tabela 1. Podemos utilizar como exemplo o aço 1040 que tem 0,40% de carbono (mais ou menos uma pequena faixa aceitável). Os dois primeiros algarismos codificam o tipo de elemento de liga adicionado ao ferro carbono. A classificação utilizada no exemplo (10xx) é reservada aos aços ao carbono comum cujo eventual conteúdo de elementos de liga constituem o mínimo irrelevante [5].

Os aços-liga constituem o mais importante grupo de materiais utilizados na engenharia e na indústria. As propriedades mecânicas desses aços variam de acordo com os outros elementos constituintes, tornando importantes os estudos que

identifiquem o efeito destes elementos para atender a maioria das aplicações práticas [5].

Tabela 1 - Código SAE.

Código SAE	Descrição ou principais elementos de liga
10XX	Aços-carbono de uso geral
11XX	Aços de fácil usinagem, com enxofre
13XX	Manganês (1,75%)
15XX	Manganês (1,00%)
23XX	Níquel (3,50%)
25XX	Níquel (5,00%)
31XX	Níquel (1,25%), Cromo (0,65%)
33XX	Níquel (3,50%), Cromo (1,55%)
40XX	Molibidênio (0,25%)
41XX	Cromo (0,50 ou 0,95%), Molibidênio (0,12 ou 0,20%)
43XX	Níquel (1,80%), Cromo (0,50 ou 0,80%), Molibidênio (0,25%)
46XX	Níquel (1,55 ou 1,80%), Molibidênio (0,20 ou 0,25%)
47XX	Níquel (1,05%), Cromo (0,45%), Molibidênio (0,25%)
48XX	Níquel (3,50%), Molibidênio (0,25%)
50XX	Cromo (0,28% ou 0,40%)
51XX	Cromo (0,80, 0,90, 0,95, 1,00 ou 1,05%)
61XX	Cromo (0,80 ou 0,95%), Vanádio (0,10 ou 0,15%)
86XX	Níquel (0,55%), Cromo (0,50 ou 0,65%), Molibidênio (0,20%)
87XX	Níquel (0,55%), Cromo (0,50%), Molibidênio (0,25%)
92XX	Manganês(0,85%), Silício (2,00%)
93XX	Níquel (3,25%), Cromo (1,20%), Molibidênio (0,12%)
94XX	Manganês (1,00%), Níquel (0,45%), Cromo (0,40%), Molibidênio (0,12%)
97XX	Níquel (0,55%), Cromo (0,17%), Molibidênio (0,20%)
98XX	Níquel (1,00%), Cromo (0,80%), Molibidênio (0,25%)

Fonte: [Adaptada-Autor].

2.1.7. Aço SAE 1644

O aço 1644 é um aço carbono com teor de manganês de 0,9 a 1,1% e de vanádio de 0,03 a 0,04%. Sua composição é válida para o órgão classificador SAE.

Este aço quase não é utilizado, e para esse estudo o mesmo foi obtido da empresa SINOBRAS – Siderúrgica Norte Brasil S.A. onde era produzido em seu “start up” sendo posteriormente substituído pelo aço SAE 1140. A Tabela 1 mostra a composição química do aço SAE 1644.

Tabela 2 - Composição química do aço SAE/AISI 1644

Composição Química							
Elemento	%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Cu	%Ni
Min.	0,440	0,150	0,900	0,000	0,000	0,000	0,000
Máx.	0,480	0,300	1,100	0,050	0,050	0,400	0,300
Composição Química							
%Cr	%Sn	%Nb	%Mo	%V	%N	Mn/Si	Mn/S
0,000	0,000	0,000	0,000	0,030	0,000		28,00
0,300	0,150	0,010	0,100	0,040	0,015	-	-

Fonte: [Autor]

2.2. TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇO

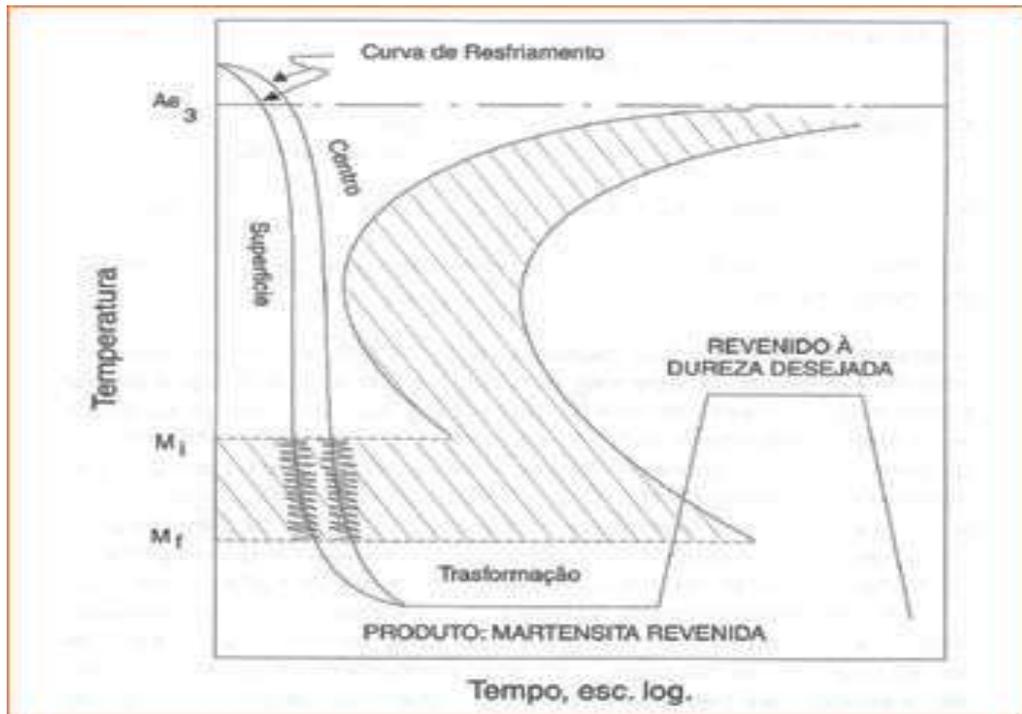
O tratamento térmico como definiu (CHIAVERINI, 1988) “é o conjunto de operações a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinados.”[2]

2.2.1. Têmpera

A simples adição de carbono ao aço não resultaria em elevada dureza, desta maneira é necessário um tratamento de têmpera após a cementação para que os valores de resistência a tração e dureza alcancem ao esperado [2].

A têmpera é o processo de resfriamento rápido de peças de aço que se encontram em alta temperatura acima da temperatura de austenitização, visando à obtenção de estrutura acicular (em forma de agulhas) chamado de martensita (HÖLTZ, 1992).

Figura 5 - Representação esquemática do tratamento térmico de têmpera.



Fonte: [2]

A têmpera consiste em resfriar o aço, após austenização, a uma velocidade suficientemente rápida para evitar as transformações perlíticas e bainíticas na peça em questão. Deste modo, obtém-se estrutura metaestável martensítica [11].

Os meios mais comuns de resfriamento são líquidos ou gasosos. No caso dos meios líquidos, os mais comumente usados são:

- Água;
- Água contendo sal ou aditivos cáusticos;
- Óleo, que pode conter uma variedade de aditivos;
- Soluções aquosas de polímeros [2].

Os meios gasosos mais comuns, além do ar, são gases inertes, como nitrogênio, hélio e argônio [2].

Deve-se ainda observar que, aumentando-se o teor de carbono do aço, diminui-se a temperatura para início e fim da formação da martensita. Também a dureza martensítica aumenta com o teor de carbono. Em vista disso, os aços carbono para têmpera apresentam um teor de carbono maior que 0,3%, pois abaixo deste teor o efeito endurecedor provocado pela têmpera seria muito pequeno [3].

Como na têmpera o constituinte final desejado é martensita, os objetivos dessa operação, sob o ponto de vista de propriedades mecânicas, são aumento da dureza do aço e da sua resistência à tração. Na realidade, o aumento da dureza deve ocorrer até certa profundidade [2].

Resultam também da têmpera, redução da ductilidade (baixos valores de alongamento e estrição), da tenacidade e o aparecimento de apreciáveis tensões internas, que podem se não bem controladas, ocasionar deformação, empenamento e fissuração.

Para que a operação de têmpera seja bem sucedida, vários fatores devem ser levados em conta. Inicialmente, a velocidade de resfriamento deve ser tal que impeça a transformação da austenita nas temperaturas mais elevadas, em qualquer parte da peça que se deseja endurecer. De fato, as transformações da austenita nas altas temperaturas podem dar como resultados estruturas mistas, as quais ocasionam o aparecimento de pontos moles além de conferirem ao aço baixos valores para o limite de escoamento e para resistência ao choque. Portanto, a secção das peças constitui outro fator importante porque pode determinar diferenças de esfriamento entre a superfície e o centro.

Em peças pequenas ou de pequena espessura, essa diferença é desprezível. O mesmo, contudo, não se dá com peças de grandes dimensões, no centro das quais a velocidade de esfriamento é menor do que na superfície, resultando estruturas de transformação mistas, a não ser que o teor de elementos de liga do aço seja suficiente para impedir essa transformação e produzir somente a estrutura martensítica.

Às vezes, por outro lado, é conveniente um núcleo mais mole e, então, escolhe-se um aço e uma velocidade de esfriamento que produzam superfície dura e núcleo naquelas condições, [2].

2.2.2. Revenido

O revenido é o tratamento térmico que normalmente sempre acompanha a têmpera, pois elimina a maioria dos inconvenientes produzidos por esta; além de aliviar ou remover tensões internas, corrige as excessivas dureza e fragilidade do material, aumentando sua ductilidade e resistência ao choque [2].

Para atingir valores adequados de resistência mecânica e tenacidade, deve-se, logo após a têmpera, proceder ao revenimento. Este tratamento consiste em aquecer

uniformemente até uma temperatura abaixo daquela de austenização, mantendo o aço nesta temperatura por tempo suficiente para equalização de temperatura e obtenção das propriedades desejadas [11].

Conforme a temperatura de revenido verificam-se as seguintes transformações:

- Entre 25° e 100°C, ocorre segregação ou uma redistribuição do carbono em direção a discordâncias; essa pequena precipitação localizada do carbono pouco afeta a dureza. O fenômeno é predominante em aços de alto carbono;
- Entre 100° e 250°C - às vezes chamado 1º estágio do revenido – ocorre precipitação de carboneto de ferro do tipo épsilon, de fórmula $Fe_{2-3}C$, e reticulado hexagonal; este carboneto pode estar ausente em aços de baixo carbono e de baixo teor em ligas; a dureza Rockwell começa a cair, podendo chegar a 60;
- Entre 200° e 300°C – às vezes chamado de 2º estágio – ocorre transformação de austenita em ferrita e cementita em aços-carbono de médio e alto teor de carbono; a dureza Rockwell continua a cair;
- Entre 250° e 350°C – às vezes chamado de 3º estágio do revenido – forma-se um carboneto metaestável, de fórmula Fe_5C_2 ; quando essa transformação se verifica em aços de alto carbono, a estrutura visível ao microscópio é uma massa escura, que era chamada de “troostita”, denominação não mais utilizada; a dureza Rockwell continua caindo, podendo atingir, valores pouco superior a 50;
- Entre 400° e 600°C, ocorre uma recuperação da subestrutura de discordância; os aglomerados de Fe_3C passam a uma forma esferoidal, ficando mantida uma estrutura de ferrita fina acicular; a dureza Rockwell cai para valores variando de 45 a 25;
- Entre 500° e 600°C, somente nos aços contendo Ti, Cr, Mo, V, Nb, ou W, há precipitação de carbonetos de liga; a transformação é chamada de “endurecimento secundário” ou 4º estágio do revenido.
- Finalmente, entre 600°C e 700°C, ocorrem recristalização e crescimento de grão; a cementita precipitada apresenta a forma nitidamente esferoidal; a ferrita apresenta forma aqui-axial; a estrutura é frequentemente chamada “esferoidal” e caracteriza-se por ser muito tenaz e de baixa dureza, variando de 5 a 20 Rockwell.

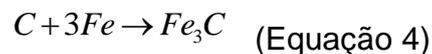
Pelo que acaba ser exposto, percebe-se que a temperatura de revenido pode ser escolhida de acordo com a combinação de propriedades mecânicas que se deseja no aço temperado [2].

2.3. TRATAMENTO TERMOQUÍMICO

2.3.1. Cementação

Consiste na introdução de carbono na superfície do aço, de modo que este, depois de temperado, apresente uma superfície mais dura. Para se produzir uma combinação de uma superfície dura com núcleo tenaz, deve-se partir de um aço com baixo carbono ($C < 0,30\%$) e aquecê-lo, geralmente, entre 815°C e 950°C [1].

Na cementação (ou carburização), o elemento fundamental é o carbono, na forma de carvão, monóxido de carbono ou contido em banhos de cianetos. Os aços a serem cementados devem possuir carbono baixo, de modo que, quando aquecidos a elevadas temperaturas (de austenização), na presença de um meio carbonetante, o carbono desse meio reage com o ferro do aço, de acordo com a reação simples:



Desse modo a superfície do aço fica enriquecida de carbono, até a profundidade que pode ser perfeitamente preestabelecida, permitindo, assim, a sua têmpera posterior, para aumento superficial da dureza e da resistência ao desgaste, [12].

A cementação pode ser feita por via: Sólida, Gasosa, Líquida, Vácuo e Plasma. A cementação sólida é o processo mais simples, embora não proporcione o melhor controle da camada cementada dentro de tolerâncias rigorosas, nem do teor de carbono superficial ou do gradiente de carbono. É, contudo, ainda muito empregado, por não exigir equipamento sofisticado, nem atmosfera controlada especial a por ser eficiente e econômico para pequenos lotes de peças ou para peças de grandes dimensões. Pelo fato de não ser fácil à têmpera imediata, o resfriamento lento após a cementação, é vantajoso para peças que devem ser acabadas antes da têmpera [12].

A faixa de temperaturas na cementação sólida é, geralmente, de 815°C a 950°C, podendo chegar até a temperatura entre 1000°C e 1100°C. Pode obter uma camada de espessura superior a 2 mm.

É preciso notar que a geração de quantidades apreciáveis de CO₂ se dá a temperaturas elevadas, de modo que se deve evitar, após a cementação, resfriamento muito lento até mais ou menos 650°C, pois havendo formação de quantidade apreciável de CO₂, origina-se uma casca mole.

As desvantagens do processo relacionam-se com os fatos de não proporcionar um controle rigoroso da espessura da camada cementada, não ser recomendável para obtenção de camadas finas, não ser adequado para têmpera direta, exigir tempo mais longo de operação (devido ao peso das caixas e da mistura carburizante que reduzem as velocidades de aquecimento e resfriamento) e não ser tão limpo quanto os outros processos de cementação [12].

2.4. ANÁLISE METALOGRAFICA

2.4.1. Microscopia óptica

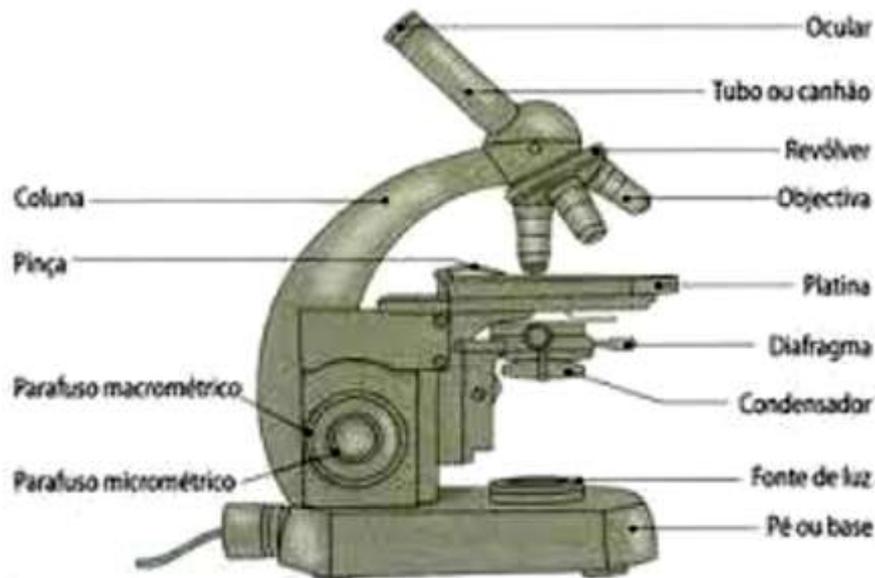
Na microscopia óptica, o microscópio óptico é utilizado para estudar a microestrutura; sistemas ópticos e de iluminação são os seus elementos básicos. Para materiais que são opacos à luz visível (todos os metais e muitos cerâmicos e polímeros), apenas a superfície do material é submetida à observação e o microscópio óptico deve ser usado no modo de reflexão. Os contrastes na imagem produzida resultam das diferenças na refletividade das várias regiões da microestrutura. As investigações desse tipo são chamadas frequentemente de metalográfica, uma vez que os metais foram os primeiros materiais a ser examinados com o emprego dessa técnica.

É necessária uma preparação cuidadosa e meticulosa da superfície para revelar os detalhes importantes de sua microestrutura, essas etapas do ensaio micrográfico serão expostas mais adiante.

O microscópio apresenta dois sistemas de lentes convergentes; a objetiva e a ocular. A objetiva é um conjunto de lentes que apresenta pequena distância focal e que fornece uma imagem real e aumentada do objeto que é observado. A ocular,

também formada por lentes convergentes, funciona como uma lupa, que nos dá uma imagem virtual e aumentada da imagem real que se formou através da objetiva. [10]

Figura 6 - Representação esquemática de um microscópio óptico.



Fonte: [17]

2.5. PROPRIEDADES MECÂNICAS

2.5.1. Ensaio de dureza

Os diversos ensaios de dureza existentes possibilitam uma excelente cobertura de todas as gamas usuais de dureza e dimensões encontradas nos aços, o ensaio de dureza corretamente escolhido e interpretado é uma ferramenta excelente para o controle indireto das propriedades mecânicas, a baixíssimo custo, comparado com as demais opções existentes, [10].

A dureza de um material depende diretamente das forças de ligação entre átomos, íons ou moléculas, assim como da resistência mecânica. A dureza dos metais pode ser aumentada por tratamentos especiais, como adição de soluto, trabalho a frio, endurecimento por precipitação ou tratamentos térmicos específicos. Há uma ligação bastante próxima entre o limite de escoamento dos metais e a sua dureza, [11].

Visto que dependendo da área científica de estudo a dureza recebe um significado distinto, podemos dividir o ensaio de dureza em três tipos principais, que

dependem da maneira com que o ensaio é conduzido: por penetração por choque e por risco, sendo que o terceiro tipo ser raramente empregado para os metais.

2.5.2. Dureza por risco

Este tipo de ensaio é pouco utilizado nos materiais metálicos, encontrando maior aplicação no campo da mineralogia. Vários minerais podem ser relacionados com outros materiais na sua capacidade de riscar uns aos outros. Entre os ensaios por risco, a dureza Mohs é a mais conhecida, e consiste em uma escala de 10 minerais padrões organizados de tal forma que o mais duro (diamante – dureza ao risco 10) risca todos os outros [10].

2.5.3. Dureza por choque

A dureza por choque é um ensaio dinâmico que produz a impressão num corpo de prova por meio de um penetrador que bate a sua superfície plana. Esse choque é produzido pela queda livre de um êmbolo, tendo em sua ponta um penetrador. O valor da dureza obtido é proporcional à energia de deformação consumida para formar a marca no corpo de prova e representada pela altura alcançada no rebote do êmbolo. Desses métodos destaca-se a dureza Shore, que se utiliza de uma barra de aço de peso 2,5 N (0,250 kgf), com uma ponta arredondada de diamante colocada dentro de um tubo de vidro com uma escala graduada de 0 a 140 [10].

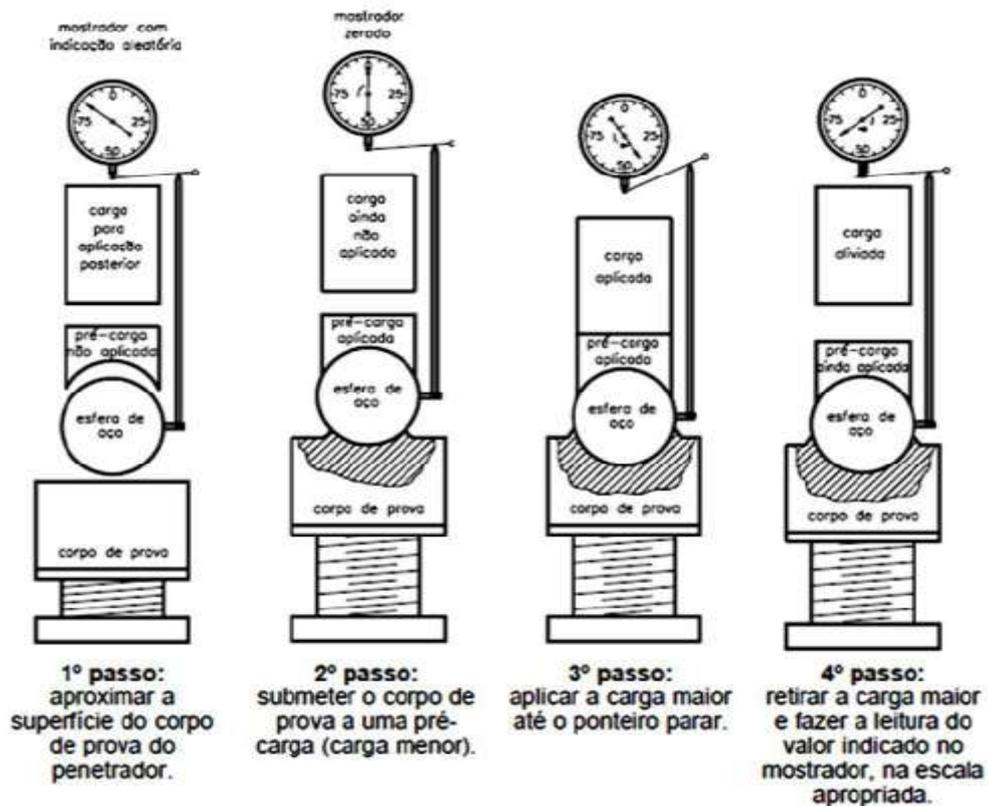
2.5.4. Dureza por penetração

A dureza por penetração é a dureza mais utilizada atualmente, existem vários tipos de equipamentos e durômetros de bancada que realizam esse tipo de dureza não mais diversas escalas existentes, dessa forma este tipo de dureza vem aumentado muito com o avanço tecnológico.

De um modo geral na dureza por penetração aplica-se uma pré-carga, para garantir um contato firme entre o penetrador e o material ensaiado, depois, aplica-se a carga do ensaio propriamente dita. A leitura do grau de dureza é feita diretamente no mostrador acoplado à máquina de ensaio, de acordo com uma escala pré-

determinada, adequada à faixa de dureza do material. A figura 7 mostra as etapas principais de um processo de dureza[13].

Figura 7 - Etapas do processo de ensaio de dureza.



Fonte: [13]

2.5.5. Ensaio de impacto

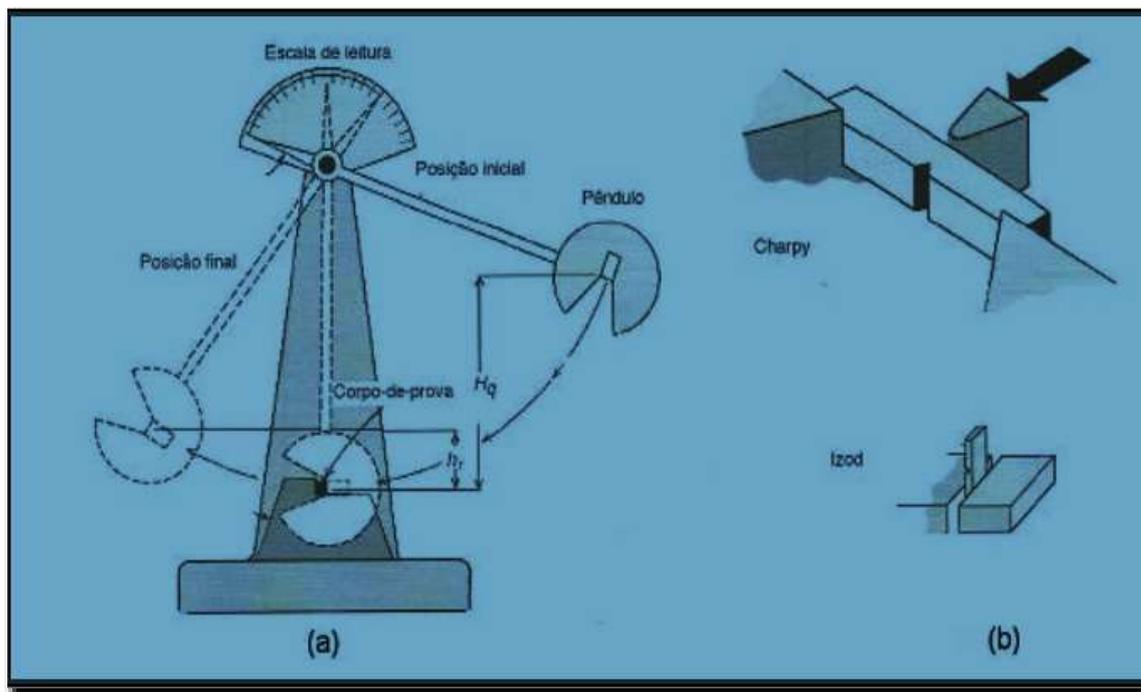
Um dos ensaios que permitem estudar os efeitos das cargas dinâmicas é o ensaio de impacto. Este ensaio é usado para medir a tendência de um metal de se comportar de maneira frágil. O choque ou impacto representa um esforço de natureza dinâmica, porque a carga é aplicada repentina e bruscamente.

Assim, a tendência de um metal de se comportar de uma maneira frágil é medida pelo ensaio de impacto. Ou seja, o corpo de prova é padronizado e provido de um entalhe para localizar a sua ruptura e produzir um estado triaxial de tensões, quando ele é submetido a uma flexão por impacto, produzida por um martelo pendular. Desta forma, a energia que o corpo de prova absorve, para se deformar e romper, é

medida pela diferença entre a altura atingida pelo martelo antes e após o impacto, multiplicada pelo peso do martelo. Vale ressaltar que, nas máquinas em geral, essa energia é medida na própria máquina através de um ponteiro que corre numa escala graduada, já convertida em unidade de energia, [18].

A figura 8 mostra a máquina utilizada nos ensaios de impacto, esquematizando os dois tipos de corpos de prova utilizados no ensaio de Charpy e Izod.

Figura 8 - Representação esquemática do ensaio de impacto.



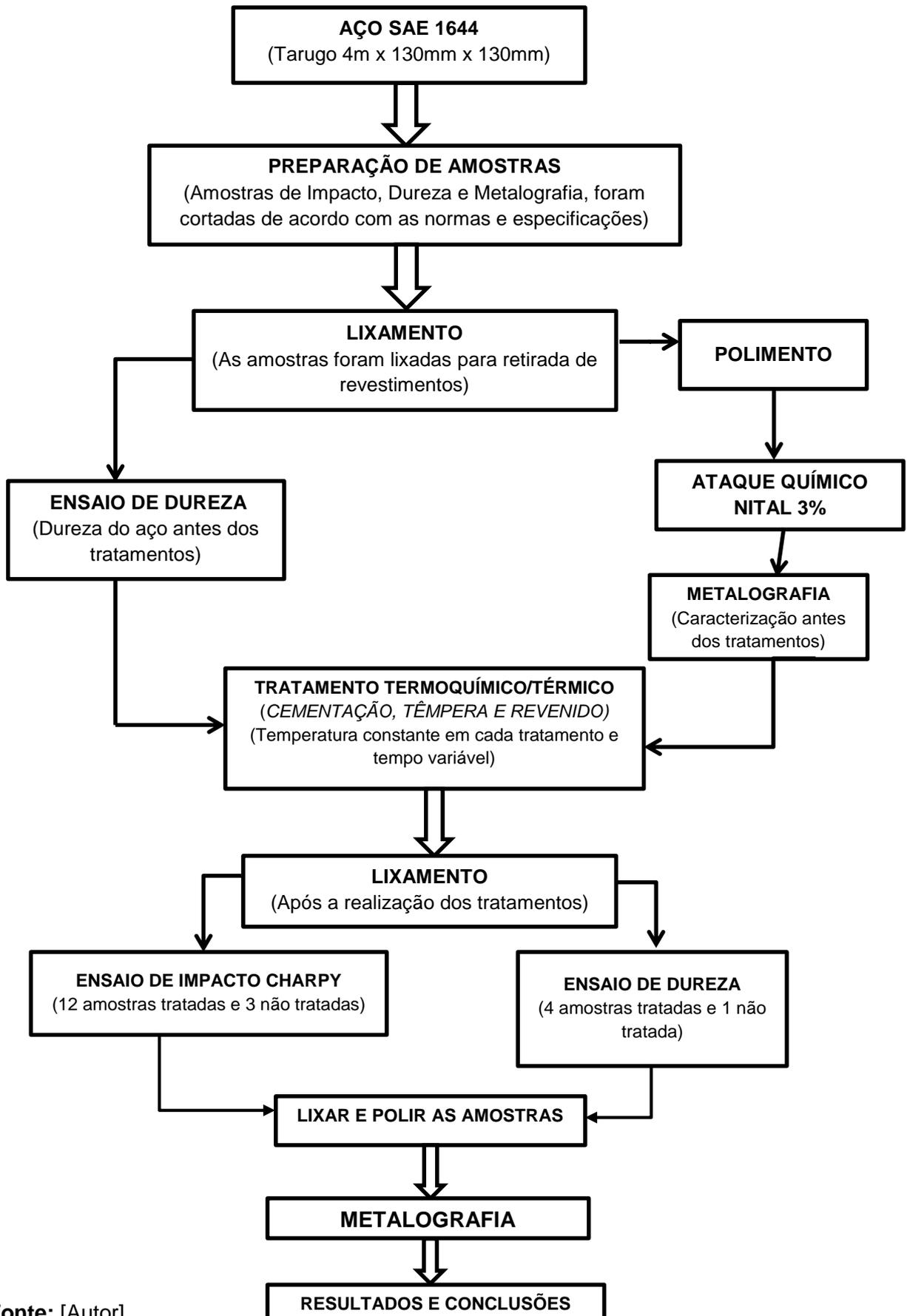
Fonte: [10]

CAPITULO III

3. METODOLOGIA

Para as análises e ensaios experimentais, foram confeccionados corpos-de-prova de Charpy e amostras planas retangulares, tratadas termoquimicamente em temperaturas pré-definidas e tempos variados conforme o fluxograma da figura 9. Posteriormente realizou-se ensaio de impacto, ensaio de dureza, metalografia, e microscopia óptica , para obtenção de dados experimentais específicos e, por conseguinte analisá-los mais precisamente.

Figura 9 - Fluxograma da metodologia.



Fonte: [Autor].

3.1. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

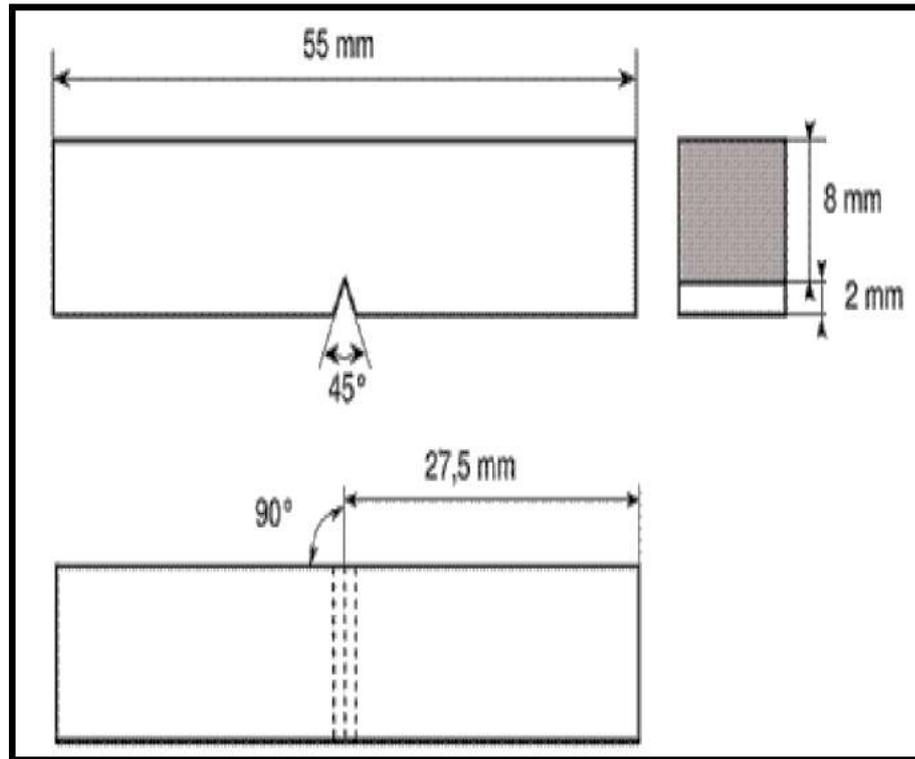
Através de um tarugo do aço SAE 1644, foram cortadas seis amostras retangulares (para realizar metalografia e dureza) de aproximadamente 130 mm de comprimento por 130 mm de largura e a espessura padrão de 4 mm. Essas amostras foram cortadas com a máquina de serra fita, utilizando óleo orgânico refrigerante para evitar alterações na microestrutura provocada por calor na região do corte nas amostras.

As amostras retiradas para metalografia e dureza antes e após serem tratadas termicamente foram polidas. O processo ocorre na lixadeira politriz rotativa, sob refrigeração com água, utilizando inicialmente a lixa de granulometria 80, passando com o objetivo de retirar a camada de tinta na superfície das amostras, e consecutivamente foram utilizadas as lixas de granulometria 100, 220, 320, 400 e 600. Foi realizado o ensaio de dureza antes do tratamento, para obter dados para uma posterior comparação.

Logo após o tratamento houve a realização do ensaio de dureza novamente, assim, as amostras foram lixadas com a lixa de granulação 600, 800 e 1200, sempre girando a amostra 90 graus a cada substituição de lixa para retirar os riscos deixados pela lixa anterior.

Esse processo é finalizado com o polimento da amostra. Estas foram polidas, limpas com álcool etílico e papel toalha, em seguida as amostras foram atacada com Nital 3% (com o objetivo de identificar as fases presentes) por aproximadamente 10 segundos. Após os 10 segundos as amostras são limpas novamente com álcool para finalizar a reação química. Assim estas estão prontas para a metalografia.

Figura 10 - Corpo de prova para o ensaio de impacto.

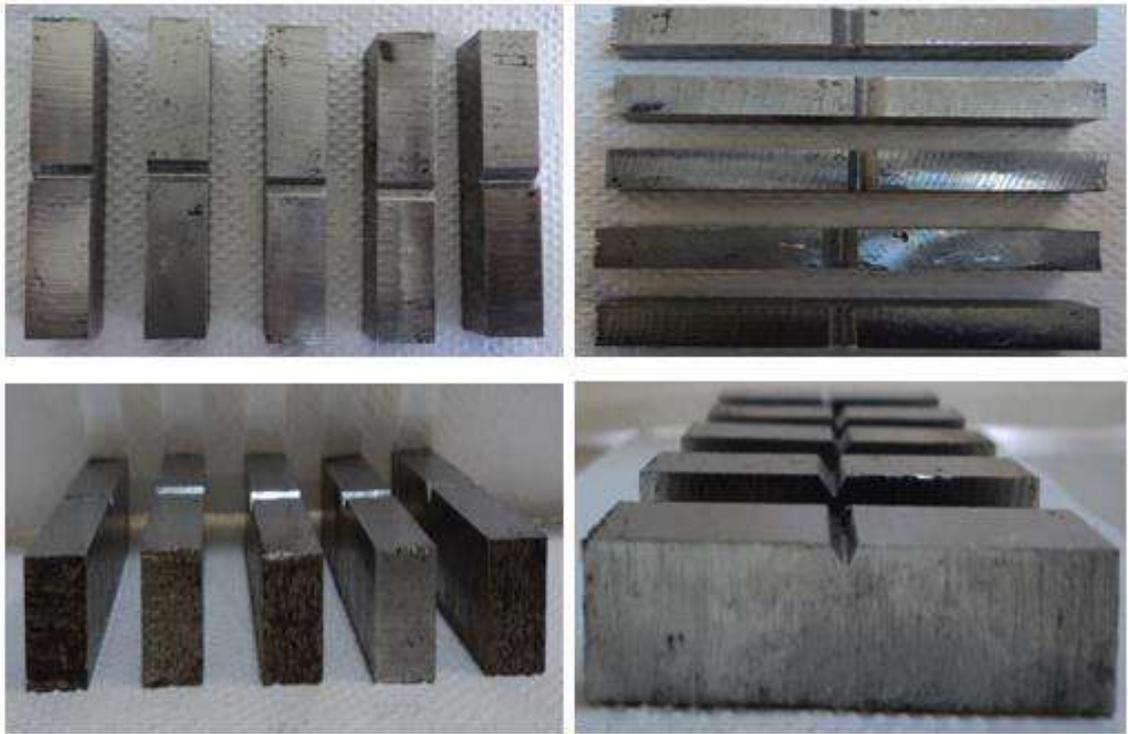


Fonte: [14]

Para confecção das amostras foi retirada uma tira com 55 mm de largura em uma plaina metálica, a partir de uma chapa metálica. Logo após foi feito o chanfro em V (com ângulo de 45°) e cortadas com 10 mm de comprimento.

Posteriormente as amostras destinadas ao ensaio de dureza, foram lixadas com lixa de granulação n° 80, com o objetivo de retirar a camada de tinta da superfície das amostras.

Figura 11 - Corpos de prova para ensaio de impacto.



Fonte: [Autor]

3.2. TRATAMENTO TERMOQUÍMICO

O tratamento termoquímico realizado nesse trabalho foi cementação sólida, seguido do tratamento térmico pós cementação, de têmpera e revenido. As amostras foram distribuídas de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 - Distribuição das amostras e dos tratamentos.

Condição	Tratamento	Temperatura	Tempo
Condição 1	-	-	-
Condição 2	Cementação	950°C	4 horas
	Têmpera	840°C	30 minutos
	Revenido	450°C	15 minutos
Condição 3	Cementação	950°C	4 horas
	Têmpera	840°C	30 minutos
	Revenido	450°C	30 minutos
Condição 4	Cementação	950°C	4 horas
	Têmpera	840°C	60 minutos
	Revenido	450°C	15 minutos
Condição 5	Cementação	950°C	4 horas
	Têmpera	840°C	60 minutos
	Revenido	450°C	30 minutos
Condição 6	X	X	X
	Têmpera	840°C	60 minutos
	Revenido	450°C	30 minutos

Fonte: [Autor].

3.2.1. Cementação

Para dar início ao processo de cementação foi necessário preparar o coque de injeção (carbono em pó), a sílica, o carbonato de sódio e óleo de linhaça, utilizados no processo.

Tabela 4: Proporção dos elementos na cementação.

COMPOSTO	CARVÃO	CARBONATO	MATÉRIA AGLUTINANTE
%	80%	12,5%	7,5%

Fonte: [Autor].

O coque foi preparado para obter granulometria passante na peneira 100 mesh. A sílica e o coque foram peneirados (peneira 100 mesh) e levados para estufa por 48 horas a uma temperatura de 100°C, com o objetivo de retirar toda a umidade.

Figura 12 - Caixa metálica utilizada no tratamento.



Fonte: [Autor]

Foi adicionada uma camada de coque de injeção no fundo de uma caixa metálica. Posteriormente, todos os corpos de prova para ensaio de impacto e as amostras para metalografia e dureza foram distribuídas sobre a camada de coque de injeção.

Figura 13 - Amostras distribuídas sobre a camada de coque de injeção.



Fonte: [Autor]

Logo em seguida, as amostras e corpos de provas distribuídas ao longo da caixa metálica, foram cobertas completamente com uma nova camada de coque de aproximadamente 97,8% de pureza de carbono, carbonato de sódio (Na_2CO_3) que é usado como ativador químico, melhorando assim o efeito do tratamento relacionado à profundidade de penetração de carbono nas peças e como aglutinante o óleo de linhaça.

Feito isso, finalizou-se com uma camada de sílica para impedir o contato do coque de injeção com oxigênio do ar.

Figura 14 - Peças já cobertas com camadas de coque de injeção e sílica.



Fonte: [Autor].

As amostras na caixa metálica foram levadas ao forno, logo após atingir a temperatura de 950°C a caixa foi mantida dentro do forno por cerca de 4 (quatro) horas. Retirou-se a caixa do forno ao ser atingido o tempo na temperatura definida, em seguida a mesma foi resfriada bruscamente até atingir uma temperatura de 650°C (redução controlada com o auxílio de um termopar). Depois de atingir 650°C , a caixa metálica foi levada novamente ao forno para ser resfriada lentamente.

Para controlar essa taxa de resfriamento da peça foi retirada do forno até que se atingisse a temperatura de 650°C utilizou-se termopar (figura 15), que são sensores de temperatura, sendo amplamente utilizados nos mais variados processos de medição de temperatura.

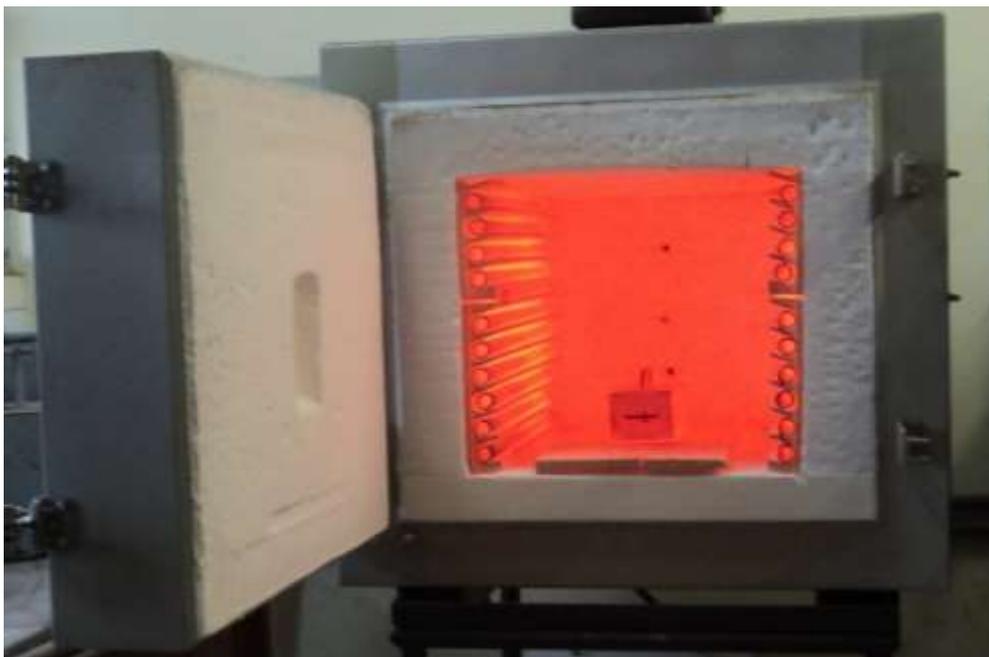
Figura 15 - Termopar usado no processo de cimentação.



Fonte: [Autor].

Assim ao atingir a temperatura de 650°C a caixa foi colocada em outro forno que estava a 650°C para que a mesma fosse resfriada juntamente com o forno, ou seja, em uma taxa de resfriamento bastante pequena. A Figura 16 mostra a caixa metálica com as amostra dentro do forno, a caixa foi retirada para o resfriamento ao ar.

Figura 16 - Amostras dentro do forno.



Fonte: [Autor].

3.3. TRATAMENTO TÉRMICO

3.3.1. Têmpera

Após cementadas as amostras foram identificadas com numero e distribuídas metade dos corpos de provas para o ensaio de impacto e a outra metade para o ensaio metalografico e dureza.

Os corpos de prova foram submetidos a uma têmpera de 840 °C de temperatura com tempos diferentes para a avaliação do grau da tempera. O primeiro tempo foi durante 30 (trinta) minutos e o segundo tempo de tempera foi durante 60 (sessenta) minutos.

As amostras foram colocadas dentro do forno e aquecidas até 840 °C. Após trinta minutos, a metade foi retirada do forno e resfriada bruscamente em água a temperatura ambiente. O mesmo procedimento foi feito com a outra metade, porém foram resfriadas bruscamente depois de 60 minutos após ter atingido a temperatura de 840°C.

3.3.2. Revenido

As amostras foram redistribuídas de acordo com tabela 5 para realizar o tratamento de pós tempera conhecido como revenimento. Assim, metade das amostras temperadas a 840°C durante 30 (trinta) minutos e metade das amostras temperadas a 840°C durante 60 (sessenta) minutos, foram revenidas a 450°C durante 15 (quinze) minutos, e o restante das amostras foram revenidas a 450°C durante 30 (trinta) minutos.

Todas as amostras sofreram resfriamento lento dentro do forno, pois é o fator mais importante do ciclo térmico e determina a microestrutura final obtida no tratamento térmico.

3.4. ANÁLISE QUÍMICA

Análise química é o conjunto de técnicas de laboratório utilizadas na identificação das espécies químicas envolvidas em uma reação de queima, como também a quantidade dessas espécies. Assim, foi feita uma análise química

elementar que permitiu determinar quais são os elementos químicos e quanto há de cada elemento no determinado aço em estudo, para isso usou-se o método qualitativo e o quantitativo.

3.5. ENSAIO DE DUREZA

O ensaio de dureza, foi realizado nas 4 (quatro) amostras tratadas termicamente e em 1 (uma) amostra sem tratamento em 5 (cinco) condições distintas, como mostra a tabela 5.

Tabela 5 - Distribuição das amostras para ensaio de dureza e metalografia.

Condição	Tempo	Tratamento	Temperatura
Condição 1	-	-	-
Condição 2	Cementação	950°C	4 horas
	Têmpera	840°C	30 minutos
	Revenido	450°C	15 minutos
Condição 3	Cementação	950°C	4 horas
	Têmpera	840°C	30 minutos
	Revenido	450°C	30 minutos
Condição 4	Cementação	950°C	4 horas
	Têmpera	840°C	60 minutos
	Revenido	450°C	15 minutos
Condição 5	Cementação	950°C	4 horas
	Têmpera	840°C	60 minutos
	Revenido	450°C	30 minutos
Condição 6	X	X	X
	Têmpera	840°C	60 minutos
	Revenido	450°C	30 minutos

Fonte: [Autor]

Figura 17 - Durômetro de bancada utilizado.



Fonte: [Autor].

3.6. ENSAIO DE IMPACTO

O ensaio de impacto realizado foi o Charpy, neste ensaio o corpo de prova foi submetido a uma carga aplicada pelo impacto de um martelo pendular, sendo que o corpo de prova estava apoiado nas duas extremidades e posicionado horizontalmente.

O martelo é posicionado em uma altura H (usar corpo de prova como referência) ao ser posicionado, o martelo então choca-se com a face oposta ao entalhe e continua seu trajeto até uma altura h (altura menor que a de partida). Ao obter a altura h (menor altura), o equipamento de ensaio de impacto já calcula a quantidade de energia absorvida pelo corpo de prova no ato do impacto.

Figura 18 - Máquina de ensaio de impacto utilizada.



Fonte: [Autor]

CAPITULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão mostrados e discutidos as análises dos resultados obtidos através do tratamento termoquímico e térmicos, de análise química, ensaio de impacto, dureza e metalógrafia.

4.1.1. Análise química

A análise química do aço SAE 1644 realizada pelo espectrômetro de emissão ótica (THERMO) é mostrada na Tabela 6, o aço se enquadra na classificação estabelecida.

Tabela 6 - Análise química do aço SAE 1644 realizada por espectrometria de emissão ótica (THERMO).

ANÁLISE QUÍMICA							
N°	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	0,444	0,170	0,909	0,019	0,009	0,093	0,014
2	0,453	0,168	0,901	0,017	0,008	0,092	0,014
3	0,448	0,164	0,899	0,017	0,010	0,091	0,013
4	0,458	0,325	1,195	0,020	0,019	0,094	0,014
MÉDIA	0,451	0,207	0,976	0,018	0,011	0,093	0,014
DS	0,006	0,079	0,146	0,002	0,005	0,001	0,001
Ni	V	Cu	Nb	Sn	N	Mn/S	Mn/Si
0,062	0,033	0,215	0,001	0,015	0,010	97,742	5,347
0,062	0,034	0,215	0,001	0,014	0,012	109,878	5,363
0,061	0,035	0,211	0,001	0,015	0,010	94,632	5,482
0,062	0,033	0,214	0,001	0,016	0,011	63,564	3,677
0,062	0,034	0,214	0,001	0,015	0,011	91,454	4,967
0,001	0,001	0,002	0,000	0,001	0,001	19,723	0,862

Fonte: [Autor]

Tabela 7 - Análise química do aço SAE 1644 pós-tratamento realizada por espectrometria de emissão ótica (THERMO).

ANÁLISE QUÍMICA							
N°	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	0,765	0,22	1,005	0,016	0,009	0,113	0,016
2	0,786	0,188	0,968	0,015	0,008	0,102	0,014
3	0,772	0,194	0,905	0,014	0,01	0,106	0,015
4	0,778	0,305	1,096	0,016	0,009	0,122	0,016
MÉDIA	0,775	0,227	0,993	0,015	0,009	0,01	0,015
DS	0,007	0,039	0,057	0,001	0,001	0,007	0,001
Ni	V	Cu	Nb	Sn	N	Mn/S	Mn/Si
0,062	0,033	0,215	0,001	0,015	0,01	97,505	4,842
0,062	0,034	0,215	0,001	0,014	0,012	99,152	5,831
0,061	0,035	0,211	0,001	0,015	0,01	98,32	6,112
0,062	0,033	0,214	0,001	0,016	0,011	83,642	4,544
0,062	0,034	0,214	0,001	0,015	0,011	94,6548	5,33225
0,001	0,001	0,002	0	0,001	0,001	5,50638	0,63925

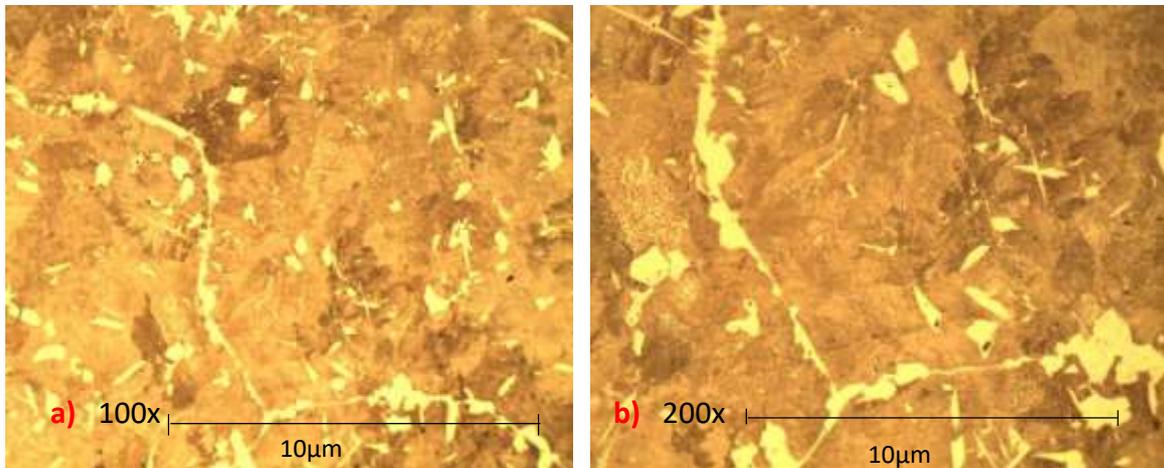
Fonte: [Autor]

Observa-se nas análises químicas que após os tratamentos térmicos de pós cementação que os elementos constituintes do aço SAE 1644 não obtiveram variações significativas, com exceção do carbono que teve um aumento considerável devido ao processo de cementação realizado, confirmando o alto grau de eficiência dos tratamentos realizados.

4.1.2. Análise metalográfica

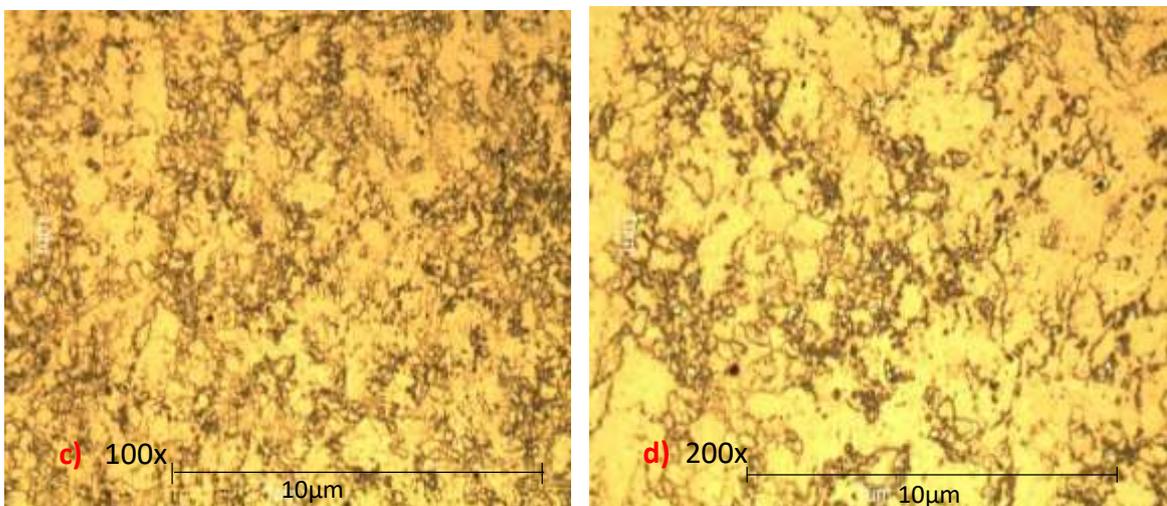
As Figuras 19 e 20 da metalografia do aço SAE 1644 foram analisadas para verificar o arranjo microestrutural antes e pós-tratamento termoquímico. Neste caso foi apresentado apenas a micrografia da condição 3 que foi o melhor resultado obtido.

Figura 19 - Micrografia observada do aço SAE 1644 antes dos tratamentos, ataque Picral 4%, com aumento de (a) 100x (b) 200x.



Fonte: [Autor]

Figura 20 - Micrografia observada do aço SAE 1644 pós-tratamento termoquímico, ataque Picral 4%, com aumento de (a) 100x (b) 200x. Condição 3.



Fonte: [Autor]

Observa-se pela micrografia da Figura 19 da amostra que não sofreu tratamento a presença da fase ferrita e perlita. A partir da microestrutura revelada observa-se que é uma micrografia incomum de aços médio carbono, onde temos a fase perlítica (escura) e ferrítica (clara) distribuídas de acordo com o teor de carbono do aço. Nota-se na microestrutura em questão a predominância da fase perlítica (coloração escura) com quase inexistência de fase ferrítica (coloração clara) e uma

fase bem clara e com formato bem irregular, esta fase se deve aos precipitados formados pela adição de vanádio e estão distribuídas por toda microestrutura do aço.

A alta solubilidade do vanádio na austenita faz com que estes precipitados que são carbonetos e nitretos de vanádio se formem durante o resfriamento do produto, no momento da transformação da austenita para ferrita. Estes precipitados, agem como barreiras físicas para o movimento de discordâncias, assim elevando as propriedades mecânicas do material, sendo este o mecanismo de endurecimento por precipitação. Quanto mais finos e dispersos estes precipitados, mais elevado será o ganho de resistência. Os carbonetos e nitretos de vanádio apresentam estrutura cristalina cúbica de face centrada.

Na figura 20 observa-se o arranjo micro estrutural da peça após a cementação e pós-tratamentos térmicos de tempera e revenido para a condição 3. Em comparação com a microestrutura observada antes do tratamento termo químico observou-se uma redução da região clara e irregular apresentada na microestrutura anterior, o aumento do percentual de carbono contribuiu para o aumento da dureza, bem como, a solubilização dos precipitados de vanádio formando precipitados menores e mais uniformes, o que gera um aumento da dureza observada no material, o vanádio também é responsável pelo refino dos grãos e pelo retardamento de recuperação e da recristalização da fase austenítica devido a sua alta solubilidade nesta fase. Nota-se o aumento do refino de grãos em relação a microestrutura não tratada, sendo esse também um dos fatores determinante para o grande aumento da dureza.

4.1.3. Análise de impacto

A partir do gráfico de Dureza x Tenacidade (Figura 23), percebe-se que são propriedades inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior a dureza, menor a tenacidade. Isso ocorre quando a dureza do material é maior, o que o torna mais frágil, com isso, rompe facilmente quando submetido ao impacto, já que absorve valores baixos de energia. É possível ainda prever através das microestruturas das condições testadas qual propriedade desempenha um melhor papel para cada tipo de solicitação de serviço, ou seja, por comparação consegue-se uma relação ideal entre dureza e tenacidade

Assim como a tenacidade é a capacidade de absorção de energia mecânica em regime elástico e plástico e é representada pela área total do diagrama tensão-

deformação e a dureza é a resistência ao risco, que é medida experimentalmente por vários processos, como a resistência oferecida pela superfície à penetração, nota-se, levando em consideração a maior dureza e menor energia que a condição 3 é a mais adequada.

As Tabelas 8 e 9 mostram os resultados da média e desvio padrão de dureza e tenacidade.

Tabela 8 - Média e desvio padrão de dureza.

	CONDIÇÃO 1	CONDIÇÃO 2	CONDIÇÃO 3	CONDIÇÃO 4	CONDIÇÃO 5	CONDIÇÃO 6
RESULTADOS (HB)	22	38	48	46	48	35
	20	37,5	47,5	45	46	35,7
	20	39	47	45,5	48	35
	19	39,5	47	46,5	47	35,3
	20,5	37	48	46	47,7	35,5
	21	38	48,5	47	48	34
	19	38	46	45	48	36
	20	39	46	46	46	35
	21,5	38,5	46,5	47	47,3	35
	19	37,5	47	46,5	47	35,5
	19,5	38	48	46,5	46,9	35,8
	22	39	48	46,8	46,5	36
	21	38,5	47,5	45	47	34
	20	38	47	44	47	34
	19	37,7	46,5	44	47,5	35
MÉDIA	20,23	38,21	47,23	45,78	47,19	35,12
DESVIO PADRÃO	1,06	0,68	0,77	0,99	0,68	0,68

Fonte: [Autor].

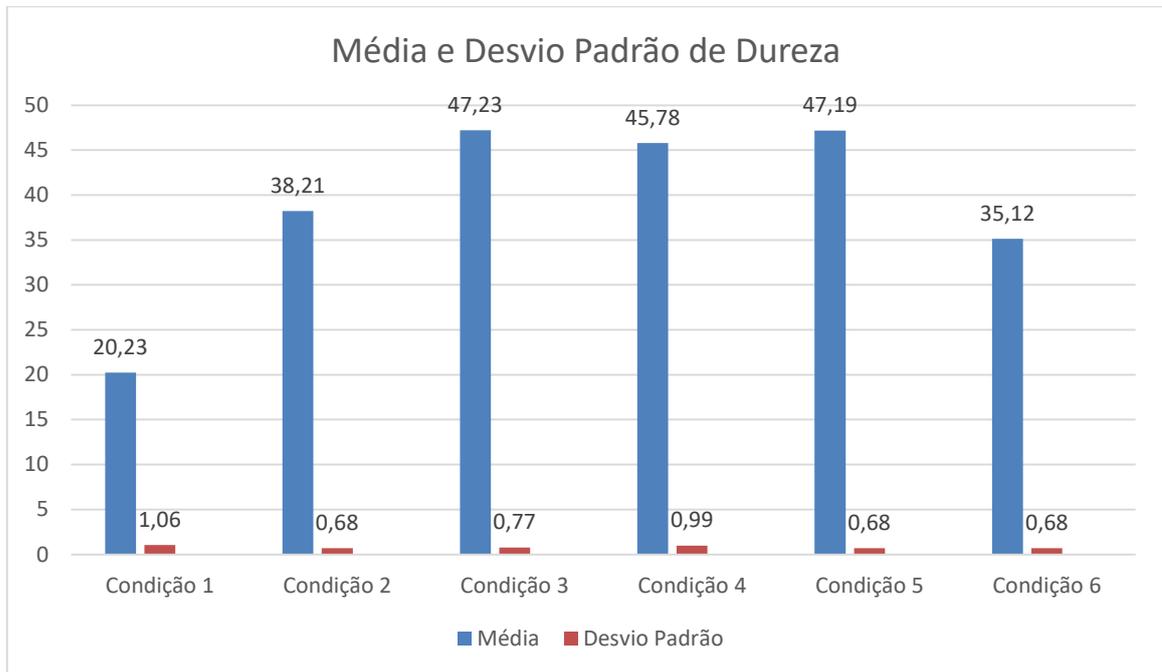
É possível observar na Tabela 8 que a condição 3 teve maiores resultados pós tratamento termo químico em relação ao aumento da dureza do aço SAE 1644, com uma média de dureza de 47,23 (HB) sendo o maior resultado em relação as demais amostras. Esse aumento da dureza é causado pela dissolução dos precipitados de vanádio e rearranjo mais uniforme por toda a microestrutura.

Tabela 9 - Média e desvio padrão da tenacidade.

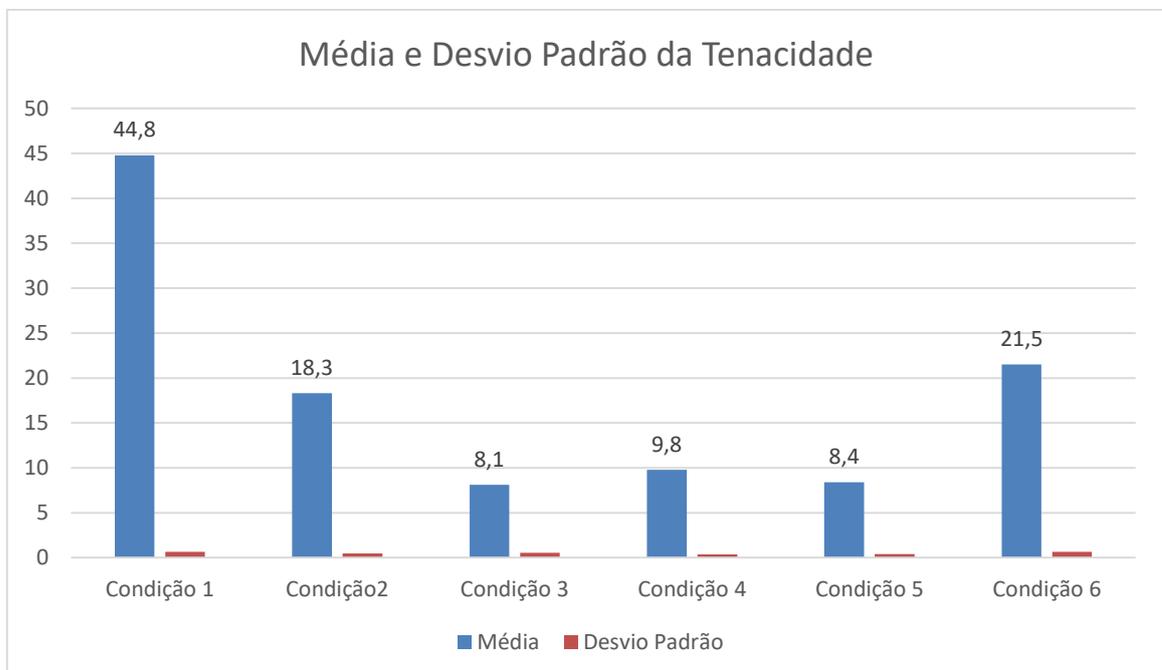
	CONDIÇÃO 1	CONDIÇÃO 2	CONDIÇÃO 3	CONDIÇÃO 4	CONDIÇÃO 5	CONDIÇÃO 6
RESULTADOS (HB)	45,5	18	9	10	9	21
	45	18,5	8,56	10,2	8,6	22,5
	45	18	8,5	9,4	8	22,3
	44	18,4	7,5	9,5	8,3	21,9
	45	17,5	7,8	9,8	8	21,5
	45	19	8,7	9,3	7,8	21
	46	18,5	8,5	10,3	9	21,3
	45	18	8	9,3	8,5	21,8
	45	18	7,9	9,5	8,2	21,5
	43,5	17,5	8	10,5	8,4	21
	44	18,5	8,5	10	8	19,8
	44,5	19	7,5	9,9	8,7	22
	45	19	8,1	9,8	8,5	21,5
	45,5	18,7	7	9,5	8	21,9
	44	18	8	10	9	21,6
MÉDIA	44,8	18,30	8,10	9,8	8,4	21,50
DESVIO PADRÃO	0,67	0,49	0,53	0,37	0,40	0,65

Fonte: [Autor]

Na tabela 10, comparando a média e desvio padrão das amostras tratadas termicamente observa-se que a condição 3 teve a menor média de tenacidade, ou seja, com o aumento da dureza a energia absorvida no ensaio de impacto é mais baixa.

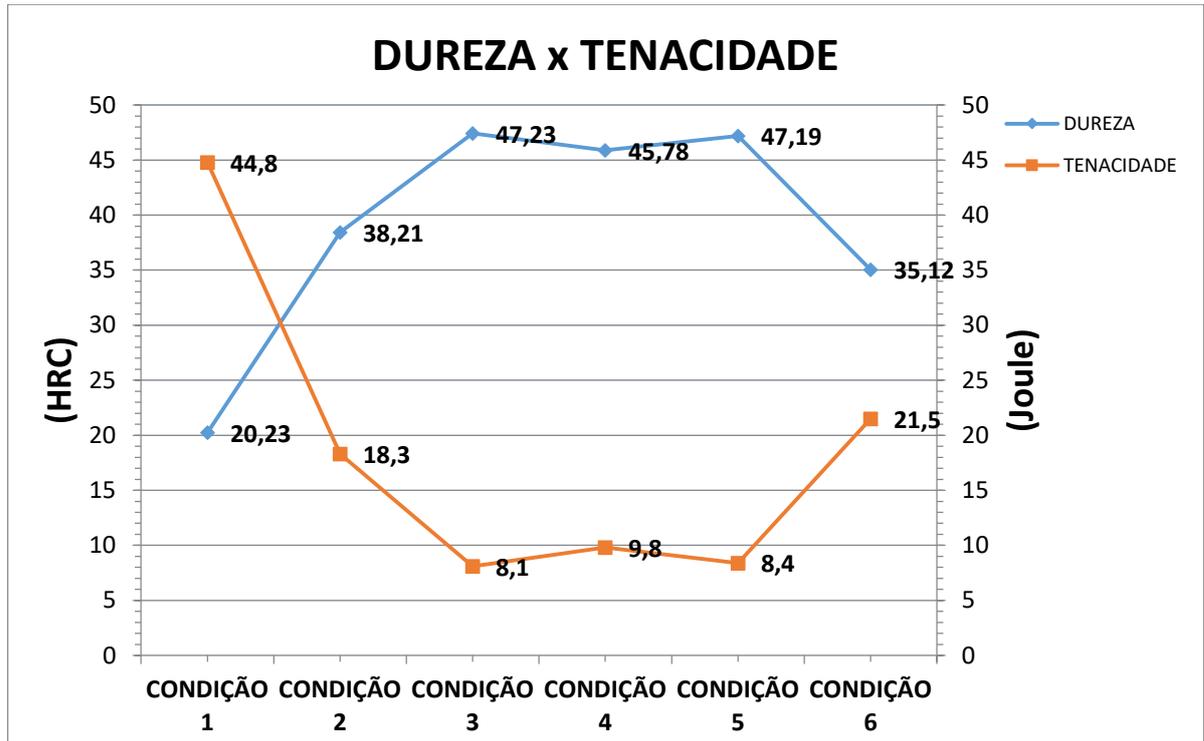
Figura 21 - Média e Desvio Padrão de Dureza.

Fonte: [Autor]

Figura 22 - Média e Desvio Padrão da Tenacidade.

Fonte: [Autor].

Figura 23 - Gráfico de Dureza x Tenacidade.



Fonte: [Autor]

5. CONCLUSÕES

Os tratamentos térmicos e termoquímicos são de suma importância para a indústria, e como o presente trabalho estudou, analisou e avaliou estes tratamentos foram eficazes no quesito ao qual foram propostos.

Através das análises experimentais antes e pós tratamentos podemos afirmar que o processo de cementação teve uma eficiência considerável (como era esperado). A análise química mostra que após os tratamentos térmicos de pós-cementação todos os principais elementos constituintes do aço SAE 1644 não tiveram variações significativas de composição química, exceto o carbono (C), que obteve um aumento na peça por difusão dos átomos, sem alterar a composição dos outros elementos constituintes. Alcançando assim o principal objetivo do processo de cementação.

Através da análise de metalografia pode-se comparar a microestrutura antes e pós tratamento termoquímico, foi possível concluir que a amostra submetida a condição 3 (Cementação a 950° durante 4 horas, Têmpera a 840° durante 30 minutos e Revenido a 450° durante 30 minutos) obteve melhores resultados observando assim uma redução da região clara e irregular, fase está existente devido aos precipitados formados pela adição de vanádio e que estão distribuídos por toda microestrutura do aço.

A dureza do aço SAE 1644 aumentou significativamente, aumento este causado pelo elevado teor de carbono pós tratamento, bem como, a solubilização dos precipitados de vanádio formando precipitados menores e mais uniformes, o que gera um aumento da dureza observada no material, o vanádio também é responsável pelo refino dos grãos e pelo retardamento de recuperação e da recristalização da fase austenítica devido a sua alta solubilidade nesta fase. Nota-se o aumento do refino de grãos em relação a microestrutura não tratada, sendo esse também um dos fatores determinante para o grande aumento da dureza, assim como a formação de pequenas agulhas de martensita observadas na microestrutura da peça tratada.

Em contrapartida as amostras se tornaram mais frágeis, o que levou o mesmo a apresentar baixos valores de energia absorvida no ensaio de tenacidade ao impacto, uma vez que, a tenacidade caminha de forma inversamente proporcional à dureza do material. Como pode ser facilmente visualizado na figura 23 que mostra o gráfico Dureza X Tenacidade.

Podemos concluir também que o objetivo deste estudo foi alcançado com sucesso, pois após as avaliações dos resultados de impacto e dureza do aço SAE 1644 os resultados apresentados mostraram-se bastante interessantes, principalmente os observados na condição 3.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Centro universitário Padre Anchieta. **Ciência dos materiais – Aços carbonos**. Unianchieta, Jundiá-São Paulo, 2007.

[2] CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos. 6. Ed. São Paulo: ABM, 1988.

[3] CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 7ª Edição/// Trad. Sérgio Murilo Stamile Soares, Rio de Janeiro, 2008.

[4] PANDOLFO, Diogo, **Estudo da Tenacidade ao Impacto de um aço SAE 1020 Submetido a Tratamento Térmico**, Porto Alegre, Trabalho de Conclusão de Curso, PUCRS, 2009.

5 - VAN VLACK, Lawrence Hall. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. Rio de Janeiro: Elsevier, 1984.

[6] MOURAO, B. M., et al. **Introdução à Siderurgia**. 2007. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.

[7] DURFERRIT DO BRASIL QUÍMICA LTDA. **Diagrama Ferro Carbono**. São Paulo – Diadema.

http://www.durferrit.com.br/downloads/13_Diagrama%20Ferro-Carbono.pdf

[8] Diagrama de Fases. Disponível em <http://www.dema.puc-rio.br/cursos/cemat_mv/Aula12.pdf>. Acessado em 15 de Fevereiro de 2012

9- TEÓFILO JORGE, B. L. **Materiais de construção mecânica**. 2011. UFPA-ITEC, Faculdade de Engenharia Mecânica.

[10] - GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Álvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos; CHEUNG, Noé. **Lingotamento contínuo de aços**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006. 320p

- [11] SILVA, André Luiz Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 3ª. Edição São Paulo, 2010
- [12] Armco Brasil. **Tratamentos térmicos**: têmpera e revenimento. Informativo quadrimestral “AÇÃO”, ano 1-nº 4. 2004.
- [13] RODRIGUES, Mayara Camila dos Santos. Estudo de um aço SAE 1140 submetido a tratamentos térmicos. Trabalho de conclusão de curso (Monografia) Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. Marabá. 2014.
- [14] AMERICAN society for metals. **Metals Handbook**. 4ª Edição. ASM, Metals Park, 1990.
- [15] CAMARGO, S M; GUIMARÃES FILHO, M A; LOPES, R L; SANTOS, C de P; NOBRE, A J. Tratamentos térmicos: normalização, têmpera e revenido do aço 1140 fabricado em siderúrgica de Marabá-Pa. 2012 CONEM. São Luis, MA. Agosto 2012.
- [16] O Ensaio Metalográfico. Controle da qualidade. Disponível em http://www.spectru.com.br/ensaio_metal.pdf. Acessado em 10 de Outubro de 2014.
- [17] SILVA, Juliana Rodrigues da. Transição dúctil-frágil do aço naval ASTM A131. Trabalho de conclusão de curso (Monografia). Universidade Federal do Pará. Marabá. 2013.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISSO – 2. Ensaio de impacto por pêndulo Charpy ABNT, 2013.