



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE MARABÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Erson Alves de Souza Neto

**Estudo avaliativo da resistência ao impacto de um aço
ASTM A131 submetido a tratamento termoquímico**

MARABÁ-PA

2013

Erson Alves de Souza Neto

**Estudo avaliativo da resistência ao impacto de um aço
ASTM A131 submetido a tratamento termoquímico**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Faculdade de
Engenharia de Materiais como
requisito para obtenção do título
de bacharel em Engenharia de
Materiais. Orientador: Prof. Esp.
Márcio Paulo de Araújo Mafra

MARABÁ-PA

2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Biblioteca II da UFPA. CAMAR, Marabá, PA

Souza Neto, Erson Alves de

Estudo avaliativo da resistência ao impacto de um aço ASTM A131 submetido a tratamento termoquímico / Erson Alves de Souza Neto ; orientador, Márcio Paulo de Araújo Mafra. — 2013.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Engenharia de Materiais, Marabá, 2013.

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

Erson Alves de Souza Neto

**Estudo avaliativo da resistência ao impacto de um aço
ASTM A131 submetido a tratamento termoquímico**

Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado a Faculdade
de Engenharia de Materiais
como requisito para obtenção
do título de bacharel em
Engenharia de Materiais.
Orientador: Prof. Esp. Márcio
Paulo de Araújo Mafra

Data de aprovação: ____/____/____

Conceito: _____

Bancada Examinadora:

Prof. Márcio Paulo de Araújo Mafra

ORIENTADOR – UFPA

Prof. M.Sc. Luis Fernando Nazaré Marques

EXAMINADOR – UFPA

Prof. Dr. Luiz Moreira Gomes

EXAMINADOR – UFPA

DEDICATÓRIA

Dedico especialmente a minha mãe **MARLENE PENALVA**, que sempre investiu na minha educação, e sempre me apoio nos meus momentos de dificuldades. Dedico aos meus irmãos **EDSON JOSE ALVES DE SOUZA JUNIOR, THALLES PENALVA DE SOUZA e EDMAR PENALVA DE SOUZA**. Dedico a todos os meus **PROFESSORES** desde a alfabetização até o curso superior (a todos os docentes da FEMAT) em especial o professor **MARCIO PAULO DE ARAÚJO MAFRA** e o professor **MSc. LUIS FERNANDO NAZARÉ MARQUES** pelo apoio que me deram nesse trabalho e no curso. Dedico a todos os meus **AMIGOS e FAMILIARES** que me apoiaram e acreditaram em mim, nessa jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas, de diferentes maneiras e em diferentes oportunidades, contribuíram para a realização desse trabalho.

Agradeço de modo especial a minha mãe Marlene Penalva, pela sua dedicação e apoio nos momentos mais difícil da minha graduação;

Ao professor Marcio Paulo de Araújo Mafra pela orientação e pelo apoio durante esse trabalho, pelas contribuições inestimáveis;

Ao professor Msc. Luis Fernando Nazaré Marques por disponibilizar a matéria prima e a literatura.

Agradeço aos meus amigos Milton Adalberto, Luís Lima de Sousa, Carlos Vinicius de Paes Santos sempre presente e eternos amigos pela atenção que me dispensaram em muitas oportunidades.

Agradeço também a minha namorada Roberia Moura de Miranda pelo apoio durante o período do meu retorno a Marabá;

Agradeço ao apoio do amigo Nilton Cesar Mapa, sempre me ajudou durante meu estágio e no decorrer do meu TCC;

E as valiosas observações dos professores Msc. Luis Fernando Nazaré Marques, Marcio Paulo de Araújo Mafra, e Dr. Luiz Moreira Gomes, professores que fizeram parte da banca examinadora do trabalho de conclusão de curso defendida na Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia de Materiais- Campus de Marabá.

EPÍGRAFE

“Qualquer caminho é apenas um caminho e não constitui insulto algum - para si mesmo ou para os outros - abandoná-lo quando assim ordena o seu coração (...). Olhe cada caminho com cuidado e atenção. Tente-o tantas vezes quantas julgar necessárias... Então, faça a si mesmo e apenas a si mesmo uma pergunta: possui este caminho um coração? Em caso afirmativo, o caminho é bom. Caso contrário, esse caminho não possui importância alguma.”

(Carlos Castaneda)

RESUMO

Com crescente desenvolvimento do transporte marítimo no Brasil, surge a necessidade de investimento em novas tecnologias. O aço ASTM A131 é aplicado no revestimento externo e na estrutura das embarcações. Este trabalho faz um estudo sobre a tenacidade do aço ASTM A131, após ser submetido a tratamentos termoquímico de cementação, e tratamento térmico pós cementação (têmpera e revenido), com temperatura fixa e tempo variável. Para as análises experimentais, foram confeccionados 12 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. Os resultados obtidos por meio desses métodos permitiram concluir que a condição 02 (cementação a 950°C durante 4 horas, Têmpera a 850°C durante 30 minutos e Revenido a 450°C durante 15 minutos) apresentou o menor valor no ensaio de tenacidade e o maior valor no ensaio de dureza, além de apresentar em sua microestrutura a formação de grãos perlíticos, confirmando assim o aumento de dureza do material.

Palavras-chaves: Tenacidade ao impacto, cementação, tempera e revenido.

ABSTRACT

With increasing development of maritime transport in Brazil, there is a need for investment in new technologies. The steel ASTM A131 is applied to the outer casing and structure of the vessels. This work is a study on the toughness of ASTM A131 steel, after undergoing thermochemical treatments carburizing, hardening and heat treatment powders (quenching and tempering) with fixed temperature and variable time. For experimental analysis, 12 were prepared test samples for testing impact with the dimensions defined by the international standard ASTM E23-94 and 05 samples approximately 30 mm long by 20 mm wide and 10 mm thick for testing hardness and metallography. The results obtained by these methods showed that the condition (02 carburizing at 950 ° C for 4 hours, tempering at 850 ° C for 30 minutes and tempering at 450 ° C for 15 minutes) showed the lowest value in testing the tenacity and the highest hardness test, and present in its microstructure formation of pearlitic grains, thus confirming the increased hardness of the material.

Keywords: Tenacity impact, carburizing, and tempering temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de Fase Ferro-Carbeto de ferro (Fe-Fe ₃ C)	18
Figura 2- Região eutetóide do diagrama FeC e microestrutura esquemática de um aço eutetóide em condições de resfriamento	21
Figura 3- (a) Limite de escoamento, limite de resistência à tração e dureza Brinell em função da concentração de carbono para aços-carbonos que possuem microestruturas compostas por perlita fina. (b) Ductilidade (%AL e %RA) e a energia de impacto Izod em função da concentração de carbono para aços-carbono que possuem microestruturas composta por perlita fina ^[2]	23
Figura 4-(a) Dureza Brinell e Rockwell em função da concentração de carbono para aços-carbono que possuem microestruturas de perlita fina e grosseira, assim como cementita globulizada. (b) Ductilidade (%RA) em função da concentração de carbono para aços-carbono que possuem microestrutura de perlita fina e grosseira, assim como cementita globulizada.....	24
Figura 5- A dureza Brinell e o limite de resistência à tração (à temperatura ambiente) em função da temperatura de transformação isotérmica para uma liga ferro- carbono com composição eutetóide, medidas ao longo das faixas de temperaturas em que se formam as microestruturas bainíticas e perlíticas.	25
Figura 6- Representação esquemática do comportamento tensão- deformação em tração para materiais dúcteis e frágeis.....	27
Figura 7- Representação esquemática das curvas tensão-de-formação real e convencional	29
Figura 8- Representação esquemática do ensaio de impacto.....	31
Figura 9- Dureza Brinell.....	34
Figura 10 – Fluxograma dos ensaios realizados.	44
Figura 11 - Amostra para metalografia e microdureza do aço ASTM A131.	45
Figura 12– Fluxograma dos ensaios realizados.	46
Figura 13– Corpos de prova para ensaio de impacto.	47
Figura 14- Caixa metálica.....	49
Figura 15- Amostras distribuídas na caixa metálica	50
Figura 16– Amostras cobertas com camadas de carvão e sílica.	50
Figura 17– Amostras dentro do forno a serem retiradas	51
Figura 18 – Distribuição dos pontos realizado no ensaio de dureza em cada amostra.	54
Figura 19 – Durômetro	54
Figura 20 – Equipamento de ensaio de impacto.	55
Figura 21 – Representação esquemática do método de lixamento com trabalho em sentidos alternados.	56
Figura 22 – Micrografia da amostra 1 do Aço ASTM A131 (sem Tratamento).	59
Figura 23 - Micrografia da amostra 2 do Aço ASTM A131(Cementação a 950°C durante 4 horas, têmpera a 850°C durante 30 minutos e Revenido a 450°C durante 15 minutos), nos aumentos 500x(a) e 1000x(b).	60

Figura 24 - Micrografia da amostra 3 do Aço ASTM A131 (Cementação a 950°C durante 4 horas, têmpera a 850°C durante 30 minutos e Revenido a 450°C durante 30 minutos), nos aumentos 500x(a) e 1000x(b).....	61
Figura 25 - Micrografia da amostra 4 do Aço ASTM A131 (Cementação a 950°C durante 4 horas, têmpera a 850°C durante 60 minutos e Revenido a 450°C durante 15 minutos), nos aumentos 500x(a) e 1000x(b).....	62
Figura 26 - Micrografia da amostra 5 do Aço ASTM A131 (Cementação a 950°C durante 4 horas, têmpera a 850°C durante 60 minutos e Revenido a 450°C durante 30 minutos), nos aumentos 500x(a) e 1000x(b).....	63
Figura 27 - Gráfico de ensaio de Impacto	65
Figura 28 - Gráfico de Ensaio de Dureza	67
Figura 29 - Gráfico de Dureza x Tenacidade.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Distribuição das amostras tratadas termicamente.....	48
Tabela 2 - Distribuição das amostras para ensaio de Dureza e Metalografia.	53
Tabela 3– Energia absorvida pelos corpos de prova de impacto	64
Tabela 4– Dureza medida em todas as condições.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

CCC – Cúbico de corpo centrado

CFC – Cúbico de face centrada

SAE – Society Automotive Engineers

TTT –Tempo-temperatura-transformação

UFPA – Universidade Federal do Pará

MET - Microscópio eletrônico de transmissão

MEV - Microscópio eletrônico de varredura

MVS - Microscópio de varredura por sonda

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	14
1.1- OBJETIVOS.....	15
1.1.1- Objetivos gerais	15
1.1.2- Objetivos específicos	15
2- REVISÃO BIBLIOGRAFICA	16
2.1- Aços	16
2.1.1- Definição	16
2.1.2- Aço ASTM A131	17
2.1.2- Diagrama Ferro-Carbono (FeC)	17
2.1.3- Desenvolvimento da Microestrutura e Alteração das Propriedades Mecânicas	19
2.1.3.1- Desenvolvimento da Microestrutura em ligas de Ferro – Carbono	20
2.1.3.2- Transformações de Fases	21
2.1.3.3- Comportamento Mecânico de ligas Ferro-Carbono	22
2.2- Propriedades Mecânicas.....	26
2.2.1- Ductilidade	26
2.2.2- Tenacidade	28
2.3- Ensaios dos Materiais	29
2.3.1- Ensaio de Impacto	30
2.3.2- Ensaio de dureza	32
2.4- ANÁLISE MICROSCÓPICA	35
2.4.1- Microscopia Óptica	36
2.4.2- Microscopia Eletrônica de Varredura	36
2.5- ANÁLISE METALOGRAFICA	38
2.6- TRATAMENTO TERMOQUÍMICO	39
2.6.1- Cementação.....	39
2.7- TRATAMENTO TÉRMICO	40
2.7.1- Têmpera	40
2.7.2- Revenido	42
3-.METODOLOGIA	44
3.1- PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	44
3.2- TRATAMENTO TERMOQUÍMICO	47
3.2.1- Cementação	49

3.3- TRATAMENTO TÉRMICO	52
3.3.1 -Têmpera	52
3.3.2- Revenido	52
3.4- ENSAIO DE DUREZA	52
3.5- ENSAIO DE IMPACTO	55
3.6- ANÁLISE DE MICROSCOPIA ÓPTICA	56
4- RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1- MICROGRAFIA	58
4.1.1- Amostra do aço ASTM A131 sem Tratamento	58
4.1.2- Amostra do aço ASTM A131 submetido a tratamento	59
4.2- ENSAIO DE IMPACTO	63
4.3- ENSAIO DE DUREZA	65
4.4- COMPARATIVO ENTRE DUREZA E TENACIDADE	67
CONCLUSÕES	69
TRABALHOS FUTUROS	70
REFERÊNCIAS	71

1- INTRODUÇÃO

Há quase um século, os aços são os materiais industriais mais amplamente empregados no nosso dia a dia. O papel de destaque do aço é evidente. Possivelmente, o principal fator que levou o aço a ocupar este papel preponderante na engenharia é o amplo espectro de propriedades e características de desempenho que pode ser obtido a custos baixos, especialmente devido à disponibilidade de ferro no planeta terra e a extrema otimização dos processos de fabricação do aço ^[1].

A indústria naval brasileira permaneceu adormecida nas últimas décadas devido à sua situação econômica desfavorável e pouco competitiva em relação ao mercado mundial. No entanto, devido às novas medidas econômicas anunciadas pelo Governo Federal (obras do PAC – Programa de Aceleração ao Crescimento), espera-se a retomada das atividades do setor naval. A região Norte será uma das regiões privilegiadas com o transporte marítimo, com ampliação de porto (porto de Manaus, Belém, Santarém, Vila do Conde etc.) e construção de hidrovias (corredor rio Madeira, corredor rio Tapajós, corredor Tocantins), tornando os rios (rio Tocantins, rio Madeira, rio Amazonas etc.) da região norte navegável. Diante desse quadro bastante promissor, surge a necessidade de aprofundarmos e desenvolvermos novas tecnologias para o transporte marítimo.

O aço ASTM A131 é muito utilizado na indústria naval aplicado em cascos de navios e componentes da estrutura de navios, plataformas, barcaças e outras embarcações.

O desenvolvimento dos materiais de construções navais deve ser estudado de forma a melhorar suas propriedades. A utilização de tratamentos térmicos é um dos métodos de melhoria do material, podendo melhorar substancialmente essas propriedades. Uma das principais características dos tratamentos térmicos que uma liga é submetida e a sua curva de resfriamento. As ligas de aço naval são normalmente submetidas a processos de soldagem que também afetam termicamente a estrutura do material ^[14].

1.1- OBJETIVOS

1.1.1- Objetivos gerais

O objetivo principal desse trabalho é o estudo da tenacidade ao impacto de um aço ASTM A 131 submetido ao tratamento termoquímico de cementação e tratamentos térmicos pós cementação (têmpera e revenido) considerando a temperatura fixa e o tempo de tratamento variado.

1.1.2- Objetivos específicos

Avaliar as propriedades mecânicas do aço ASTM A 131 em amostra tratadas e não tratadas termicamente através dos ensaios de Impacto (Ensaio de Charpy) e Dureza.

Analisar metalograficamente as amostras tratadas e não tratadas termicamente através das imagens feita com o microscópio óptico.

2- REVISÃO BIBLIOGRAFICA

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 ^[3].

-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” ^[3];

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” ^[3].

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% ^[3].

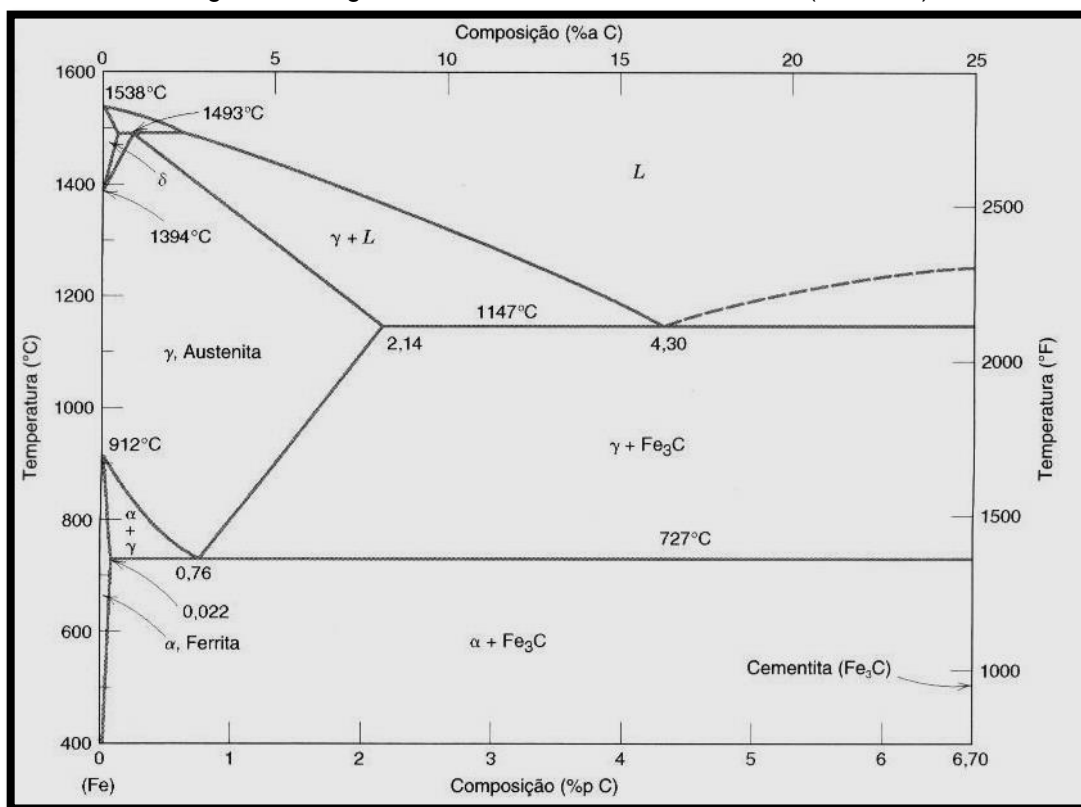
2.1.2- Aço ASTM A131

As ligas de ferro-carbono são muito utilizadas na indústria naval, dentre elas o aço Naval ASTM A131. O aço ASTM A 131 é um aço estrutural para a aplicação naval do grau A e são produzidos em forma de chapas.

2.1.2- Diagrama Ferro-Carbono (FeC)

A compreensão dos diagramas de fases para sistemas de ligas é extremamente importante, pois existe uma forte correlação entre a microestrutura e as propriedades mecânicas, e o desenvolvimento da microestrutura de uma liga está relacionado às características do seu diagrama de fases. Adicionalmente, os diagramas de fases fornecem informações valiosas sobre fusão, fundição e cristalização, entre outros fenômeno. ^[2].

O diagrama apresentado na figura 1 é um diagrama de Ferro-Carbeto de ferro (Fe-Fe₃C).

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

FONTE: [9]

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:

L (líquido) + δ (ferrita delta) \rightarrow γ (austenita);

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

L (líquido) \rightarrow γ (austenita) + Fe₃C (cementita);

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

γ (austenita) \rightarrow α (ferrita) + Fe₃C (cementita)

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.

2.1.3- Desenvolvimento da Microestrutura e Alteração das Propriedades Mecânicas.

O desenvolvimento de um conjunto de características mecânicas desejáveis para um material resulta, com frequência, de uma transformação de fases, a qual é forjada por um tratamento térmico. As dependências em relação ao tempo e à temperatura de algumas transformações de fases são representadas de uma maneira conveniente em diagramas de fases modificados. É importante saber como usar esses diagramas a fim de se projetar um tratamento térmico para uma dada liga que produzirá as propriedades mecânicas desejadas à temperatura ambiente ^[2].

2.1.3.1- Desenvolvimento da Microestrutura em ligas de Ferro – Carbono

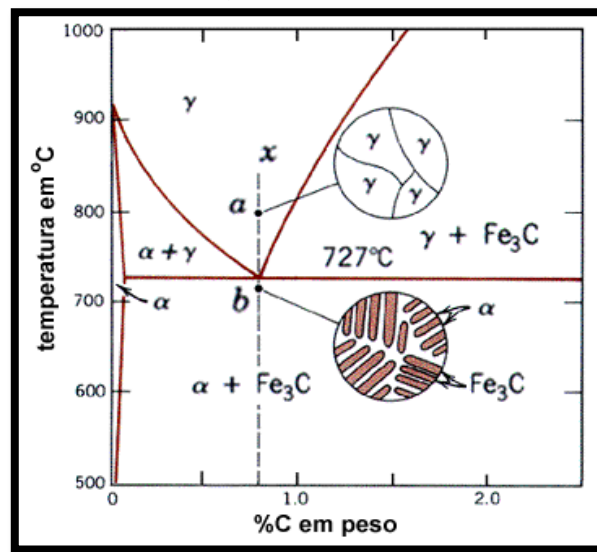
Uma das características importante do diagrama de fase FeC é o desenvolvimento da microestrutura, devido a mesma determinar as propriedades físicas e o comportamento do material. A formação da microestrutura depende tanto do teor de carbono quanto do tratamento térmico realizado, condições de resfriamento. Neste caso, a microestrutura das ligas de aço será formada com resfriamento lento e em condições de equilíbrio.

Existem várias microestruturas que podem ser produzidas em aços, iremos abordar as microestruturas de um aço eutetóide.

A reação eutetóide, em aços, produz uma microestrutura característica chamada “perlita”. A perlita não é uma fase e sim uma mistura de duas fases, ferrita e cementita, que ocorrem sob a forma de lamelas paralelas. A ferrita tem estrutura CCC e, em comparação com austenita, é menos compacta, apresentando interstícios tetraédricos menores e, conseqüentemente, tendo menor capacidade de dissolver carbono. O carbono, que é rejeitado pela formação da ferrita, dá origem à cementita. A cementita é uma fase rica em carbono, de composição Fe_3C ^[1].

A figura 2 mostra esquematicamente processo de resfriamento lento em liga de ferro-carbono com composição eutetóide. Formando uma microestrutura acima da temperatura eutetóide (ponto a) e outra microestrutura abaixo da temperatura eutetóide (ponto b), conhecida como perlita.

Figura 2- Região eutetóide do diagrama FeC e microestrutura esquemática de um aço eutetóide em condições de resfriamento



Fonte: [adaptada; 2]

2.1.3.2- Transformações de Fases

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 ^[2].

Em um 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 ^[2].

O terceiro tipo de transformação é independente da difusão e na qual se produz uma fase metaestável ^[2].

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 [2].

2.1.3.3- Comportamento Mecânico de ligas Ferro-Carbono

Será discutido o comportamento mecânico das estruturas da perlita fina e perlita grosseira, da cementita globulizada, da bainita e da martensita.

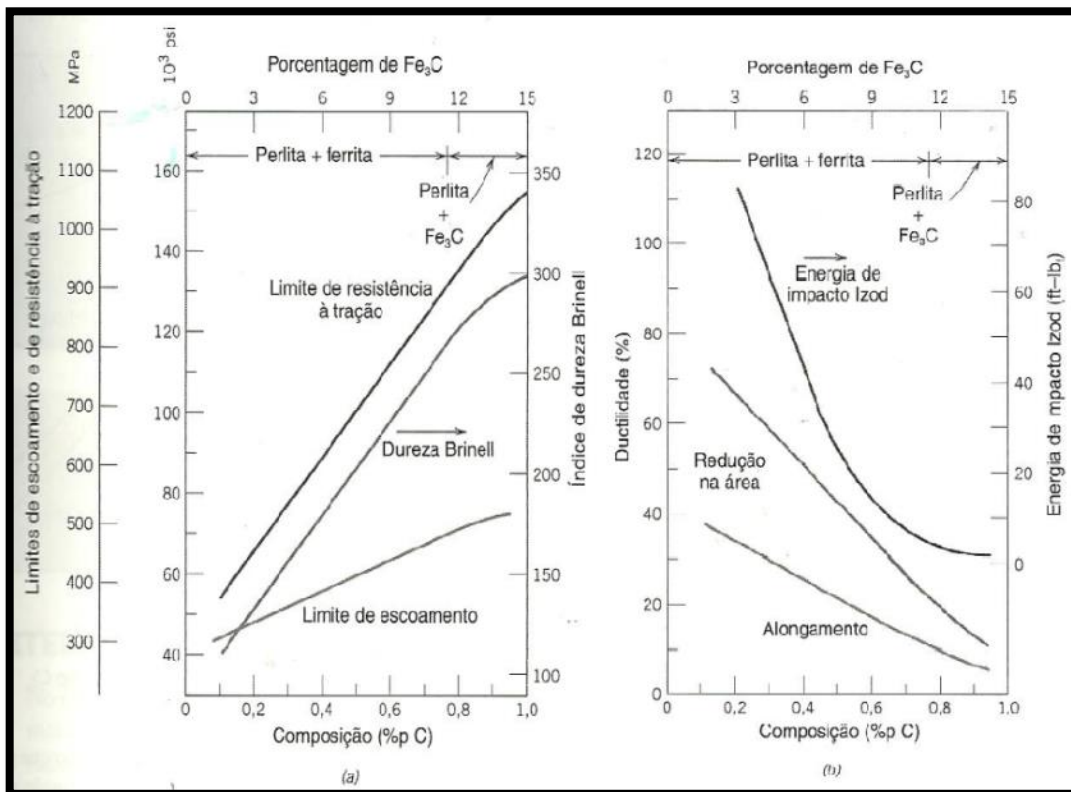
Perlita

A cementita é muito mais dura, porém mais frágil, do que a ferrita. Dessa forma, o aumento da fração de Fe_3C em uma liga de aço enquanto outros elementos microestruturais são mantidos constantes irá resultar em um material mais duro e mais resistente. Na figura 3 (a), onde os limites de resistências à tração e de escoamento, assim como os índices de dureza Brinell, estão traçados da porcentagem em peso de carbono (ou, de maneira equivalente, como uma porcentagem de Fe_3C) para aços compostos por perlita fina. Todos os três parâmetros aumentam com o aumento da concentração de carbono. Uma vez que a cementita é mais frágil, o aumento do seu teor irá resultar em uma diminuição tanto da ductilidade quanto da tenacidade (ou energia de impacto). Esses efeitos estão mostrados na figura 3 (b) para o mesmo aço com perlita fina [2].

A espessura da camada de cada fase, ferrita e cementita na microestrutura também influencia o comportamento mecânico do material. A perlita fina é mais dura e mais resistente do que a perlita grosseira [2].

As razões para esse comportamento estão relacionadas a fenômenos que ocorrem nas fronteiras entre fases α -Fe₃C. Em primeiro lugar existe um elevado grau de aderência entre duas fases através da fronteira. Portanto, a fase cementita, que é rígida, restringe severamente a deformação da fase ferrita, mais dúctil, nas regiões adjacentes à fronteira; dessa forma, pode ser dito que a cementita reforça a ferrita. O grau desse reforço é substancialmente maior na perlita fina, devido à maior área de fronteira por unidade de volume entre as fases do material.

Figura 3- (a) Limite de escoamento, limite de resistência à tração e dureza Brinell em função da concentração de carbono para aços-carbonos que possuem microestruturas compostas por perlita fina. (b) Ductilidade (%AL e %RA) e a energia de impacto Izod em função da concentração de carbono para aços-carbono que possuem microestruturas composta por perlita fina^[2].

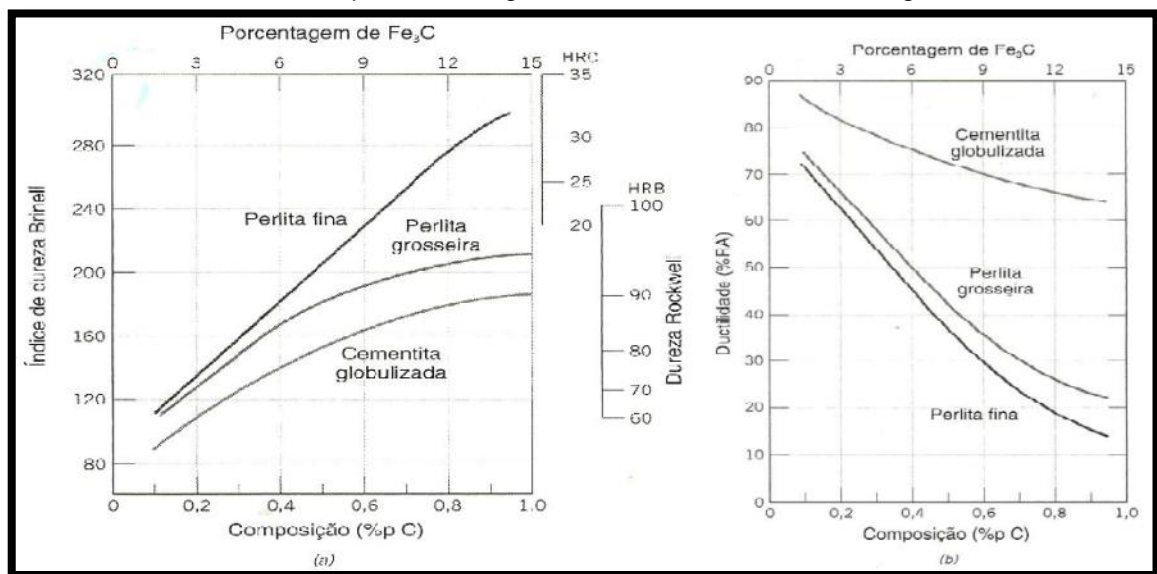


FONTE: [2]

Outros elementos da microestrutura estão relacionados à forma e à distribuição das fases. Nesse sentido, a fase cementita possui formas e arranjos bastante diferentes nas microestruturas da perlita e da cementita globulizada. As ligas que contêm microestruturas perlítica possuem maior resistência e maior dureza do que aquelas que possuem cementita globulizada. Isso está demonstrado na

figura 4(a), que comparada a dureza em função da porcentagem em peso de carbono entre cementita globulizada e os outros tipos de estruturas perlítica. Esse comportamento é novamente explicado em termos do aumento da resistência e da restrição ao movimento das discordâncias através das fronteiras entre as fases ferrita e cementita, como já foi discutido anteriormente. Existe uma menor área de fronteiras por unidade de volume na cementita globulizada e, conseqüentemente, a deformação plástica não é tão restrita, o que dá origem a um material relativamente dúctil e pouco resistente. De fato, todas as ligas de aço, aquelas que são as mais dúcteis e menos resistentes possuem uma microestrutura de cementita globulizada [2].

Figura 4-(a) Dureza Brinell e Rockwell em função da concentração de carbono para aços-carbono que possuem microestruturas de perlita fina e grosseira, assim como cementita globulizada. (b) Ductilidade (%RA) em função da concentração de carbono para aços-carbono que possuem microestrutura de perlita fina e grosseira, assim como cementita globulizada.

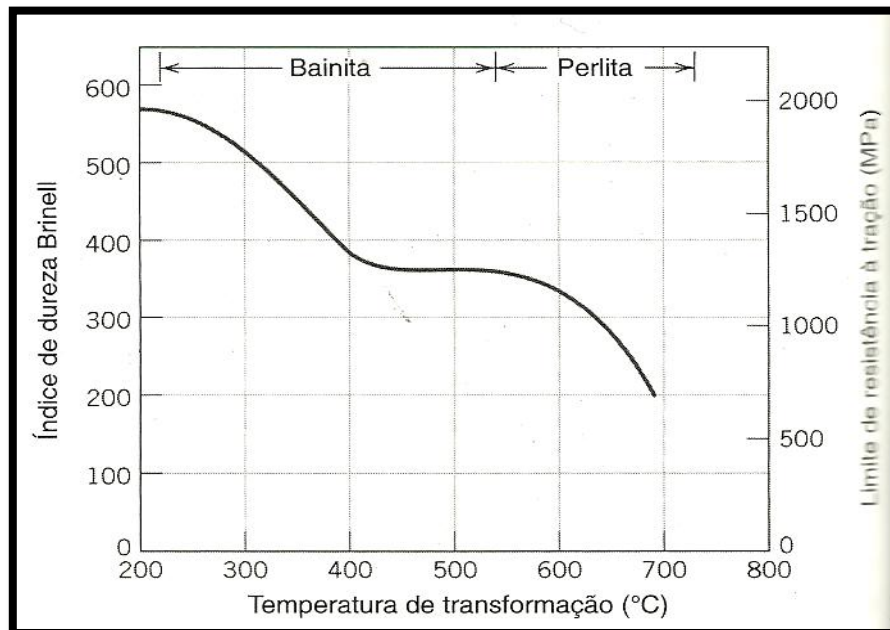


FONTE: [2]

Bainita

Uma vez que os aços bainíticos possuem uma estrutura mais fina (menores partículas de ferrita α e de Fe₃C), eles são, em geral, mais resistentes e mais duros do que os aços perlíticos; entretanto, eles ainda assim exibem uma combinação sobre o limite de resistência a tração e a dureza para a liga ferro-carbono com composição eutetóide; as faixas de temperatura nas quais a perlita e a bainita se formam estão anotado na parte superior da figura 5 [2].

Figura 5- A dureza Brinell e o limite de resistência à tração (à temperatura ambiente) em função da temperatura de transformação isotérmica para uma liga ferro- carbono com composição eutetóide, medidas ao longo das faixas de temperaturas em que se formam as microestruturas bainíticas e perlíticas.



FONTE: [2]

Das várias microestruturas que podem ser produzidas para uma dada liga de aço, a martensita é mais dura e a mais resistente e, além disso, a mais frágil; ela possui, na realidade, uma ductilidade desprezável. A sua dureza depende do teor de carbono até aproximadamente 0,6%p, como demonstra na figura 6, onde está traçada a dureza da martensita e da perlita fina em função da porcentagem em peso de carbono. Em contraste com os aços perlíticos, acredita-se que a resistência e a dureza da martensita não estejam relacionadas à sua microestrutura. Ao invés disso, essas propriedades são atribuídas à eficiência dos átomos intersticiais de carbono em restringir o movimento das discordâncias, assim como ao número relativamente pequeno de sistemas de escorregamento (ao longo dos quais as discordâncias se movem) existentes na estrutura CCC [2].

A austenita é ligeiramente mais densa do que a martensita e, portanto, durante a transformação de fases que ocorre na têmpera, há um aumento no volume da liga. Consequentemente, quando peças relativamente grandes são temperadas rapidamente, elas podem trincar como resultado de tensões internas; isso se torna problema, especialmente quando o teor de carbono é maior do que aproximadamente 0,5%p [2].

2.2- Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas pela realização de experimentos de laboratório cuidadosamente projetados, que reproduzem o mais fielmente possível as condições de serviço. Fatores que devem ser considerados incluem a natureza da carga aplicada e a duração de sua aplicação, assim como as condições ambientais. A carga pode ser de tração, de compressão ou de cisalhamento, e a sua magnitude pode ser constante ao longo do tempo ou variar continuamente. O tempo de aplicação pode ser de apenas uma fração de um segundo ou se estender por um período de muitos anos. A temperatura de operação também pode ser um fator importante [2].

Os ensaios mecânicos permitem a determinação de propriedades mecânicas que se refe

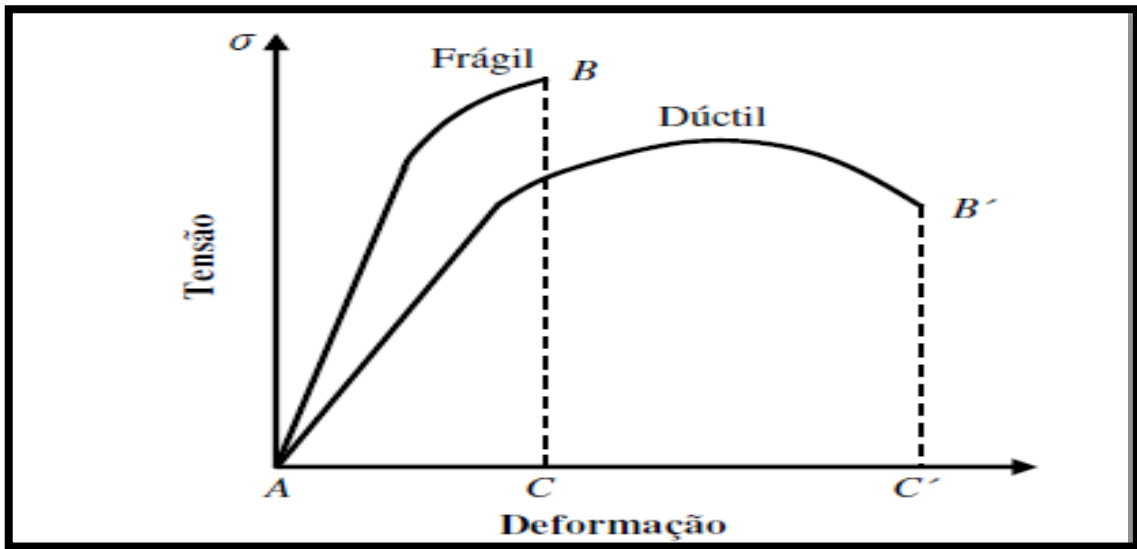
rem ao comportamento do material quando sob a ação de esforços e que são expressas em função de tensões e/ou deformações. Tensões representam a resposta interna aos esforços externos que atuam sobre uma determinada área em um corpo [4].

Entre as propriedades mecânicas dos materiais existentes, podemos citar: Resistência, Elasticidade, Plasticidade, Tenacidade, Resiliência, ductilidade, entre outras.

2.2.1- Ductilidade

A ductilidade é uma propriedade mecânica importante. Ela representa uma medida do grau de deformação plástica que o material suportou até a fratura. Um material que experimenta uma deformação plástica muito pequena ou mesmo nenhuma quando da sua fratura é chamado de *frágil*. Os comportamentos tensão-deformação em tração para materiais dúcteis e frágeis estão ilustrados esquematicamente na Figura 6.

Figura 6- Representação esquemática do comportamento tensão- deformação em tração para materiais dúcteis e frágeis.



FONTE: [Adaptado ;4].

A ductilidade pode ser expressa quantitativamente tanto pelo alongamento percentual como pela redução de área percentual.

O alongamento percentual $AL\%$ é a porcentagem da deformação plástica quando do momento da fratura, ou:

$$AL\% = \left(\frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \cdot 100 \quad (01)$$

Onde l_f representa o comprimento da porção útil do corpo de prova no momento da fratura e l_0 o comprimento útil original. O valor de l_0 deve ser especificado quando os valores do alongamento percentual forem citados (frequentemente, $l_0 = 50 \text{ mm}$ ou 2 pol.).

A redução de área percentual, $RA\%$, também chamada de estrição, é definida como sendo:

$$RA\% = \left(\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \cdot 100 \quad (02)$$

Onde A_0 é a área original da seção reta transversal do corpo de prova e A_f é a área da seção reta transversal no ponto de fratura. A maioria dos metais possui

um grau moderado de ductilidade à temperatura ambiente; contudo, alguns se tornam frágeis à medida que a temperatura é reduzida.

Um conhecimento da ductilidade dos materiais é importante, pois dá uma indicação do grau segundo o qual uma estrutura irá se deformar plasticamente antes de fraturar, bem como especifica o grau de deformação permissível durante operações de fabricação.

Os materiais frágeis são considerados como aqueles que possuem deformação de fratura inferior a aproximadamente 5% [8].

2.2.2- Tenacidade

A *Tenacidade* representa uma medida da capacidade de um material em absorver energia até a fratura.

A geometria do corpo de prova, bem como a maneira como a carga é aplicada, são fatores importantes nas determinações de tenacidade.

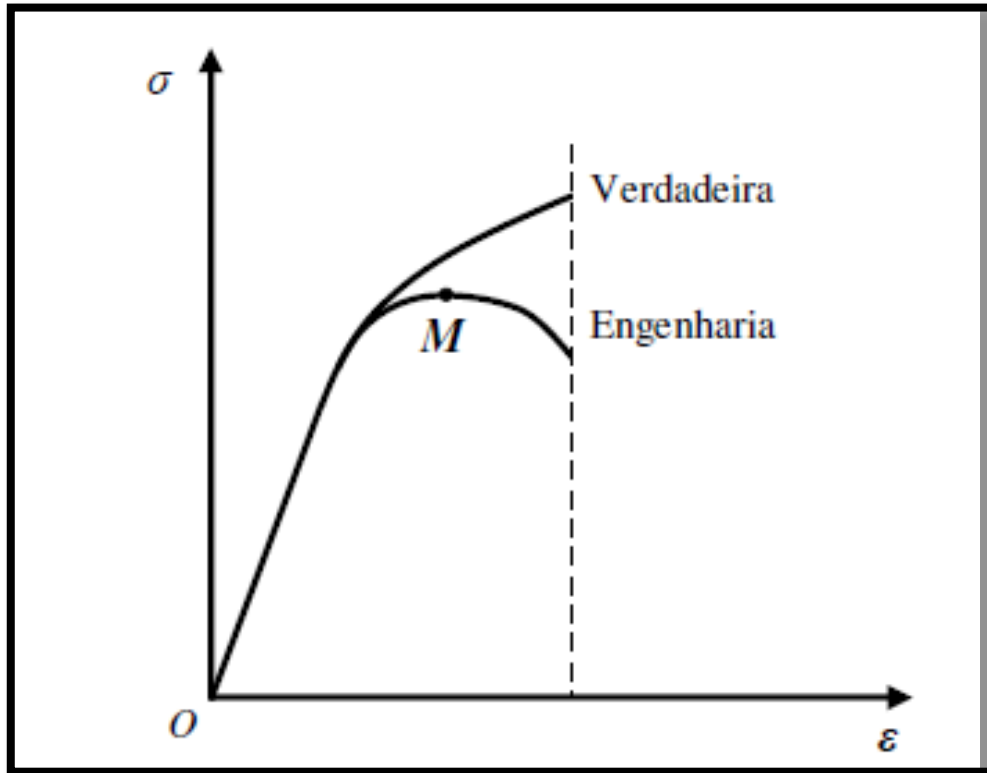
Para condições de carregamento dinâmicas (elevada taxa de deformação), e quando um entalhe ou ponto de concentração de tensão está presente, a tenacidade ao entalhe é averiguada pelo uso de um ensaio de impacto. Além disso, a tenacidade à fratura é uma propriedade indicativa da resistência do material à fratura quando este possui uma trinca.

Para uma situação estática ou quase estática (pequena taxa de deformação), a tenacidade pode ser determinada a partir dos resultados de um ensaio de tensão-deformação em tração. Nesse caso, ela pode ser considerada como sendo a área sob a curva até o ponto de fratura.

As unidades para a tenacidade são as mesmas para a resiliência, isto é, energia por unidade de volume do material.

Para que um material seja tenaz, ele deve apresentar tanto resistência como ductilidade, e frequentemente, materiais dúcteis são mais tenazes do que materiais frágeis. Isto está demonstrado na Figura 3.6, onde as curvas tensão-deformação estão plotadas para ambos os tipos de materiais. Assim, embora o material frágil tenha maior limite de escoamento e maior limite de resistência à tração, ele possui menor tenacidade do que o material dúctil, em virtude de sua falta de ductilidade; isso é deduzido pela comparação das áreas ABC e AB'C' na figura 6.

Figura 7- Representação esquemática das curvas tensão-deformação real e convencional



FONTE: [4]

Pode se considerar, de forma similar ao módulo de resiliência, a área total abaixo da curva tensão-deformação de engenharia como o módulo de tenacidade (U_t). Com esse cálculo é mais difícil, algumas vezes são usadas as seguintes aproximações:

- materiais dúcteis

$$U_t \approx \sigma_r \cdot \varepsilon_r \quad (03)$$

- materiais frágeis

$$U_t \approx \frac{2}{3} \sigma_r \cdot \varepsilon_r \quad (04)$$

Onde σ_r é a tensão de ruptura e ε_r é o alongamento correspondente a essa tensão de ruptura [8].

2.3- Ensaio dos Materiais

2.3.1- Ensaio de Impacto

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), sendo o impacto obtido por meio da queda de um martetele ou pêndulo, de uma altura determinada, sobre a peça a examinar. As massas utilizadas no ensaio 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 ^[4].

O ensaio de impacto é um ensaio dinâmico empregado para análise de fratura frágil de materiais. O resultado é simplesmente representado por uma média 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. Como já vimos, dois tipos padronizados de ensaios de impacto são: Charpy e Izod. Em ambos os casos, o corpo-de-prova tem o formato de uma barra de secção transversal quadrada, na qual é usinado um entalhe em forma de V. o equipamento de ensaio, juntamente com os tipos de corpo-de-prova, é apresentado na figura 8 ^[4].

Figura 8- Representação esquemática do ensaio de impacto.



FONTE: [4]

A carga é aplicada pelo impacto de um martelo pendular, que é liberado a partir de uma posição padronizada e uma altura fixada (H_q). Após o pêndulo ser liberado, sua ponta choca-se e fratura o corpo-de-prova no entalhe, que atua como um concentrador de tensões. O pêndulo continua seu movimento após o choque, até uma altura (h_r) menor que a altura liberação do pêndulo (H_q). A energia absorvida no impacto é determinada a partir da diferença entre H_q e h_r , ambas medidas na escala do equipamento [4].

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.

As diferenças fundamentais entre o Charpy e o Izod residem na forma em que o corpo-de-prova é montado (horizontal ou vertical), conforme mostra a figura 8 B, e na face do entalhe, localizada ou não na região de impacto. Variáveis como o

tamanho e a forma do corpo-de-prova e a profundidade e configurações do entalhe influenciam os resultados dos testes. As energias de impacto são interesse no aspecto comparativo entre diferentes materiais. Entretanto, seus valores absolutos isoladamente não representam informação quantitativa das características dos materiais.

A principal função dos ensaios Charpy e Izod consiste em determinar se um material apresenta ou não uma transição dúctil-frágil com o decréscimo da temperatura e, caso presente, em que faixa de temperaturas ocorre o fenômeno. A transição dúctil-frágil é relacionada com a temperatura pela energia de impacto medida no ensaio ^[4].

Em temperaturas mais elevadas, a energia de impacto é relativamente alta e é compatível com um modo dúctil de fratura. À medida que a temperatura diminui, a energia de impacto cai subitamente ao longo de um intervalo de temperaturas relativamente pequeno, abaixo do qual a energia de impacto apresenta um valor baixo e essencialmente constante; nesse intervalo, o modo de fratura é frágil ^[4].

A aparência da superfície de fratura é um indicativo da natureza da fratura e pode ser usada na determinação de temperatura de transição. Assim, para a fratura dúctil, a superfície apresenta uma aparência fibrosa, grosseira (com características de fratura por cisalhamento). Ao contrário, superfícies frágeis apresentam uma textura granular e de aspecto mais plano ^[4].

2.3.2- Ensaio de dureza

A dureza é uma propriedade mecânica cujo conceito se segue à resistência que um material, quando pressionado por outro material ou por marcadores padronizados, apresenta ao risco ou à formação de uma marca permanente. Os métodos mais aplicados em engenharia utilizam-se de penetradores com formato padronizado e que são pressionados na superfície do material sob condições específicas de pré-carga e carga, causando inicialmente deformação elástica e em seguida deformação plástica. A área da marca superficial formada ou a sua profundidade são medidas e correlacionada com um valor numérico que representa

a dureza do material. Esta correlação é baseada na tensão de que o penetrador necessita para vencer a resistência da superfície do material [4].

A dureza de um material depende diretamente das forças de ligação entre átomos, íons ou moléculas, assim como da resistência mecânica. Nos sólidos moleculares, como os plásticos, as forças atuantes entre as moléculas (forças de Van der Waals) são baixas, e eles são relativamente macios. Os sólidos metálicos e iônicos, devido à natureza mais intensa das forças de ligação, são mais duros, enquanto os sólidos de ligação covalente são os materiais conhecidos de maior dureza. A dureza dos metais pode também ser aumentada por tratamentos especiais, como adição de soluto, trabalho a frio, endurecimento por precipitação ou tratamento térmico [4].

Na dureza por penetração, podemos destacar a dureza Brinell, Rockwell e Vickers.

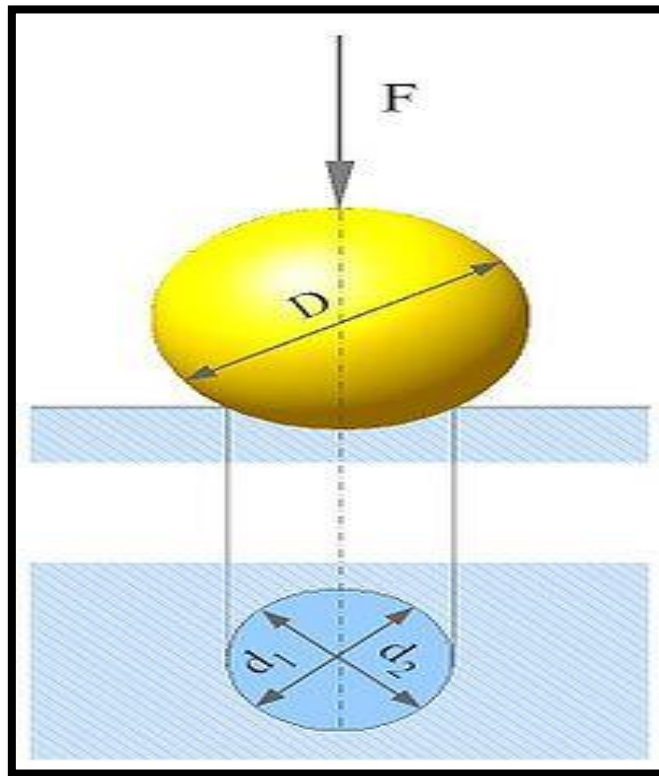
O ensaio de dureza Brinell consiste em comprimir lentamente uma esfera, de aço temperado ou de carbeto de tungstênio, de diâmetro (D), sobre uma superfície plana, polida e limpa de um metal, por meio de uma carga (F), (a carga aplicada varia entre 500 e 3000 kgf), durante um tempo (t), produzindo uma calota esférica de diâmetro (d). A carga é mantida constante por um período entre 10 e 30 segundos. A razão entre a carga aplicada sobre a área da esfera é denominado dureza Brinell [7].

$$HB = \frac{2p}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (05)$$

Sendo que (P) é carga aplicada (em Kgf); (d) é o diâmetro da calota ou diâmetro da impressão (em mm) e (D) é o diâmetro do penetrador (em mm) [7].

Dureza Brinell

Figura 9- Dureza Brinell



FONTE: [7]

A norma brasileira para a realização do ensaio é a NBR-6394(ABNT), e a norma internacional de maior utilização é a ASTM E10-93 [4].

O ensaio de dureza Rockwell é o método mais utilizado internacionalmente. Esse tipo de ensaio de dureza utiliza-se da profundidade da impressão causada por um penetrador sob ação de uma carga como indicador da medida de dureza, e não há relação com a área da impressão, como no caso da dureza Brinell. A dureza Rockwell pode ser classificada como comum ou superficial, dependendo do penetrador e da pré-carga e carga aplicadas [4].

O penetrador tanto pode ser um diamante esferocônico com ângulo 120° e ponta ligeiramente arredondada ($r=0,2\text{mm}$), como uma esfera de aço endurecido, geralmente com diâmetro de 1,59 mm, existindo também nos diâmetros de 3,17 mm, 6,35 mm e 12,70mm [4].

No caso de ensaio de dureza Rockwell, utilizam-se pré-carga de 98N (10kgf) e força (total) de 589N (60kgf); 981N (100kgf) e 1471 N (150kgf); e, para dureza superficial, pré-carga de 29N (3kgf) e forças de 147N (15kgf), 294N (30kgf) e 441N (45kgf). A aplicação da pré-carga é necessária para eliminar a ação de eventuais defeitos superficiais e ajudar na fixação do corpo-de-prova no suporte, além de causar pequena deformação permanente, eliminando erros causados pela deformação elástica ^[4].

A profundidade de penetração é correlacionada pela máquina de ensaio a um número arbitrário, cuja leitura é feita diretamente na escala da máquina, após a retirada da carga total, mantendo-se, entretanto a carga inicial ^[4].

2.4- ANÁLISE MICROSCÓPICA

Ocasionalmente, é necessário ou desejável examinar os elementos estruturais e os defeitos que influenciam as propriedades dos materiais. Alguns elementos estruturais possuem dimensões macroscópicas, isto é, são suficientemente grandes para serem observados a olho nu. Por exemplo, a forma e o tamanho ou diâmetro médios dos grãos para uma amostra policristalina são características estruturais importantes. Entretanto, na maioria dos materiais, os grãos constituintes possuem dimensões microscópicas, com diâmetros que podem ser da ordem de alguns micra, e os seus detalhes devem ser investigados utilizando-se algum tipo de microscópio ^[2].

O exame microscópico é uma ferramenta extremamente útil no estudo e na caracterização dos materiais. Aplicações importantes das análises microestruturais são: assegurar que as associações entre propriedades e a estrutura (e os defeitos) sejam compreendidas da forma correta; prever as propriedades dos materiais uma vez que essas relações tenham sido estabelecidas; projetar ligas com novas combinações de propriedades; determinar se um material foi ou não tratado termicamente da maneira correta; e verificar o modo de uma fratura mecânica ^[2].

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 [2].

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.

2.4.2- Microscopia Eletrônica de Varredura

Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é um instrumento muito versátil e usado rotineiramente para a análise microestrutural de materiais sólidos. Apesar da complexidade dos mecanismos para a obtenção da imagem, o resultado é uma imagem de muito fácil interpretação.

O aumento máximo conseguido pelo MEV fica entre o microscópio ótico (MO) e o Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET). A grande vantagem do MEV em relação ao microscópio ótico é sua alta resolução, na ordem de 2 a 5 nm ($20 - 50 \text{ \AA}$) - atualmente existem instrumentos com até 1 nm (10 \AA) - enquanto que no ótico é de 0,5 μm . Comparado com o MET a grande vantagem do MEV está na facilidade de preparação das amostras.

Entretanto, não é apenas estas características que fazem do MEV uma ferramenta tão importante e tão usada na análise dos materiais. A elevada profundidade de foco (imagem com aparência tridimensional) e a possibilidade de

combinar a análise microestrutural com a microanálise química são fatores que em muito contribuem para o amplo uso desta técnica. A observação e análise de fratura teve um grande avanço com o uso do microscópio eletrônico de varredura [6].

Uma imagem da estrutura que está sendo investigada é formada usando feixes de elétrons no lugar de radiação luminosa. De acordo com a mecânica quântica, um elétron a alta velocidade terá características ondulatórias, possuindo um comprimento de onda que é inversamente proporcional à sua velocidade. Quando acelerado através de grandes voltagens, os elétrons podem adquirir comprimento de onda da ordem de 0,003nm (3pm). As grandes ampliações e poderes de resolução desses microscópios são consequências dos curtos comprimentos de onda dos feixes de elétrons. O feixe de elétrons é focado e a imagem é formada por lentes magnéticas; em todos os demais aspectos, a geometria dos componentes do microscópio é essencialmente a mesma dos sistemas ópticos. Ambos as modalidades de operação, com feixes de transmissão e de reflexão, são possíveis para os microscópios eletrônicos [2].

Existem alguns tipos de microscópio eletrônico, entre eles, temos o microscópio eletrônico de transmissão (MET), microscópio eletrônico de varredura (MEV) e o microscópio de varredura por sonda (MVS). Neste trabalho iremos abordar o MEV.

No MEV a superfície de uma amostra a ser examinada é varrida com um feixe de elétrons e o feixe de elétrons refletido (ou retro espelhado) é coletado e, então, exibido, na mesma taxa de varredura, sobre um tubo de raios catódicos (semelhante à tela de uma TV). A imagem na tela pode ser fotografada representa as características da superfície da amostra. A superfície pode ou não estar polida e atacada quimicamente, porém ela deve ser condutora de eletricidade; um revestimento metálico muito fino deve ser aplicado sobre matérias não condutores. São possíveis ampliações que variam entre 10 e mais de 50.000 vezes, da mesma forma que também são possíveis profundidades de campo muito grandes. Equipamentos acessórios permitem análises qualitativas e semiquantitativas da composição de elementos em áreas bem localizadas da superfície [2].

2.5- ANÁLISE METALOGRÁFICA

No Brasil, este conceito chegou apenas em 1907, com o auxílio de Antônio Francisco de Paula Souza, que pretendendo a ampliação do seu gabinete, enviou Pujol à Europa, e este quando retornou trouxe consigo material didático e um microscópio Zeiss do tipo Martens, permitindo a instalação de um laboratório de metalografia microscópica no gabinete da Resistência de Materiais da Escola Politécnica ^[12].

Contudo, a partir da década de 30, devido ao trabalho contínuo de Hubertus Colpaert, a técnica de metalografia se consolidou no Brasil como um importante material de ensino e de desenvolvimento industrial, principalmente nos casos de análises de falha, controle de qualidade, engenharia reversa e características microestrutural através de tratamentos termo-mecânico. Nos dias atuais devido ao grande avanço na área de materiais, com constantes descobertas de novas ligas, a metalografia tornou-se ainda mais essencial no âmbito industrial brasileiro, sendo indispensável durante o processo de qualidade e verificação dos materiais utilizados pela indústria metal-mecânica nacional ^[12].

Existem dois tipos de análise metalográfica, a análise macrográfica e a análise micrográfica, sendo que a primeira é uma análise a olho nu, e a segunda é uma análise com a utilização do microscópio, neste trabalho iremos abordar a análise micrográfica.

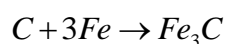
O ensaio micrográfico, consiste no estudo dos produtos metalúrgicos, com o auxílio do microscópio, onde se pode observar as fases presentes e identificar a granulação do material (Tamanho de grão), o teor aproximado de carbono no aço, a natureza, a forma, a quantidade, e a distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões ^[11].

2.6- TRATAMENTO TERMOQUÍMICO

2.6.1- 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 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 [14].

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 emprego, 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 a têmpera imediata, o resfriamento

lento após a cementação, é vantajoso para peças que devem acabada antes da têmpera ^[14].

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) então ser tão limpo quanto os outros processos de cementação ^[14].

2.7- TRATAMENTO TÉRMICO

2.7.1- Têmpera

Uma das características mais importante dos aços como materiais de construção mecânicas é a possibilidade de desenvolver ótimas combinações de resistências e tenacidade (medida pela resistência ao impacto). A estrutura que classificamente permite tais combinações é a estrutura martensítica revenida ^[1].

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 ^[1].

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 ^[3].

Os meios gasosos mais comuns, além do ar, são gases inertes, como nitrogênio, hélio e argônio ^[3].

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 ^[1].

Como na têmpera o constituinte final desejada 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 ^[3].

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 ^[3].

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 ^[3].

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 ^[3].

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 ^[3].

2.7.2- 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 ^[3].

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 ^[1].

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;

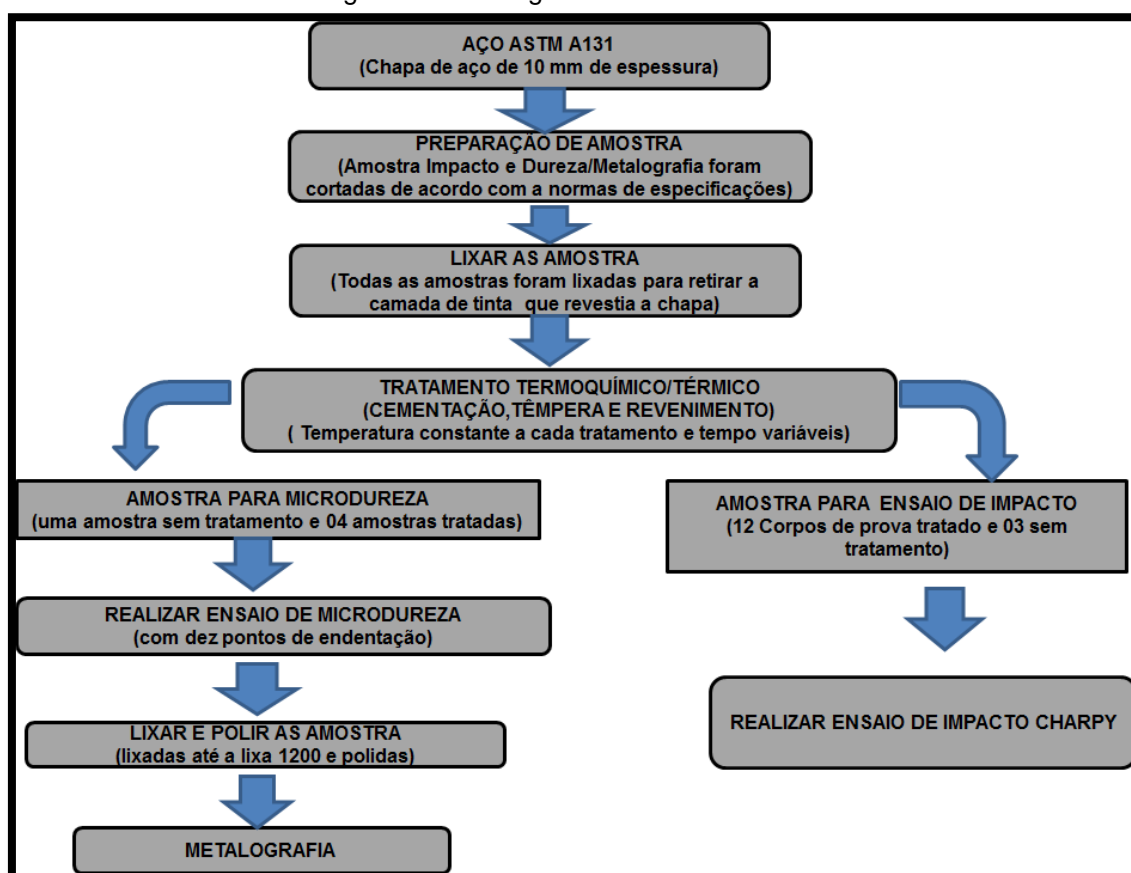
- Entre 200° e 300°C – às vezes chamado de 2º estágio – ocorre transformação de austenita em ferrita e cementita em aços-carbono de médio e alto teor de carbono; a dureza Rockwell continua a cair;
- Entre 250° e 350°C – às vezes chamado de 3º estágio do revenido – forma-se um carboneto metaestável, de 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, ocorre 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 ^[3].

3-.METODOLOGIA

Para as análises experimentais, foram confeccionadas amostras, tratadas termicamente em diferentes temperaturas e tempos, conforme o fluxograma da figura 10, posteriormente passaram por ensaio de impacto Charpy, metalografia, ensaio de dureza e microscopia óptica.

Figura 10 – Fluxograma dos ensaios realizados.



FONTE: Autor

3.1- PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A partir de uma chapa de aço ASTM A131, foram cortados cinco amostras (para realizar a metalografia e a microdureza) de aproximadamente 30 mm de comprimento por 20 mm de largura e a espessura seguia o padrão da chapa (10 mm) (figura 11). Essas amostras foram cortadas com máquina de corte, utilizando disco abrasivo e líquido refrigerante para evitar alterações por calor nas amostras.

As amostras destinadas a Metalografia e Microdureza após serem tratadas termicamente (descrito detalhadamente no tópico 3.2) foram polidas. Esse processo se inicia na lixadeira politriz rotativa, sob refrigeração com água, com a lixa de granulação 80, passando com o intuito de retirar a camada de tinta nas superfícies das amostras, e consecutivamente foram utilizadas as lixas de granulação 100, 220, 320, 400 e 600, foi realizado o ensaio de dureza (descrito detalhadamente no tópico 3.3). Após a realização do ensaio de dureza, as amostras foram lixadas com a lixa de granulação 600, 800 e 1200, sempre girando a amostra 90 graus a cada substituição de lixa. O processo é finalizado com o polimento da amostra. As amostras foram polidas com alumina $0,3\mu$, limpa com álcool etílico e algodão, finalizando o processo as amostras foram atacadas com Nital 3% (com o objetivo de identificar as fases presentes) por aproximadamente 10 segundos. Passando esse tempo as amostras são limpas novamente com álcool pra cessar a reação e seca com um secador elétrico, consecutivamente as amostras estão preparadas para a metalografia (ensaio descrito detalhadamente no tópico 3.5).

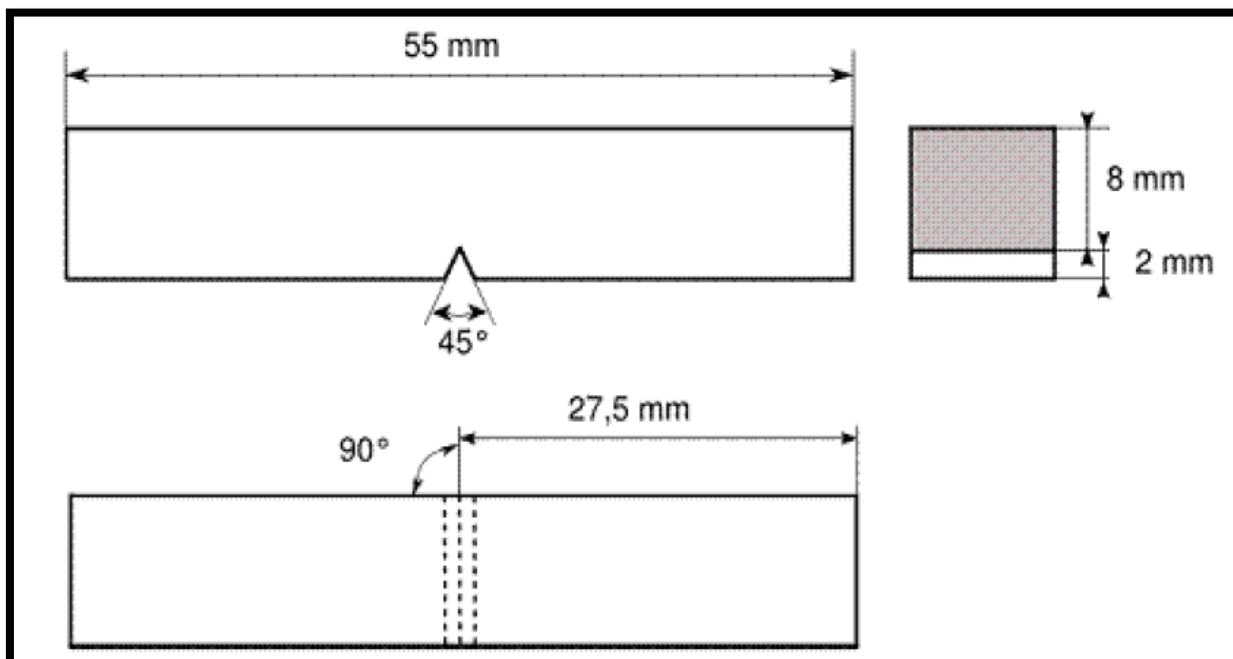
Figura 11 - Amostra para metalografia e microdureza do aço ASTM A131.



FONTE: Autor

Foram confeccionados quinze corpos de prova para o ensaio de impactos (sendo três corpos de prova para cada condição). As dimensões apropriadas para o ensaio de impacto são definidas pela norma internacional ASTM E23-94, demonstrado na figura 12.

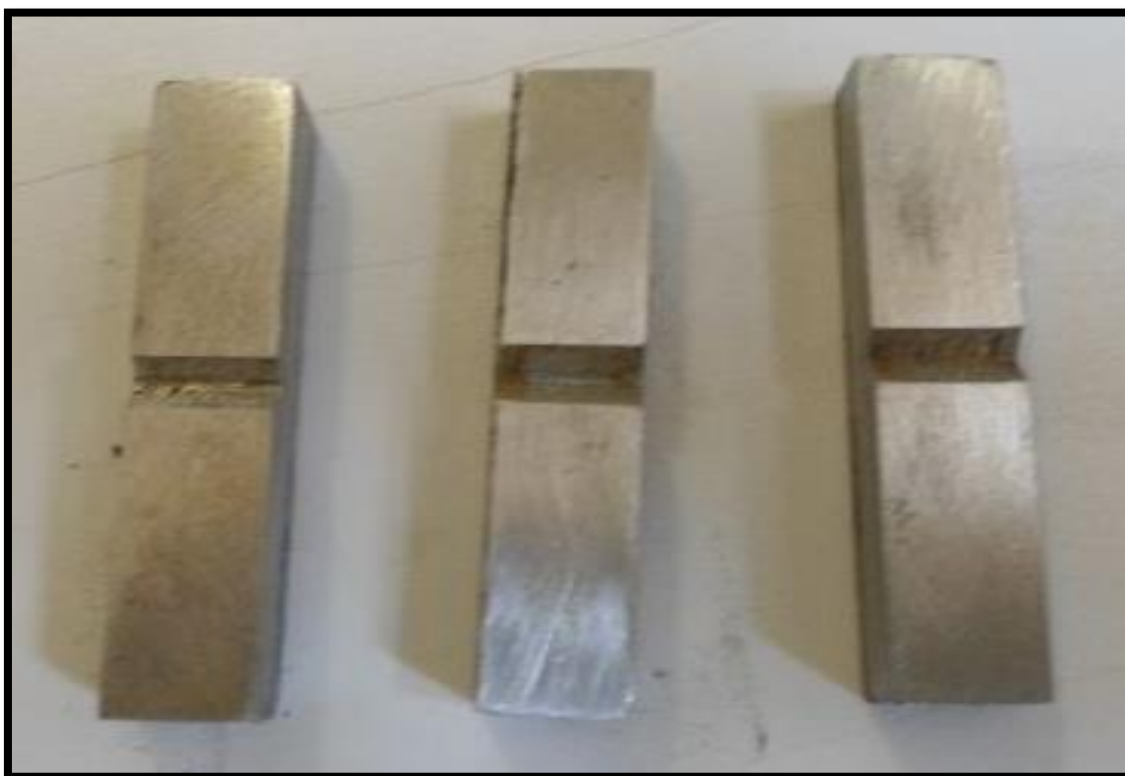
Figura 12– Fluxograma dos ensaios realizados.



FONTE: [15]

As amostras foram confeccionadas a partir de chapa metálica, na qual foi retirada uma tira com 55 mm de largura em uma plaina metálica, em seguida foi feito o chanfro em V (com o ângulo de 45°) e cortadas com 10 mm de comprimento. As rebarbas foram retiradas no esmeril e as medidas conferidas com um paquímetro, como mostra a figura 13. Posteriormente as amostras destinadas ao ensaio de impacto, foram lixadas com lixa de granulação 80, com o objetivo de retirar a camada de tinta da superfície das amostras.

Figura 13– Corpos de prova para ensaio de impacto.



FONTE: Autor

3.2- TRATAMENTO TERMOQUÍMICO

O tratamento termoquímico realizado nesse trabalho foi cementação sólida, seguindo do tratamento térmico pós cementação de têmpera e revenido. As amostras foram distribuídas de acordo com a tabela 1.

Tabela 1- Distribuição das amostras tratadas termicamente.

Tratamento Térmico	Temperatura	Tempo	Ensaio de Impacto	Metalografia / Dureza
Sem Tratamento	-	-	CP1 CP2 CP3	Amostra 1
Cementação	950 °C	4 horas	CP 4 CP 10 CP 5 CP 11 CP 6 CP 12 CP 7 CP 13 CP 8 CP 14 CP 9 CP 15	Amostra 2 Amostra 4 Amostra 3 Amostra 5
Têmpera	850°C	30 minutos	CP 4 CP 5 CP 6 CP 7 CP 8 CP 9	Amostra 2 Amostra 3
		60 minutos	CP 10 CP 11 CP 12 CP 13 CP 14 CP 15	Amostra 4 Amostra 5
Revenido	450°C	15 minutos	CP 4 CP 5 CP 6 CP 10 CP 11 CP 12	Amostra 2 Amostra 4
		30 minutos	CP 7 CP 8 CP 9 CP 13 CP 14 CP 15	Amostra 3 Amostra 5

FONTE: Autor

3.2.1- Cementação

Antes de iniciarmos o tratamento de cementação foi necessário preparar o carvão vegetal e a sílica utilizada no processo.

O carvão vegetal foi cominuído até obter uma granulometria passante na peneira 100. A sílica e o carvão cominuído foram peneirados (peneira 100 *Mesh*) e levados para estufa por 8 horas a uma temperatura de 100°C, com o objetivo de retirar toda a umidade.

Figura 14- Caixa metálica.



FONTE: Autor

Foi colocado uma camada de carvão cominuído no fundo de uma caixa metálica (figura 14), todas as amostras para ensaio de impacto metalografia e microdureza foram distribuídas sobre a camada de carvão (figura 15), em seguida, sendo cobertas com outra camada de carvão cominuído, logo após uma camada de sílica para impedir o contato do carvão com oxigênio do ar (figura 16).

Figura 15- Amostras distribuídas na caixa metálica



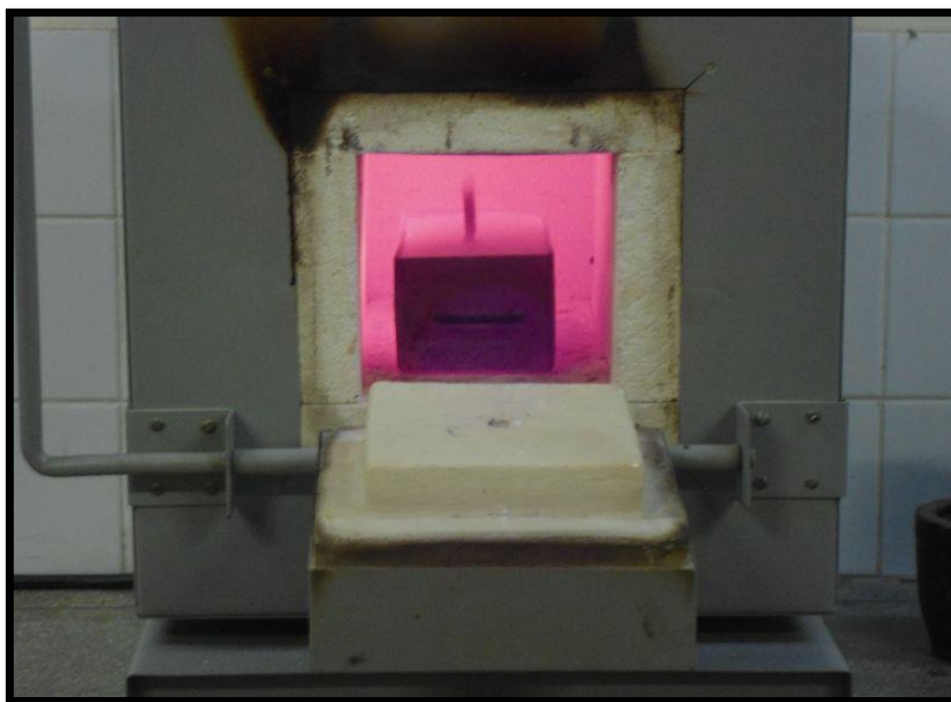
FONTE: Autor

Figura 16- Amostras cobertas com camadas de carvão e sílica.



FONTE: Autor

Figura 17– Amostras dentro do forno a serem retiradas



FONTE: Autor

A caixa metálica já contendo as amostras foi levado ao forno, após atingir uma temperatura de 950°C, manteve dentro do forno por mais 4 (quatro) horas. Ao atingir esse tempo a caixa foi retirada do forno (figura 17) e resfriada bruscamente até atingir uma temperatura de 650°C (essa redução de temperatura foi controlada com o auxílio de um termopar), ao atingir 650°C, a caixa metálica foi colocada dentro no forno e aguardou-se o resfriamento lento dentro do forno.

É preciso notar que a geração de quantidade apreciáveis de CO₂ se dá a temperatura elevadas, de modo que se deve evitar, após cementação, resfriamento muito lento até mais ou menos 650°C, pois havendo formação de quantidade apreciável de CO₂, origina-se uma casca mole ^[17].

3.3- TRATAMENTO TÉRMICO

3.3.1 -Têmpera

As amostras já cementadas foram enumeradas e distribuídas de acordo com a tabela 2, ou seja, a metade dos corpos de provas para o ensaio de impacto, e a metade das amostras para o ensaio microdureza e metalografia, foi submetido a uma têmpera de 850°C durante 30 (trinta) minutos, e a outra metade a uma têmpera de 850°C durante 60 (sessenta) minutos.

As amostras foram colocadas dentro do forno e aquecidas até 850°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 850°C.

3.3.2- Revenido

As amostras foram redistribuídas de acordo com tabela 2 para realizar o revenido, ou seja, metade das amostras temperadas a 850°C durante 30 (trinta) minutos e metade das amostras temperadas a 850°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 e dentro do forno.

3.4- ENSAIO DE DUREZA

O ensaio de dureza, foi realizado em 4 (quatro) amostras tratada termicamente e 01 (uma) amostra sem tratamento, como mostra a tabela 2.

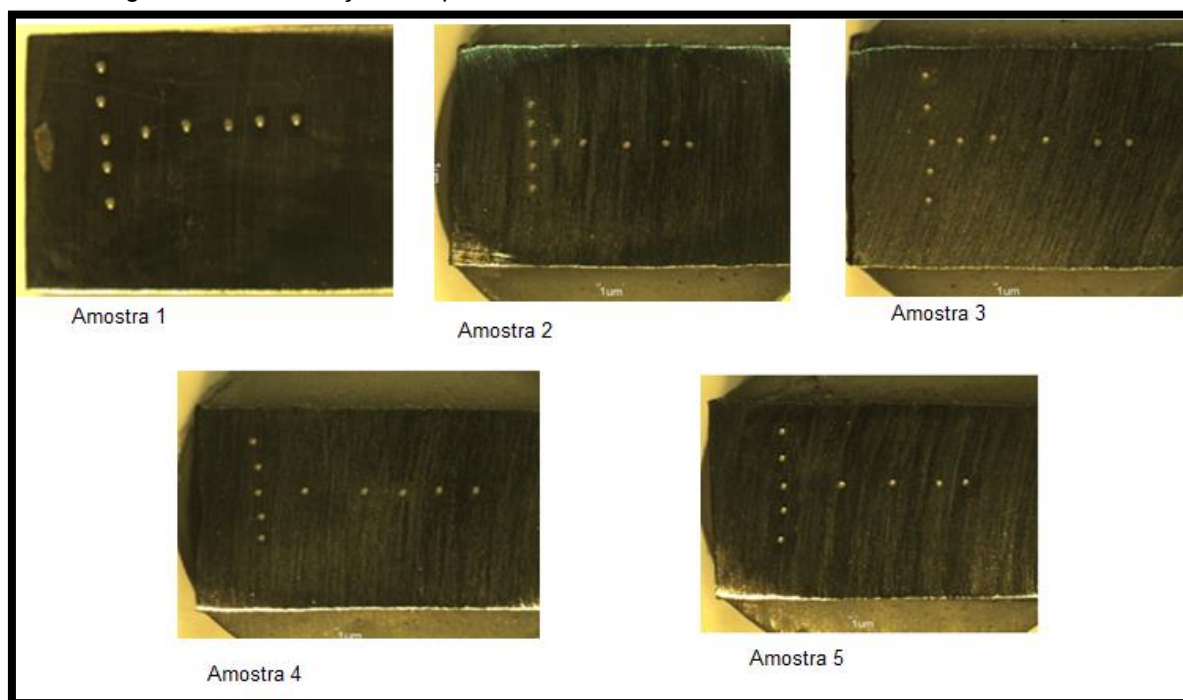
Tabela 2 - Distribuição das amostras para ensaio de Dureza e Metalografia.

Condição	Tratamento	Temperatura	Tempo
Condição 1	-	-	-
Condição 2	Cementação	950°C	4 horas
	Têmpera	850°C	30 minutos
	Revenido	450°C	15 minutos
Condição 3	Cementação	950°C	4 horas
	Têmpera	850°C	30 minutos
	Revenido	450°C	30 minutos
Condição 4	Cementação	950°C	4 horas
	Têmpera	850°C	60 minutos
	Revenido	450°C	15 minutos
Condição 5	Cementação	950°C	4 horas
	Têmpera	850°C	60 minutos
	Revenido	450°C	30 minutos

FONTE: Autor

Para a aferição da dureza das amostras foi realizado lixamento (as amostras foram lixadas até a lixa de numeração 600) e limpeza ao longo da espessura. Foram realizadas 10 medições em cada uma das amostras, obtendo no final a média aritmética (figura 18). As medições foram feitas com o durômetro da PROCEQ, modelo EQUOTIP 3, com dispositivo de impacto D (figura 19).

Figura 18 – Distribuição dos pontos realizado no ensaio de dureza em cada amostra.



FONTE: Autor

Figura 19 – Durômetro



FONTE: Autor

3.5- ENSAIO DE IMPACTO

O ensaio de impacto realizado foi o Charpy. O corpo de prova recebe uma carga aplicada pelo impacto de um martelo pendular (figura 20), o corpo de prova é apoiado nas duas extremidades e posicionado horizontalmente. O martelo é posicionado em uma altura H (o corpo de prova é a referência), ao ser liberado o martelo choca-se com a face oposta ao entalho e continua o 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 o resultado da energia absorvida pelo impacto.

Figura 20 – Equipamento de ensaio de impacto.



FONTE: Autor

O ensaio de impacto seguiu todas as exigências descritas na norma internacional ASTM-E23-94 a.

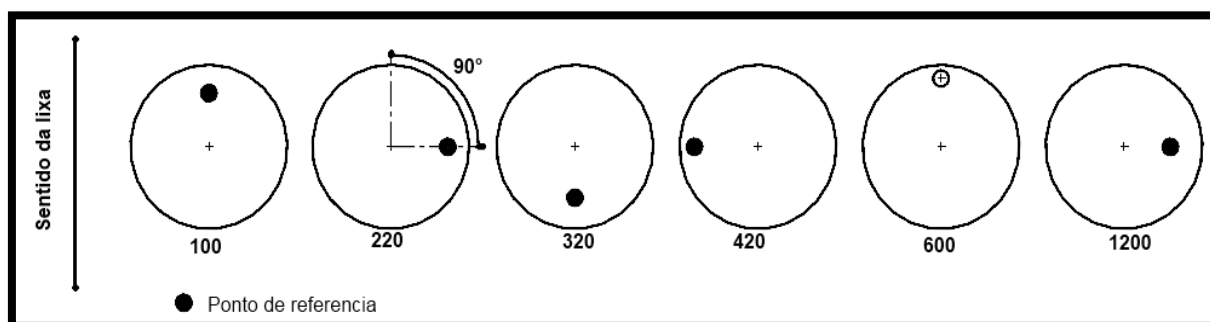
3.6- ANÁLISE DE MICROSCOPIA ÓPTICA

Para a preparação de uma superfície plana, isenta de deformações plásticas e mecânicas é necessário um correto lixamento, principalmente considerando-se a diversificação de materiais oriundos da moderna tecnologia industrial ^[10].

Operação que tem por objetivo eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície dando um acabamento a esta superfície, preparando-a para o polimento. Existem dois processos de lixamento: manual (úmido ou seco) e automático.

A técnica de lixamento manual consiste em se lixar a amostra sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se de direção (90°) em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior. (Figura 21) ^[12].

Figura 21 – Representação esquemática do método de lixamento com trabalho em sentidos alternados.



FONTE: [12]

A sequência mais adequada de lixas para o trabalho metalográfico com aços é 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 (Pode haver variações). Para se conseguir um lixamento eficaz é necessário o uso adequado da técnica de lixamento, pois de acordo com a natureza da amostra, a pressão de trabalho e a velocidade de lixamento, surgem deformações plásticas em toda a superfície por amassamento e aumento de temperatura. Esses fatores podem dar uma imagem falseada da amostra, por isso devem-se ter os seguintes cuidados:

- Escolha adequada do material de lixamento em relação à amostra e ao tipo de exame final (oque se quer analisar);

- A superfície deve estar rigorosamente limpa, isenta de líquidos e graxas que possam provocar reações químicas na superfície;
- Riscos profundos que surgirem durante o lixamento deve ser eliminado por novo lixamento;
- Metais diferentes não devem ser lixados com a utilização da mesma lixa.

A próxima etapa é o polimento, ou seja, um acabamento para retirar alguns defeitos do lixamento.

Operação pós lixamento que visa um acabamento superficial polido isento de marcas, utiliza para este fim abrasivo como pasta de diamante ou alumina ^[11].

Antes de realizar o polimento deve-se fazer uma limpeza na superfície da amostra, de modo a deixá-la isentam de traços abrasivos, solventes, poeiras e outros ^[11].

A operação de limpeza pode ser feita simplesmente por lavagem com água, porém, aconselha-se usar líquidos de baixo ponto de ebulição (álcool etílico, fréon líquido, etc.) para que a secagem seja rápida ^[11].

Posterior ao polimento, temos o ataque químico, que tem como finalidade revelar a microestrutura e os constituintes da amostra, possibilitando maior entendimento das suas propriedades, ou seja, permiti a identificação (visualização) dos contornos de grão e as diferentes fases na microestrutura ^[11].

Um reagente ácido é colocado em contato com a superfície da peça por certo tempo. O reagente causará a corrosão da superfície. Os reagentes são escolhidos em função do material e dos constituintes macroestruturais que se deseja contrastar na análise metalográfico microscópica ^[12].

Após o ataque químico, a amostra é analisada no microscópio óptico e ou no microscópio eletrônico de varredura, onde são capturado as imagem e é feito um estudo mais preciso do material.

As amostras polidas (com alumina a $0,3\mu$) e atacadas (com Nital a 3%) foram levadas ao microscópio de luz direta com câmera digital embutida. Foi feita a análise qualitativa, já que a amostra é de um aço identificado (ASTM A131).

Foram observadas e fotografadas todas as amostras tratadas (Cementação, Tempera, Revenido) e sem tratamento, nos aumentos de 500x e 1000x.

4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Todos os resultados – tratamento térmico, ensaio de impacto, dureza, micrografia - obtida através dos ensaios explicado na seção anterior estão expostas e discutidas a seguir.

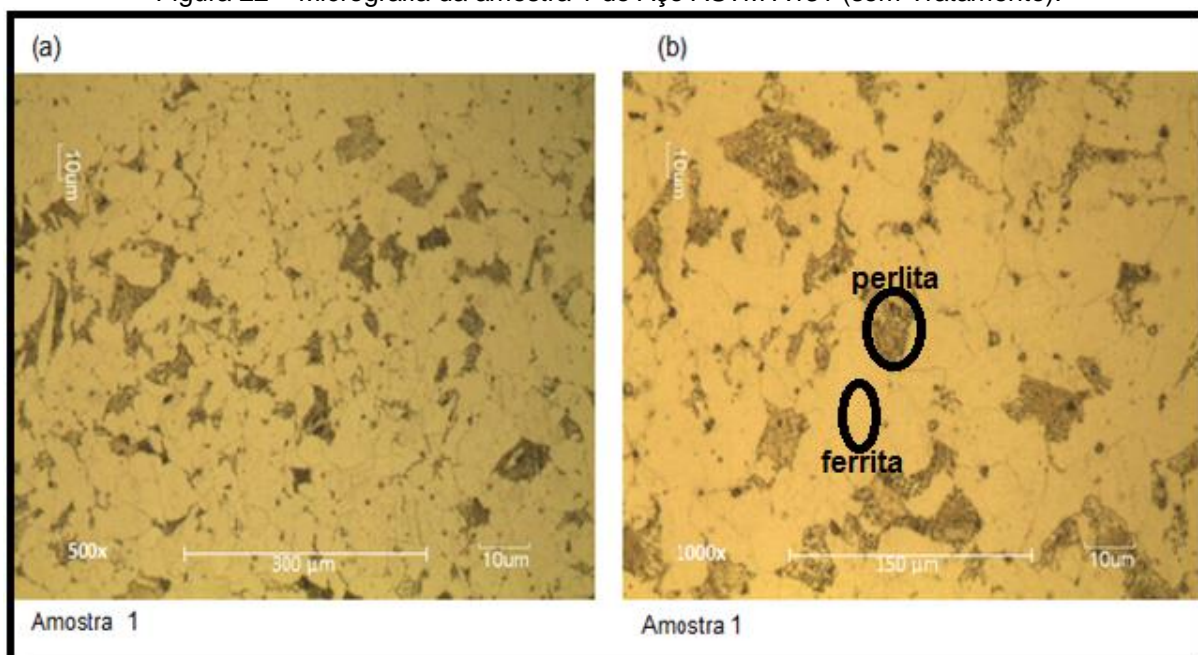
4.1- MICROGRAFIA

Foi analisado as imagens metalográfica e para cada condição formou uma microestrutura diferente, caracterização propriedades mecânicas distintas e será discutida a seguir.

4.1.1- Amostra do aço ASTM A131 sem Tratamento

A amostra 1 do aço ASTM A 131 não sofreu tratamento durante o trabalho, a micrografia (figura 22) apresenta grãos de ferrita (coloração clara), com ilhas de Perlita (coloração escura).

Figura 22 – Micrografia da amostra 1 do Aço ASTM A131 (sem Tratamento).

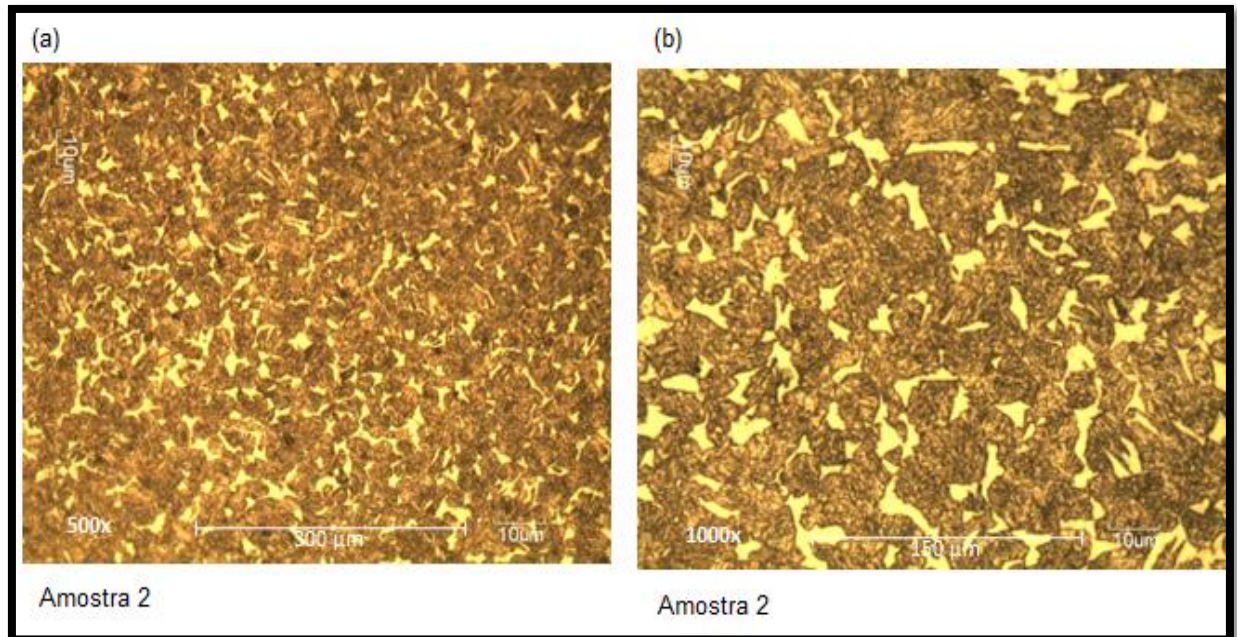


FONTE: Autor

4.1.2- Amostra do aço ASTM A131 submetido a tratamento

A amostra 2 do aço ASTM A 131 submetido a tratamento termoquímico (cimentação a 950°C durante 4 horas), e tratamento térmico pós cementação (Têmpera a 850°C durante 30 minutos e Revenido a 450°C durante 15 minutos) a micrografia (figura 23) apresenta grãos de Perlita (coloração escura), com ilhas de ferrita (coloração clara). Comparando com a amostra 1 (sem tratamento térmico) podemos perceber claramente o aumento na quantidade dos grãos de perlita.

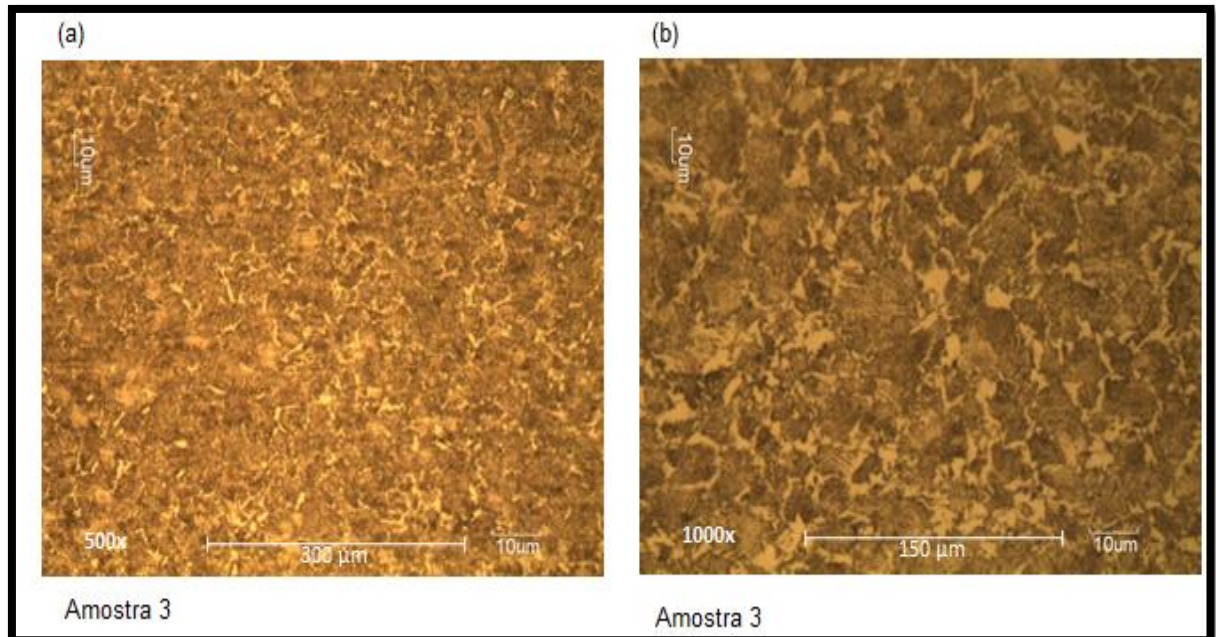
Figura 23 - Micrografia da amostra 2 do Aço ASTM A131(Cementação a 950°C durante 4 horas, têmpera a 850°C durante 30 minutos e Revenido a 450°C durante 15 minutos), nos aumentos 500x(a) e 1000x(b).



FONTE: Autor

A amostra 3 do aço ASTM A 131 submetido a tratamento termoquímico (Cementação a 950°C durante 4 horas), e tratamento térmico pós cementação (têmpera a 850°C durante 30 minutos e Revenido a 450°C durante 30 minutos), a micrografia (figura 24) apresenta grãos de Perlita (coloração escura), com ilhas de ferrita (coloração clara), a ferrita diminuiu de tamanho comparado com a micrografia da amostra 2 (figura 23). Comparando com a micrografia amostra 1 (sem tratamento) podemos perceber claramente o crescimento dos grãos de perlita.

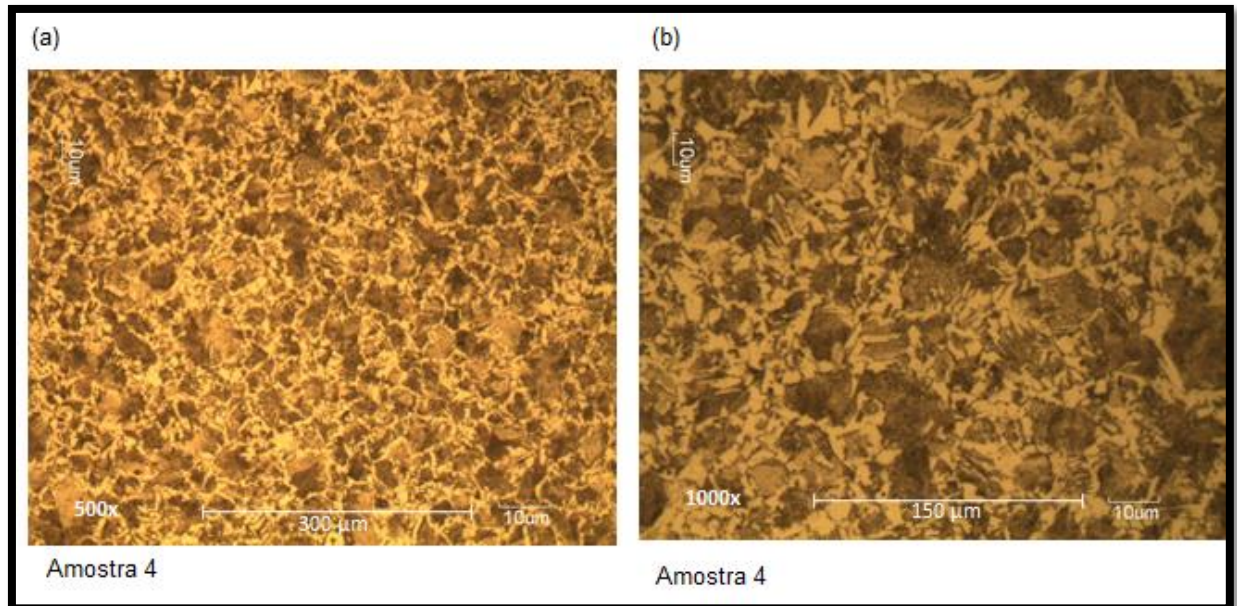
Figura 24 - Micrografia da amostra 3 do Aço ASTM A131 (Cementação a 950°C durante 4 horas, têmpera a 850°C durante 30 minutos e Revenido a 450°C durante 30 minutos), nos aumentos 500x(a) e 1000x(b).



FONTE: Autor

A amostra 4 do aço ASTM A 131 submetido a tratamento termoquímico (Cementação a 950°C durante 4 horas), e tratamento térmico pós cementação (têmpera a 850°C durante 60 minutos e Revenido a 450°C durante 15 minutos) (figura 25) apresenta grãos de Perlita (coloração escura), com ilhas de ferrita (coloração clara). Os grãos de Perlita estão em tamanhos não uniformes, ou seja, alguns grãos em tamanhos maiores e a maioria em tamanhos menores com algumas extremidades pontiagudas. Comparando com a micrografia amostra 1 (sem tratamento) podemos perceber claramente o crescimento dos grãos de perlita, porém o desenvolvimento foi menor do que as amostras 2 e 3.

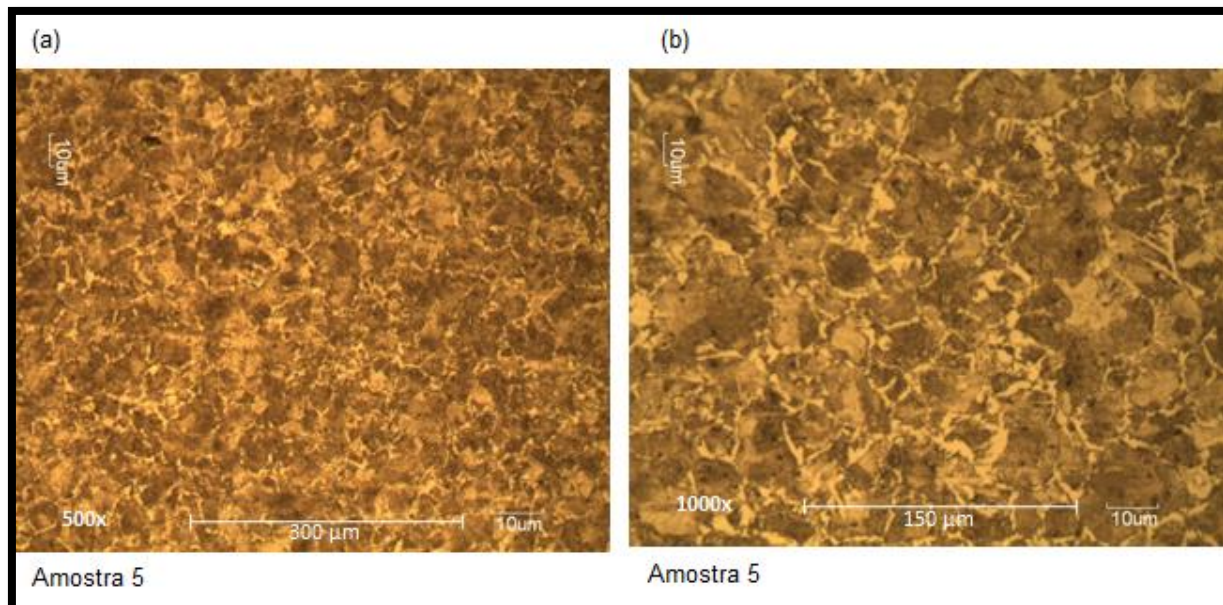
Figura 25 - Micrografia da amostra 4 do Aço ASTM A131 (Cementação a 950°C durante 4 horas, têmpera a 850°C durante 60 minutos e Revenido a 450°C durante 15 minutos), nos aumentos 500x(a) e 1000x(b).



FONTE: Autor

A amostra 5 do aço ASTM A 131 submetido a tratamento termoquímico (Cementação a 950°C durante 4 horas), e tratamento térmico pós cementação (têmpera a 850°C durante 60 minutos e Revenido a 450°C durante 30 minutos) apresenta grãos de Perlita (coloração escura), com ilhas de ferrita (coloração clara). As ilhas de ferrita estão com diâmetros menores comparado com as metalografias anteriores (figura 26).

Figura 26 - Micrografia da amostra 5 do Aço ASTM A131 (Cementação a 950°C durante 4 horas, têmpera a 850°C durante 60 minutos e Revenido a 450°C durante 30 minutos), nos aumentos 500x(a) e 1000x(b).



FONTE: Autor

4.2- ENSAIO DE IMPACTO

Foi realizado o ensaio de impacto nas amostras sem tratamento e com tratamento térmico, sendo três corpos-de-prova para cada procedimento, totalizando 15 corpos-de-prova. Os resultados estão distribuídos na Tabela 3.

Tabela 3– Energia absorvida pelos corpos de prova de impacto

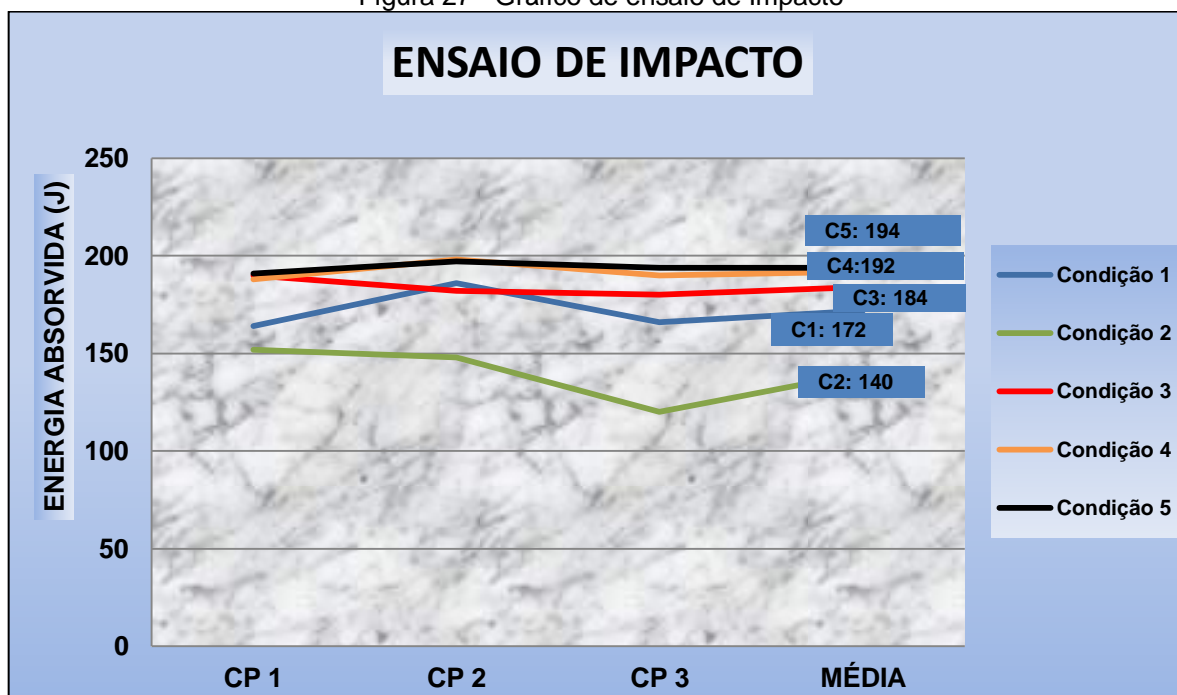
Ensaio de Impacto						
Amostras	Tratamento Térmico	TEMPO	CP 01	CP 02	CP 03	Média
Amostras 01	Sem Tratamento	-	164 J	186 J	166 J	172 J
Amostras 02	Cementação	4 horas				
	Têmpera	30 minutos	34 J	72 J	59 J	55 j
	Revenido	15 minutos				
Amostras 03	Cementação	4 horas				
	Têmpera	30 minutos	190 J	182 J	180J	184 J
	Revenido	30 minutos				
Amostras 04	Cementação	4 horas				
	Têmpera	60 minutos	188 J	198 J	190J	192 J
	Revenido	15 minutos				
Amostras 05	Cementação	4 horas				
	Têmpera	60 minutos	215 J	260 J	245 J	240 J
	Revenido	30 minutos				

FONTE: Autor

Com os resultados da energia absorvida no ensaio de impacto descrita na tabela 3, verifica-se que a média da **Condição 2** obteve uma menor absorção de energia, comparada com as amostras 1, 3, 4, 5,consequentemente é a condição na qual o material é mais frágil.

O ensaio de impacto de Charpy foi realizado a temperatura ambiente (25°C).

Figura 27 - Gráfico de ensaio de Impacto



Fonte: Autor

4.3- ENSAIO DE DUREZA

Seguem os resultados de medida de dureza das amostras do aço ASTM A131 (sem tratamento térmico e com tratamento térmico) na Tabela 4.

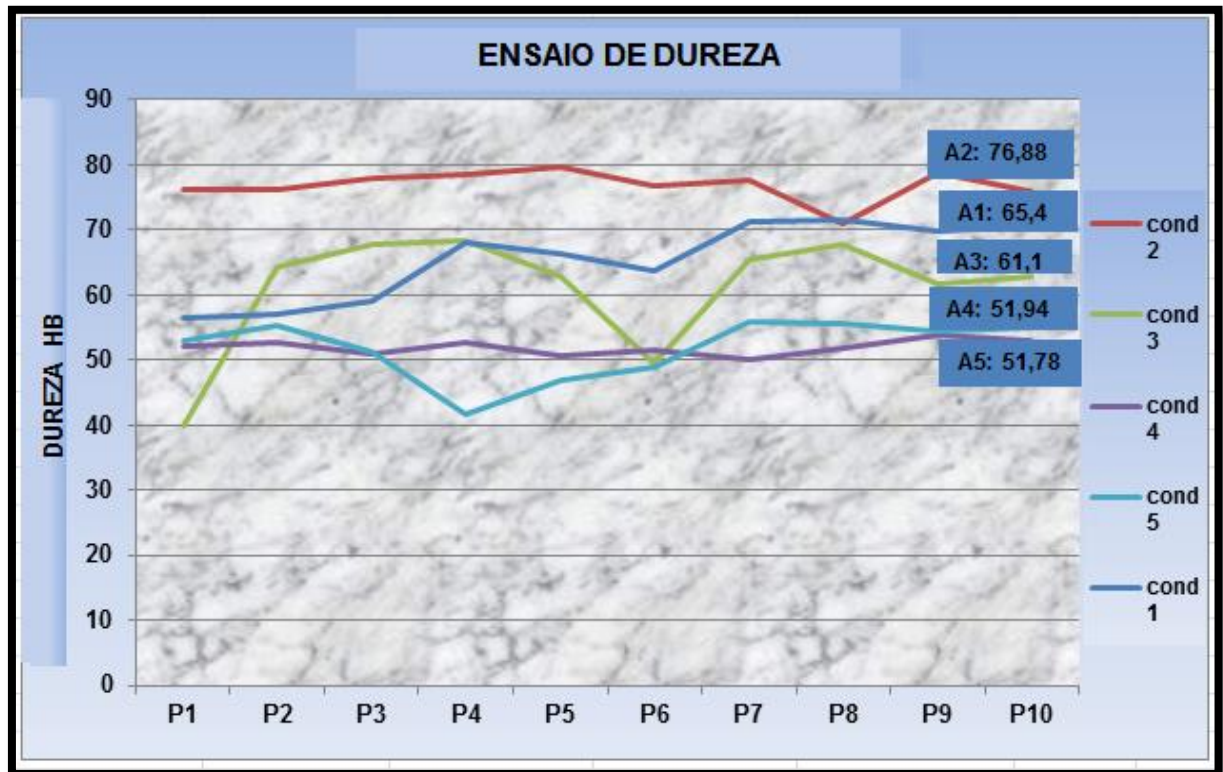
Tabela 4– Dureza medida em todas as condições.

	Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4	Condição 5	
	56,5	76,3	40	52	53	
	57	76,2	64,4	52,6	55,2	
	59	77,8	67,7	51	51,4	
	68,1	78,6	68,3	52,7	41,7	
	66,4	79,7	62,9	50,8	46,9	
	63,7	76,9	49,6	51,6	48,8	HB
	71,2	77,7	65,4	50,1	56	
	71,7	70,9	67,9	51,7	55,5	
	69,8	78,8	61,8	53,9	54,4	
	70,6	75,9	63	53	54,9	
R E S U L T A D O S	Média 65,4	76,88	61,1	51,94	51,78	

FONTE: Autor

De acordo com os resultados obtidos de dureza descrito na **tabela 4**, podemos perceber que na condição 2 o valor médio de dureza é o maior valor comparado com as outras condições. Esse resultado afirma que o aço ASTM A131 submetido a condição 02, apresenta a maior dureza.

Figura 28 - Gráfico de Ensaio de Dureza



Fonte: Autor

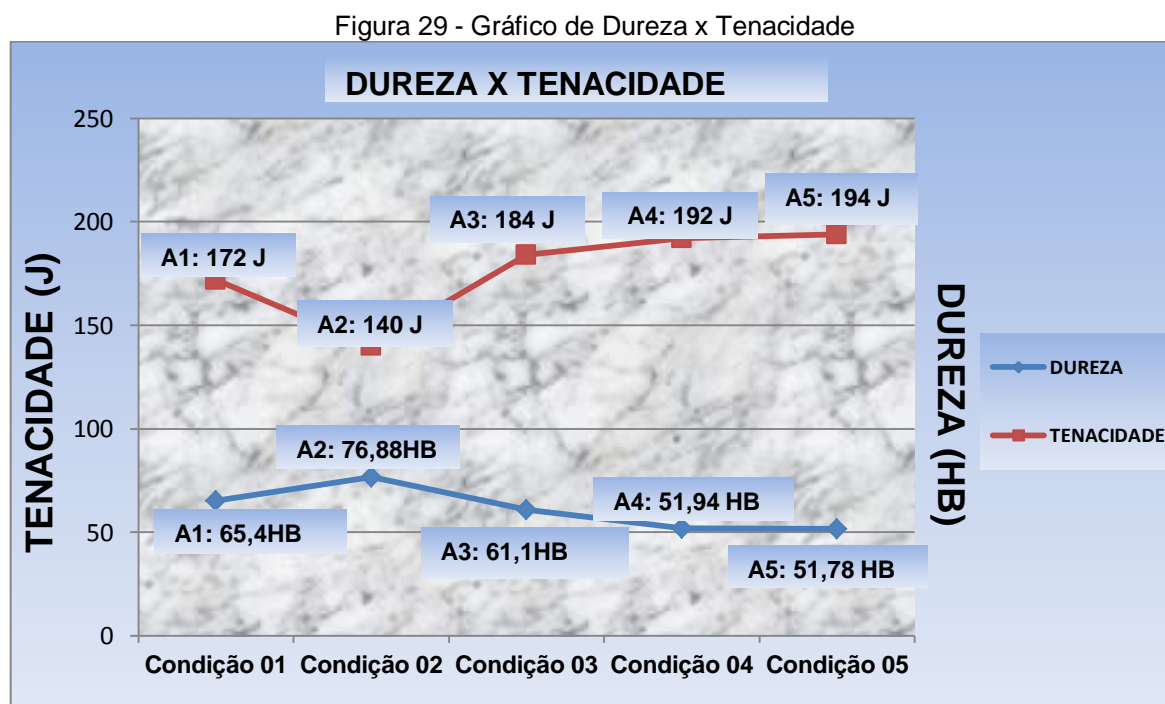
Através do gráfico de dureza pode-se observar que o valor médio medido na condição 2, foi superior aos valores nas condições 3, 4 e 5. Como foi utilizado o mesmo tratamento térmico com temperatura constante e tempo variável em todas as condições, o tempo na condição 2 foi suficiente para a reorganização dos grãos da microestrutura, conseqüentemente o material obteve uma dureza maior.

As amostras nas condições 3, 4, 5, tiveram uma dureza menor que a amostra na condição 1 sem tratamento, podendo ter ocorrido uma descarbonetação devido as condições de tratamento utilizado.

4.4- COMPARATIVO ENTRE DUREZA E TENACIDADE

Com o gráfico de Dureza x Tenacidade (figura , podemos perceber que são inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior a dureza, menor a tenacidade. Isso ocorre porque quanto maior é a dureza do material, maior é a fragilidade, com

isso, o material rompe facilmente quando submetido ao ensaio de impacto, consequentemente menor é a energia absorvida no ensaio.



Fonte: Autor

CONCLUSÕES

- O objetivo do tratamento termoquímico era aumentar a dureza do aço ASTM A131, a condição 2 obteve o melhor resultado. Podemos comprovar esse resultado através dos ensaios de dureza, impacto e metalografia do aço ASTM A131.
- Do exame micrográfico, é possível concluir que, para as amostras tratadas, a que obteve uma melhor microestrutura foi a amostra submetido a condição 2 (cementação a 950°C durante 4 horas, Têmpera a 850°C durante 30 minutos e Revenido a 450°C durante 15 minutos), os grãos de perlita se desenvolveram e os de ferrita diminuíram, caracterizando uma maior dureza no aço ASTM A131.
- Pelo ensaio de impacto, percebe-se que a condição 2 (cementação a 950°C durante 4 horas, Têmpera a 850°C durante 30 minutos e Revenido a 450°C durante 15 minutos) obteve o menor valor de absorção de energia ao impacto, caracterizando a fragilidade do material, podemos afirmar que obteve uma maior dureza .
- No ensaio de dureza a amostra submetido a condição 2, com o menor tempo de tratamento térmico (cementação a 950°C durante 4 horas, Têmpera a 850°C durante 30 minutos e Revenido a 450°C durante 15 minutos) ocorreu o refino dos grãos, ponto esse que apresentou a maior dureza.
- A amostra submetido a condição 2, obteve um aumento de dureza em relação a amostras da condição 1 (sem tratamento). Já as amostras da condição 3,4,5 a dureza diminui em comparação com a amostra da condição 1 (sem tratamento) podendo ter ocorrido uma **descarbonetação** devido as condições de tratamento utilizado.
- Apesar da microestrutura das amostras da condição 3, 4 e 5, ter formado uma quantidade maior de perlita, apresentou uma dureza menor do que a amostra na condição 1 (sem tratamento) que tem uma quantidade de perlita menor em sua microestrutura, Houve formação de perlita grosseira nas condições 03, 04, 05. e de perlita fina na condição 1. A perlita possui uma dureza maior do que a perlita grosseira.

TRABALHOS FUTUROS

- Estudo da tenacidade do aço ASTM A131, utilizando outro tratamento termoquímico;
- Estudo da tenacidade do aço ASTM A131, alterando os parâmetros de temperatura e tempo dos tratamentos térmico de Tempera e Revenido com o objetivo da formação da microestrutura martensítica;
- Estudo do teor de carbono absorvido no aço ASTM A131, pós-tratamento termoquímico de cementação através de análise química das amostras tratada;

REFERÊNCIAS

- [1] DA COSTA, André Luiz V; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 3ª. Edição São Paulo, 2010
- [2] CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7ª. Edição // Trad. Sérgio Murilo Stamile Soares, Rio de Janeiro, 2008
- [3] CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7ª. Edição. São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.
- [4] DOS SANTOS, Carlos A; SPIM, Jaime A; GARCIA, Amauri. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro, 2008.
- [5] Aula 1 – Revisão de conceitos em Materiais, Materiais Tecnológicos, Ensaio Mecânicos e determinação das propriedades mecânicas dos materiais. Disponível em < ftp://ftp.cefetes.br/Cursos/Mecanica/T%E9cnico/%C1rea%20de%20Materiais_2011-2/Tecnologia%20dos%20Materiais%20II/Parte%201_Tratamentos%20T%E9rmicos/Apostila%202007_TT%20&%20TQ.pdf>. Acessado em 10 de Janeiro de 2012
- [6] Microscopia Eletrônica de Varredura. Disponível em< http://www.materiais.ufsc.br/lcm/web-MEV/MEV_Apostila.pdf >. Acessado em 10 de Fevereiro de 2012.
- [7] Dureza. Disponível em< http://www.salulai.com.br/Ftp/EMPRESA_302/374540285AULATERMO-TMF1_aula07_txt_rev_0.pdf >. Acessado em 10 de Janeiro de 2012.
- [8] Estrutura e propriedade dos materiais, ensaio mecânico dos materiais. Disponível em<<http://www.jorgeteofilofilrd.wordpress.com/2010/08/emapostila-capitulo09-ensinomod1.pdf>>. Acessado em 15 de Fevereiro de 2012.
- [9] Diagrama de Fases. Disponível em<http://www.dema.puc-rio.br/cursos/cemat_mv/Aula12.pdf>. Acessado em 15 de Fevereiro de 2012
- [10] O Ensaio Metalográfico no controle da qualidade. Disponível em <http://www.spectru.com.br/ensaio_metal.pdf>. Acessado em 29 de fevereiro de 2012.
- [11] Metalografia preparação de amostras; uma abordagem prática. Disponível em <http://www.urisan.tche.br/~lemm/metalografia.pdf>. Acessado em 29 de Fevereiro de 2012
- [12] Análise metalográfica de aços utilizados na indústria açucareira. Disponível em: <http://prope.unesp.br/xxi-cic/27-34271680850.pdf>. Acessado em 29 de Fevereiro de 2012
- [13] Microscópio Óptico- Aspectos Gerais. Disponível em:< <http://www.dsif.fee.unicamp.br/~furio/IE607A/MO.pdf>> Acessado em 29 de Fevereiro de 2012

[14] **Medição de temperatura de um processo de soldagem com eletrodo revertido para caracterizar uma curva de resfriamento:** <

<http://www.sbpnet.org.br/livro/62ra/resumos/resumos/4034.htm> > Acessado em 21 de novembro de 2012

[15] 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.

[16] METALS Handbook. [s.l.:s.n.]. v.9, [19--].

[17] CHIAVERINI, Vicente. **Tratamento Térmico das ligas Metálicas**. 1ª. Edição. São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003.