

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba
**COMPARATIVO DA TENACIDADE DE UM
AÇO SAE 4340 TEMPERADO E REVENIDO
COM MODIFICAÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO
AUSTENÍTICO.**

Washington Luiz Oliveira de Almeida

Pindamonhangaba - SP

2018

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**COMPARATIVO DA TENACIDADE DE UM
AÇO SAE 4340 TEMPERADO E REVENIDO
COM MODIFICAÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO
AUSTENÍTICO**

Washington Luiz Oliveira de Almeida

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba para
graduação, no Curso Superior de
Tecnologia Mecânica em processos de
Soldagem

Área de Concentração:

Orientadora: Prof.^a. Dr.^a. Cristina Ares Elisei

Co - Orientadora: Prof.^a. Msc. Gisélia Alves Souza

Pindamonhangaba - SP

2018

AI645

Almeida, Washington Luiz Oliveira de.

Comparativo da tenacidade de um aço SAE 4340 temperado e revenido com modificação do tamanho de grão austenítico / Washington Luiz Oliveira de Almeida / FATEC Pindamonhangaba, 2018.

50f.: il.;

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Cristina de Carvalho Ares Elisei

Co-orientadora: Prof.^a Msc. Gisélia Alves de Souza

Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. 2018

1. Aço SAE 4340. 2. Propriedades Mecânicas.
3. Microestrutura. I. Almeida, Washington Luiz Oliveira de.
II. Elisei, Cristina de Carvalho Ares. III. Souza, Gisélia Alves.
IV. Título.

CDD 669

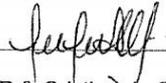
Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**COMPARATIVO DA TENACIDADE DE UM AÇO
SAE 4340 TEMPERADO E REVENIDO COM
MODIFICAÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO
AUSTENÍTICO**

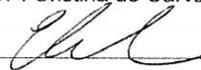
WASHINGTON LUIZ OLIVEIRA DE ALMEIDA

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba, para
graduação no Curso Superior de
TECNOLOGIA EM MECÂNICA -
PROCESSOS DE SOLDAGEM.

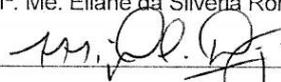
Comissão Examinadora



Orientador – Prof^ª. Dr^ª. Cristina de Carvalho Ares Elisei



Membro – Prof^ª. Me. Eliane da Siveria Romagnolli de Araújo



Membro - Sr. Esp. Miguel Cuzzolo Diaz

Pindamonhangaba, 28 de novembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar saúde e condições de finalizar esta etapa.

Agradeço minha família, minha esposa Luciana que sempre me apoiou e incentivou.

Agradeço a Fatec Pindamonhangaba pela aquisição do material utilizado neste estudo.

Agradeço a minha orientadora Dr^a. Cristina Ares Elisei e Co-orientadora Msc. Gisélia Alves Souza por toda amizade, todo conhecimento passado para concluir este trabalho, por toda paciência em atender e sanar as dúvidas

Agradeço ao Prof. Dr Luís Otávio e ao Senai Felix Guisard de Taubaté pela usinagem dos corpos de prova para o ensaio de impacto

Agradeço ao Auxiliar Docente Sr. Flávio pelo auxílio nos processamentos térmicos e nos ensaios realizados.

Agradeço aos colegas de trabalho Adilson Malta e Alexandre Santos pela experiência repassada.

RESUMO

Neste trabalho realizou-se uma análise da resistência ao impacto de um aço SAE 4340 submetido ao tratamento térmico de têmpera e revenimento com modificação do tamanho de grão austenítico.

Para caracterização das propriedades mecânicas foram realizados ensaios de dureza na escala Rockwell C e ensaio de Charpy à temperatura ambiente.

A caracterização microestrutural foi realizada com preparação metalográfica padrão e ataques químicos com reagentes Nital 2% e reagente para revelação do contorno de grão austenítico, e subsequente medição do tamanho de grão austenítico.

Por fim, os resultados obtidos foram comparados e relacionados com as características microestruturais do material.

Palavras-Chave: Aço SAE 4340, Propriedades Mecânicas, Microestrutura.

ABSTRACT

In this work it was made an analysis of impact resistance of SAE 4340 steel which was subjected to a heat treatment of Quenching Oil and Tempering with austenitic grain size modification.

To characterize the mechanical properties, were performed hardness tests on Rockwell C scale and Charpy test at room temperature.

The microstructural characterization was performed with standard metallographic preparation, the reagent Nital 2% was used in order to reveal the quenched microstructure and an etching was used to delineate the austenitic grains boundaries, and subsequent measurement of the austenitic grain size.

Finally, the results obtained were compared and related to the material microstructural characteristics.

Keywords: SAE 4340 steel, Mechanical Properties, Microstructure

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. CURVA DE RESFRIAMENTO HIPOTÉTICA E FASES RESULTANTES	15
FIGURA 2. EFEITO DO TEOR DE CARBONO NAS TEMPERATURAS M_i E M_f	17
FIGURA 3. EFEITO DO TEOR DE CARBONO NA DUREZA, TENSÃO MÁXIMA E ESCOAMENTO	18
FIGURA 4 EFEITO DO TEOR DE CARBONO NA DUREZA, TENSÃO MÁXIMA E ESCOAMENTO	18
FIGURA 5 RELAÇÃO DE TEOR DE CARBONO E MORFOLOGIA DA MARTENSITA	19
FIGURA 6 MICROFOTOGRAFIA DA MORFOLOGIA DA MARTENSITA EM AGULHAS E PLACAS	19
FIGURA 7 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE REVENIMENTO NAS PROPRIEDADES DO AÇO	20
FIGURA 8 ILUSTRAÇÃO DA REPRESENTATIVA DE GRÃO E CONTOURO DE GRÃO	21
FIGURA 9 EFEITO DO TEMPO E DA TEMPERATURA SOBRE O TAMANHO DO GRÃO AUSTENÍTICO	22
FIGURA 10 CARTA GRÁFICO PARA MEDIÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO PELO MÉTODO COMPARATIVO	23
FIGURA 11 EXEMPLO DE MEDIÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO POR INTERCEPTO	24
FIGURA 12 DESENHO ESQUEMÁTICO DO MÉTODO DO ENSAIO DE IMPACTO	26
FIGURA 13 DISTINÇÃO DE POSICIONAMENTO ENTRE CDPs DE CHARPY E IZOD	27
FIGURA 14 DIMENSÕES E TIPOS DE CORPOS DE PROVA DE IMPACTO CHARPY E IZOD	27
FIGURA 15 INFLUÊNCIA DA DIREÇÃO DA CONFECÇÃO DO CORPO DE PROVA NA QUANTIDADE DE ENERGIA ABSORVIDA	28
FIGURA 16 EFEITO DO TEOR DE CARBONO NA ABSORÇÃO DE ENERGIA DE IMPACTO	29
FIGURA 17 ENERGIA ABSORVIDA X TEMPERATURA X MICROESTRUTURA	30
FIGURA 18 CURVA DE ENERGIA DE IMPACTO POR VARIAÇÃO DA TEMPERATURA	31
FIGURA 19 SUPERFÍCIES DE FRATURAS DE CORPOS DE PROVA DE IMPACTO	32
FIGURA 20 PROCESSOS TÉRMICOS E PARÂMETROS ADOTADOS	33
FIGURA 21 CLASSIFICAÇÃO DOS LOTES PARA TRATAMENTO TÉRMICO	34
FIGURA 22 FORNO MUFLA GRION UTILIZADO PARA OS PROCESSAMENTOS TÉRMICOS	34
FIGURA 23 MÁQUINA DE TESTE DE IMPACTO	35
FIGURA 24 DURÔMETRO PANATEC	35
FIGURA 25 REGIÕES AS QUAIS FORAM MENSURADOS O TAMANHO DE GRÃO	37
FIGURA 26 METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO PELO SOFTWARE	38
FIGURA 27 GRÁFICO RESULTADOS DO TESTE DE DUREZA	39
FIGURA 28 GRÁFICO RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO	39
FIGURA 29 ASPECTO FRACTOGRÁFICO DAS AMOSTRAS DO LOTE A	40
FIGURA 30 ASPECTO FRACTOGRÁFICO DAS AMOSTRAS DO LOTE B	40
FIGURA 31 MACROFOTOGRAFIA CORPO DE PROVA 2A	41
FIGURA 32 MACROFOTOGRAFIA CORPO DE PROVA 2B	41
FIGURA 33 MICROGRAFIA DA AMOSTRA 2A DO LOTE A	42
FIGURA 34 MICROGRAFIA DA AMOSTRA 2B DO LOTE B	42
FIGURA 35 MICROFOTOGRAFIA DA AMOSTRA 2A, CONTORNOS DE GRÃOS AUSTENÍTICOS	43
FIGURA 36 MICROFOTOGRAFIA DA AMOSTRA 2B, CONTORNOS DE GRÃOS AUSTENÍTICOS	43
FIGURA 37 DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO MÉDIO DE GRÃO AMOSTRA LOTE A	44

FIGURA 38 DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO MÉDIO DE GRÃO AMOSTRA LOTE B	45
FIGURA 39 MICROFOTOGRAFIA DA AMOSTRA DO LOTE A COM ATAQUE COMBINADO	46
FIGURA 40 MICROFOTOGRAFIA DA AMOSTRA DO LOTE B COM ATAQUE COMBINADO	46

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO AISI/SAE 4340.....	33
TABELA 2 NÚMERO ASTM G DE TAMANHO DE GRÃO	44

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS.....	7
1. INTRODUÇÃO.....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1. AÇOS	13
2.1.1. AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA BAIXA LIGA (ARBL)	13
2.2. AÇO AISI/SAE 4340	14
2.3. MICROESTRUTURAS E PROPRIEDADES.....	14
2.3.1. MICROESTRUTURA AUSTENITA	15
2.3.1.1. AUSTENITA RETIDA	15
2.3.1.2. AUSTENITA PRIMÁRIA	16
2.3.2. MICROESTRUTURA MARTENSITA.....	16
2.3.2.1. DEFINIÇÃO E FORMAÇÃO	16
2.3.2.2. INFLUÊNCIA DO CARBONO NA MARTENSITA	17
2.3.2.3. PROPRIEDADES DA MARTENSITA.....	20
2.3.2.4. MARTENSITA REVENIDA	20
2.3.3. O ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS E EFEITOS DO GRÃO NO AÇO	21
2.3.3.1. DEFINIÇÃO DE GRÃO	21
2.3.3.2. A INFLUÊNCIA DO TAMANHO DE GRÃO NAS PROPRIEDADES DOS AÇOS ..	21
2.3.3.3. MECANISMOS DE CONTROLE DO TAMANHO DE GRÃO	22
2.3.4. TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO DO TAMANHO DO GRÃO	23
2.4. ATAQUES QUÍMICOS	24
2.4.1. ATAQUES QUÍMICOS CORROSIVOS	24
2.4.2. TINT ETCHING.....	25
2.5. ENSAIO DE IMPACTO E A TENACIDADE	25
2.5.1. ENSAIO DE IMPACTO CHARPY E IZOD	26
2.5.2. CARACTERÍSTICAS DO ENSAIO DE IMPACTO	28
2.5.3. FATORES QUE INFLUENCIAM NOS RESULTADOS DO ENSAIO DE IMPACTO ..	28
2.5.3.1. ENTALHES	28
2.5.3.2. ORIENTAÇÃO DA RETIRADA DOS CORPOS DE PROVAS	28

2.5.3.3. COMPOSIÇÃO QUÍMICA	29
2.5.3.4. TAMANHO DE GRÃOS	29
2.5.3.5. TRATAMENTO TÉRMICO.....	29
2.5.3.6. TEMPERATURA	30
2.6. CONCEITO DE FRATURA DÚCTIL E FRATURA FRÁGIL.....	31
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1. CONFEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	33
3.2. PROCESSAMENTOS TÉRMICOS	33
3.3. ENSAIOS MECÂNICOS.....	34
3.4. ANÁLISE METALOGRÁFICA	35
3.5. ATAQUES QUÍMICOS.....	36
3.5.1. NITAL.....	36
3.5.2. REAGENTE PARA REVELAÇÃO DO CONTORNO DE GRÃO.....	36
3.5.3. REAGENTE PARA REVELAR CONTORNO DE GRÃO MAIS ATAQUE COM NITAL	
37	
3.6. CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E TAMANHO DE GRÃO	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1. ENSAIOS MECÂNICOS.....	39
4.2. ATAQUES QUÍMICOS E ANÁLISE METALOGRÁFICA	42
4.2.1. REAGENTE NITAL.....	42
4.2.2. REAGENTE PARA REVELAÇÃO DO CONTORNO DE GRÃO E ANÁLISE	
QUANTITATIVA	43
5. CONCLUSÕES.....	47
6. REFERÊNCIAS	49

1. INTRODUÇÃO

O que mais interessa ao pesquisador, engenheiro, tecnólogo ou técnico em relação a um dado material são suas propriedades, e sabe-se que elas têm origem em sua microestrutura.

O método mais comum para a modificação e controle das propriedades é a mudança microestrutural, para isto usa técnicas de deformação plástica, recristalização, variação da quantidade relativa das fases, o controle do tamanho de grãos e morfologia e distribuição das fases; e um dos meios mais utilizados para promover essas modificações é o tratamento térmico (VLACK, 1970). Com a busca contínua da melhoria das características dos aços e levando em conta que elas são dependentes de seus arranjos microestruturais, entende e justifica se a importância do estudo da influência da microestrutura para que sejam desenvolvidos aços de melhores qualidades e propriedades.

A resistência mecânica, a dureza e a tenacidade são propriedades importantes para os materiais, principalmente para aços com fins estruturais, é desafiador combina-las para que o produto final tenha uma resistência adequada ao seu propósito e boa tenacidade, uma vez que quando uma aumenta a outra tende a diminuir.

O objetivo deste trabalho é realizar um comparativo das propriedades de dureza e resistência ao impacto à temperatura ambiente de um aço AISI/SAE 4340 submetido à tratamento térmico de têmpera e revenimento com temperaturas de austenitização distintas, 850°C e 1000°C, a fim de provocar crescimento no tamanho de grão austenítico primário. Por fim relacionar os resultados obtidos pelos testes mecânicos com o tamanho médio de grãos austeníticos resultantes dos processamentos térmicos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Aços

O aço é um material de grande aplicabilidade e versatilidade, tornando-o um dos metais mais importantes para o mundo justamente pela sua variedade e atribuições, pode ser utilizado para fins elétricos, térmicos, estruturais entre outros, para cada aplicação, este material deve apresentar determinadas características físico-químicas apropriadas para o fim ao qual foi desenvolvido, tais aspectos que designa-se como propriedades podem ser obtidas ou modificadas através dos processos de fabricação ou de processamento posterior como tratamentos térmicos ou termomecânicos (SILVA, 2006); (RANIERI, 2010).

Segundo Chiaverini (2005), os aços podem ser classificados de três formas, de acordo com sua composição química, com sua estrutura (metalúrgica) metalográfica ou segundo sua aplicação.

- Classificação segundo Composição Química

Leva-se em conta os elementos químicos presentes no material, e sua porcentagem, podendo ser desde aço carbono comum, cuja composição é ferro e carbono e porcentagens residuais de enxofre e fósforo ou aço liga com uma porcentagem maior de outros elementos como cromo, manganês, tungstênio entre outros que visam fornecer determinadas características ao metal.

- Classificação segundo a estrutura

Utilizando a composição microestrutural do aço como base desta classificação eles podem ser nomeados como aços perlíticos, martensíticos, austeníticos, ferríticos, carbídicos, bifásicos e multifásicos.

- Classificação de acordo com a aplicação

Leva-se em consideração o fim para o qual este aço foi desenvolvido, como por exemplo aços estruturais, aços para ferramentas, aços para molas, aços para tubos, aços ultra resistentes entre outros.

2.1.1. Aços de alta resistência baixa liga (ARBL)

Os aços ARBL são assim chamados pois contêm baixa porcentagem de carbono, e quantidades moderadas de elementos de liga que proporcionam maiores valores de limite de ruptura e alongamento quando comparados aos aços carbono comuns (ARCHER et al 1968 apud SILVA, 2006). Os aços (ARBL) Alta Resistência Baixa Liga foram desenvolvidos pela indústria do aço com a aplicação de conceitos de endurecimento por precipitação, refino de grão, adição de elementos de ligas e trabalhos termomecânicos (BELTRÃO, 2010).

Segundo Chiaverini (2005) os aços ARBL são utilizados quando deseja-se maior resistência mecânica com menor seção transversal, maior relação entre limite de escoamento

e resistência a tração, melhor resistência ao choque e a fadiga e maior resistência à corrosão. Devem também apresentar boa ductibilidade, boa soldabilidade e não ser suscetível ao endurecimento localizado pelo corte por chama.

2.2. Aço AISI/SAE 4340

O AISI/SAE 4340 é um aço ARBL que contém como principais elementos de liga cromo, níquel e molibdênio, quando devidamente temperado e revenido pode apresentar valores de resistência a tração até superiores à 1875 MPa (Mega Pascal). Dependendo dos processamentos térmico ou termomecânicos aos quais é submetido pode possuir também alta resistência a fadiga, boa ductibilidade e boa tenacidade (SILVA, 2006) (LEE; SU, 1999).

Por apresentar fragilidade ao revenido na faixa de temperatura de 230 °C – 370 °C deve se evitar este patamar neste processo térmico (GDMETALS, 2017); Pré e pós aquecimento deste aço em processos de soldagem são cuidados necessários para solda lo de forma satisfatória (SILVA, 2006).

O aço SAE 4340 pode ser aplicado em fabricação de virabrequins, bielas, engrenagens, ponta de eixo, indústria aeroespacial, petrolífera, elementos de fixação e em peças que demandam altas resistências com seções espessas (SOUZA, 2008) (TENAX, 2017).

2.3. Microestruturas e propriedades

As propriedades dos materiais, principalmente dos aços podem ser controladas e modificadas através da alteração de suas microestruturas, isto pode ser realizado por diferentes meios como deformação plástica, recristalização, tratamento térmico ou termomecânico, estas ações provocam no material alterações microestruturais como variação na porcentagem e distribuição de fases, na orientação dos grãos e alteração de seu tamanho, e em consequência essas alterações modificam as propriedades físico-químicas do componente (VLACK, 1970).

Compreendendo que a microestrutura do aço influência diretamente nas propriedades mecânicas, faz se necessário um estudo aprofundado das características delas e sua influência para que possam ser melhorados os já existentes ou desenvolvidos novos tipos de aços (SOUZA, 2008).

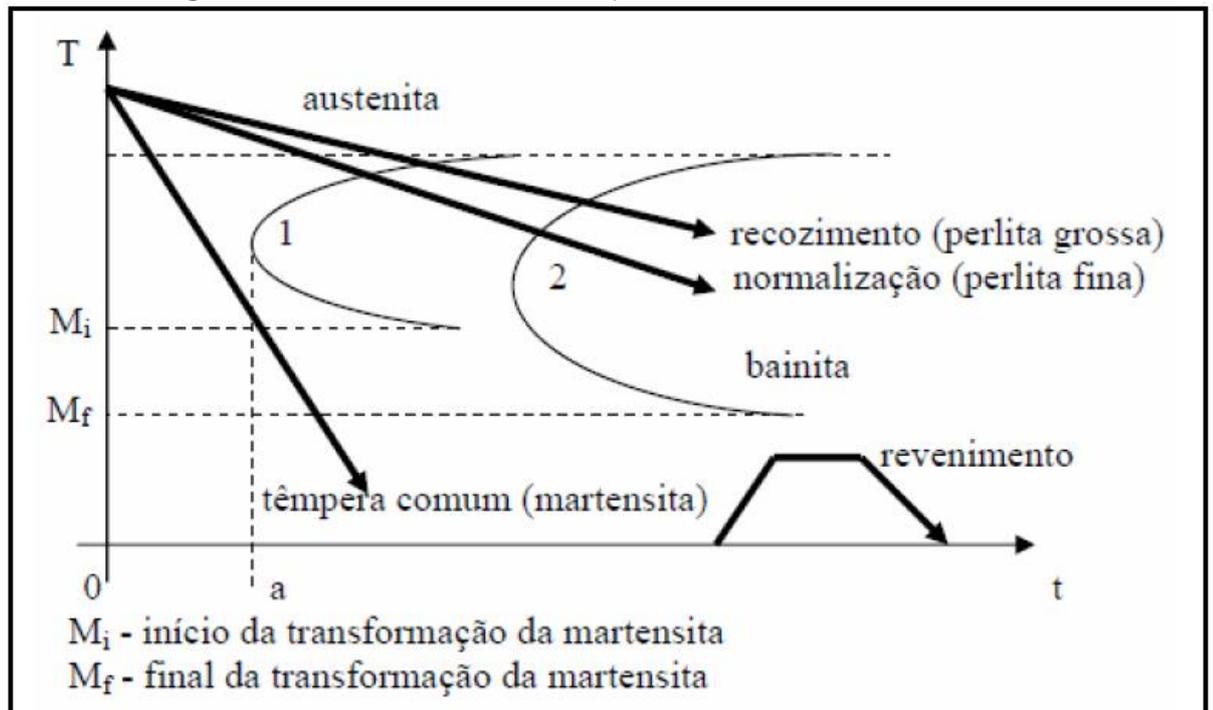
No presente trabalho, será realizado o estudo das propriedades mecânicas do aço relacionando principalmente os valores de dureza e de resistência ao impacto com as características microestruturais resultantes do tratamento térmico de têmpera seguido de revenimento, portanto serão explorados de maneira mais aprofundada as fases martensíticas e austenítica e sua influência no metal, ainda em relação as propriedades do material também será abordado o efeito do tamanho de grão austenítico primário.

2.3.1. Microestrutura Austenita

A austenita é uma fase instável em temperaturas abaixo da crítica, que varia com a porcentagem de elementos de liga e carbono, é possível obtê-la pelo aquecimento do aço para realizar um tratamento térmico, quando ocorre a nucleação e crescimento da austenita a partir da microestrutura. Trata-se de uma solução sólida, com estrutura cristalina cúbica de face centrada, CFC, com espaços interatômicos que permitem uma maior solubilidade do carbono. Suas propriedades são boa resistência mecânica, tenacidade e ductilidade; dureza baixa, e também não apresenta magnetismo (CALLISTER, 2002); (CHIAVERINI, 2003); (COLPAERT, 2008).

Conforme as condições que o material é resfriado a partir da temperatura de austenitização, a austenita presente pode se decompor em diferentes fases, como pode ser observado na figura 1, podendo chegar a temperatura ambiente com grãos de austenita não transformados, ficando conhecido com austenita retida (SILVA, 2006)

Figura 1. Curva de resfriamento hipotética e fases resultantes



Fonte: Unicamp 2010

2.3.1.1. Austenita retida

A austenita retida é proveniente da não transformação da fase austenita durante o tratamento de têmpera com resfriamento a partir da zona crítica, é uma microestrutura metaestável que pode ser modificada com abaixamento da temperatura para níveis criogênicos, por revenimento múltiplo ou por encruamento através da aplicação de esforços

mecânicos a frio (SILVA; MEI, 2010), este recurso é aplicado para aços com efeito TRIP, que são aços contendo porcentagem de pelo menos 5% de austenita retida, que após sofrer deformação mecânica, é transformada em martensita.

A estabilidade desta fase deve-se a vários fatores; a presença de elementos químicos estabilizadores da austenita cita-se como exemplo carbono, silício, manganês, alumínio; pelo tamanho e morfologia do grão austenítico; ou pelas características das fases que formam a matriz circundante à austenita (CHIANG et al, 2011)

2.3.1.2. Austenita primária

A austenita primária é aquela que foi formada durante a austenitização do aço para o tratamento térmico, ela pode ser observada quando há formação de microestruturas aciculares como bainita, martensita, e ferrita acicular que nucleiam-se e crescem no interior dos grãos austeníticos, agindo elas mesmas como restritoras, os limites que as envolvem são os contornos de grãos da austenita primária ou prévia (BHADESHIA, 2008 Apud BASTOS; MUI, 2011).

O tamanho de grão da austenita primária influenciará as propriedades de dureza, resistência a tração e tenacidade. Essa característica dimensional é dependente de processamentos anteriores do material, de sua composição química e dos parâmetros dos tratamentos térmicos como tempo e temperatura de austenitização aos quais o material foi submetido (ASTM E112, 2010).

2.3.2. Microestrutura Martensita

2.3.2.1. Definição e Formação

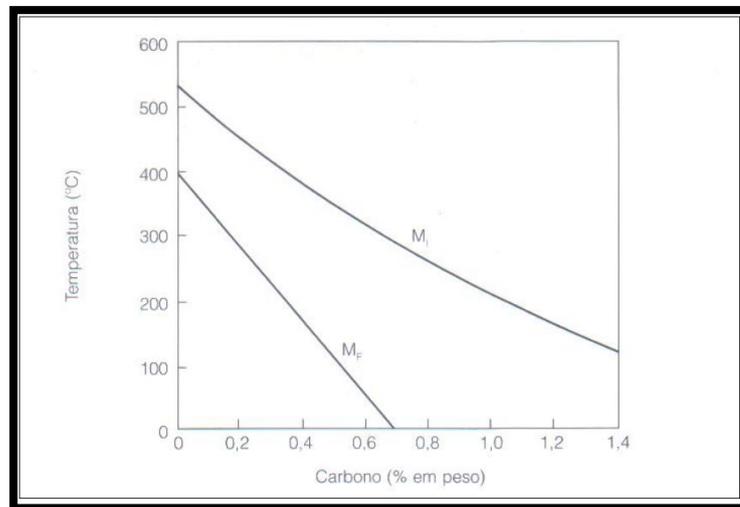
A martensita é definida como uma fase metaestável supersaturada de carbono cuja célula unitária é tetragonal de corpo centrado, TCC, (VAN VLACK, 1984). Além da transformação por esforço mecânico a frio, pode-se obter este constituinte através do resfriamento brusco de um aço a partir da temperatura de austenitização de forma que durante o resfriamento não haja decomposição da austenita em fases como perlita, bainita, ferrita e cementita mas sim que a taxa de resfriamento alcance a temperatura conhecida com M_i ou M_s de início da formação desta fase como pôde ser observado na figura 1 da seção 2.3.1, e que o decréscimo leve a cruzar a linha M_f de fim da transformação martensítica, neste momento o carbono que é um elemento intersticial que está dissolvido na austenita fica retido gerando a distorção dos vértices da célula unitária cúbica de face centrada (CFC) transformando em TCC. A velocidade de transformação da austenita em martensita chega a valores quase ultrassônicos semelhantes a ondas sonoras propagadas no metal. Nesta transformação também é observado uma alteração volumétrica do material que conseqüentemente gera elevados níveis de tensões residuais, por fim, é considerada uma transformação atômica, ou seja, que não depende da energia de ativação térmica dos átomos

podendo ocorrer até mesmo próximo ao zero absoluto (VAN VLACK, 1970) (COLPAERT, 2008) (SILVA; MEI, 2010).

2.3.2.2. Influência do carbono na martensita

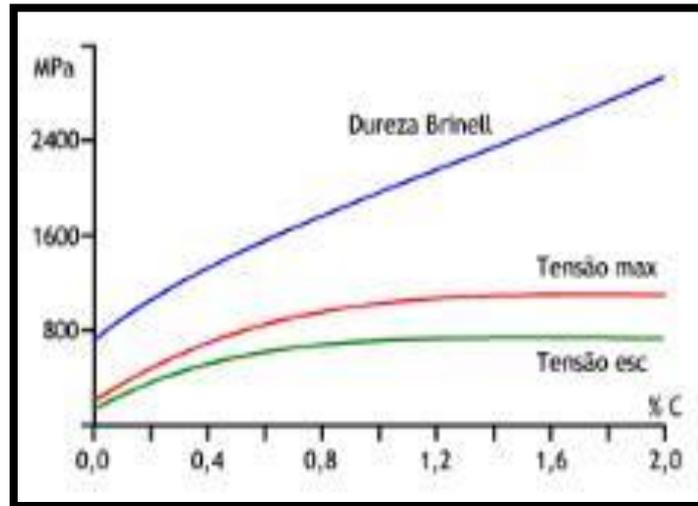
O carbono é o principal elemento influenciador nas características da martensita e em sua formação. Primeiramente, como pode ser visto na figura 2, a porcentagem de carbono na liga altera as temperaturas M_i e M_f , maiores teores de carbono abaixam essas temperaturas, fazendo com que a transformação inicie se, mas que ao término nem toda austenita se transforme em martensita, sendo necessário aplicar meios de resfriamentos mais severos ou aplicação de deformação plástica durante a têmpera, a fase austenítica não transformada é conhecida como austenita retida (SILVA; MEI, 2010).

Figura 2. Efeito do teor de carbono nas temperaturas M_i e M_f

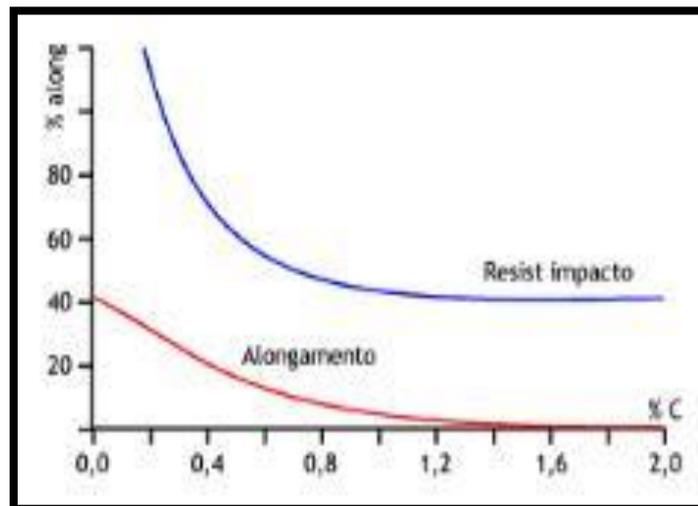


Fonte: (SILVA; MEI; 2010)

Outra influência importante do carbono é nos valores de dureza, na resistência à tração, limite de escoamento, resistência ao impacto e alongamento, nas imagens 3 e 4 é demonstrado em forma de gráfico a variação destas propriedades com a porcentagem em peso do carbono, de forma geral, o aumento do teor de carbono causa resulta no acréscimo da dureza, resistência a tração e de escoamento, em contrapartida a resistência ao impacto e o alongamento decaem.

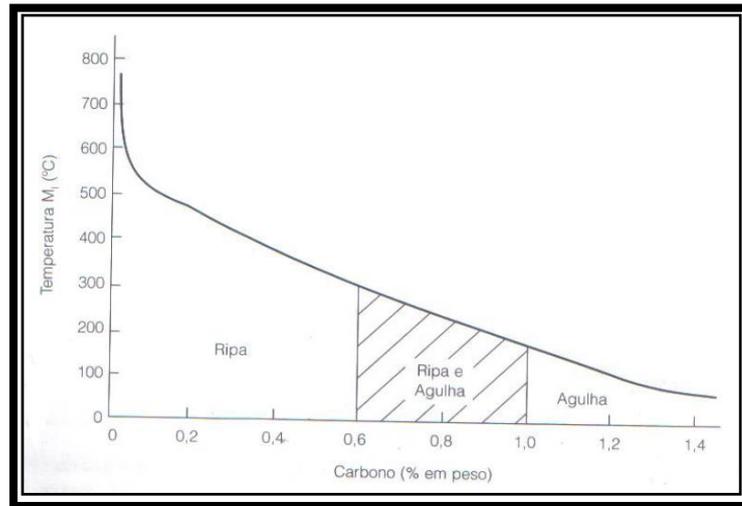
Figura 3. Efeito do teor de carbono na dureza, tensão máxima e escoamento

Fonte: (EBAH, 2018)

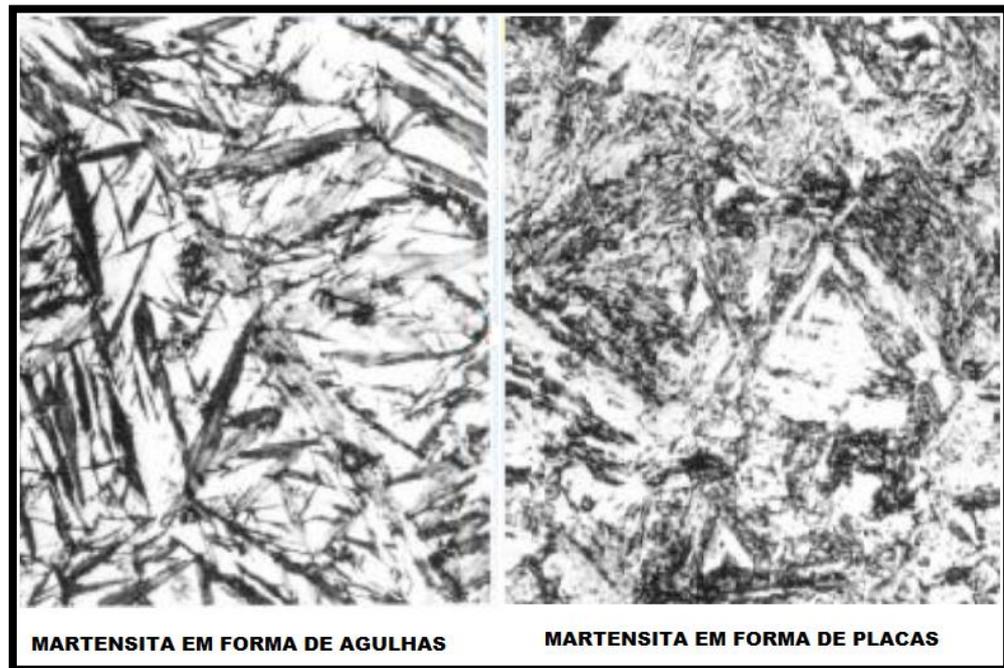
Figura 4 Efeito do teor de carbono na dureza, tensão máxima e escoamento

Fonte: (EBAH, 2018)

A morfologia da martensita também é influenciada pela porcentagem de carbono, figura 5, a martensita se apresenta sob a forma de pacotes de ripas quando o aço possui teores de carbono de até 0,6 %, quando acima de 1% de C, predominantemente a fase tem característica de agulhas, e na faixa destes dois valores há uma microestrutura de morfologia mista de ambas (SILVA; MEI, 2010). Na imagem são apresentados a microestrutura da martensita em forma de ripas e de agulhas.

Figura 5 Relação de teor de carbono e morfologia da martensita

Fonte: (SILVA; MEI; 2010)

Figura 6 Microfotografia da morfologia da martensita em agulhas e placas

Fonte: ALVES (2018)

Sua principal característica mecânica é a elevada dureza, dependendo dos níveis de tensões ocasionados pelas deformações ocasionados na formação, pode apresentar também fragilidade e susceptibilidade a trincas (VLACK, 1984). Por isto é de costume realizar o tratamento térmico conhecido como revenimento que tem por objetivo aliviar as tensões resultantes da formação da microestrutura durante a têmpera e conseqüente diminuir a fragilidade fornecendo maior tenacidade e ductilidade sem decréscimo excessivo da resistência mecânica (SILVA; MEI, 2010).

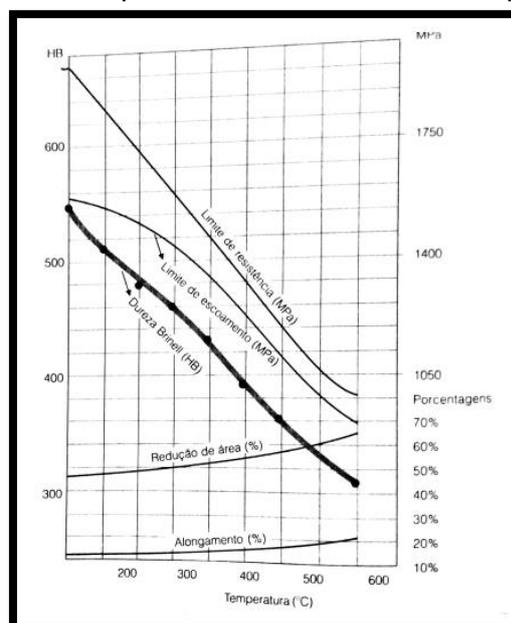
2.3.2.3. Propriedades da martensita

Devido a característica cristalográfica da martensita, ou seja, ter célula unitária tetragonal de corpo centrado e ser uma solução monofásica supersaturada do elemento intersticial carbono, que age impedindo a movimentação de discordâncias, dificultando a deformação plástica, a martensita é considerada uma fase dura, resistente e não dúctil (VLACK, 1970).

2.3.2.4. Martensita revenida

Como a martensita no estado temperado apresenta elevada dureza e conseqüentemente elevada fragilidade, é aconselhado que o material passe pelo tratamento térmico de revenimento, este processamento consiste em reaquecer o aço após a têmpera, normalmente na faixa de temperatura de 250° C à 650° C em um tempo determinado, com isto a tenacidade e a ductibilidade são melhoradas e o efeito fragilizante da transformação martensítica é reduzido, isto ocorre porque a martensita temperada é saturada de carbono, com o revenimento, este carbono começa a se difundir, se transformando em duas fases, a ferrita ou ferro alfa e partículas de cementita, o fato da cementita está dispersa de forma extremamente fina, cria um número maior de contornos de fases entre ferrita e Fe₃C, o que mantém a característica de dureza e resistência, mas devido a fase ferrita formada que é mais dúctil e tenaz em relação a austenita da martensita temperada, a fragilidade diminui. É importante frisar que a medida que aumenta se o tempo ou temperatura de revenimento, há redução da dureza e resistência máxima e aumento da ductibilidade e resistência ao impacto (CALLISTER, 2006). Na figura 7 são demonstrados essa influência.

Figura 7 Influência da temperatura de revenimento nas propriedades do aço



Fonte: SILVA; MEI, 2010

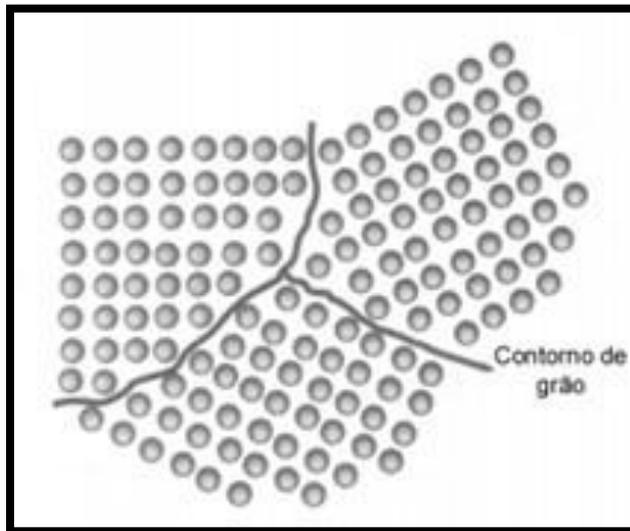
2.3.3. O estudo das características e efeitos do grão no aço

Assim como é imprescindível o conhecimento das fases do material, sua influência nas propriedades e seus mecanismos de formação, é de extrema importância o estudo das características dos grãos e efeitos sobre o metal, das formas de controle e técnicas de dimensionamento de seu tamanho.

2.3.3.1. Definição de grão

Os arranjos ordenados e repetitivos dos átomos formam os cristais que por sua vez se conectam entre si formando o grão cristalino com uma determinada orientação, ao longo do material essa formação é tridimensional e com diferentes orientações, a transição entre um grão e outro é definido como contorno de grão, a figura 8 é uma ilustração deste fenômeno (COLPAERT, 2008).

Figura 8 Ilustração da representativa de grão e contorno de grão



Fonte: Colpaert 2008

2.3.3.2. A influência do tamanho de grão nas propriedades dos aços

Sabe-se que o tamanho do grão influencia nas propriedades mecânicas dos materiais, pois os contornos agem como barreira durante a deformação plástica, como o movimento de escorregamento ocorre através desses contornos, devido a diferença de orientação entre os mesmos, ocorre a perda de energia cada vez que necessita mudar de grão. Grãos com tamanho médio menor, possuem maior área de contorno de grão, que por sua vez inibem a movimentação atômica, resultando em maiores valores de dureza, de resistência a tração, e por absorverem energia também apresentam melhor ductibilidade e tenacidade (CALLISTER, 2006).

2.3.3.3. Mecanismos de controle do tamanho de grão

O controle do tamanho de grão em metais pode ser exercido de diferentes formas (COLPAERT, 2008):

Através do controle da temperatura, por exemplo, aços que passam pelo tratamento térmico, ao elevar-se a temperatura de austenitização, gera-se o crescimento do tamanho médio do grão, no entanto o abaixamento da mesma apenas pára este crescimento e não o reverte.

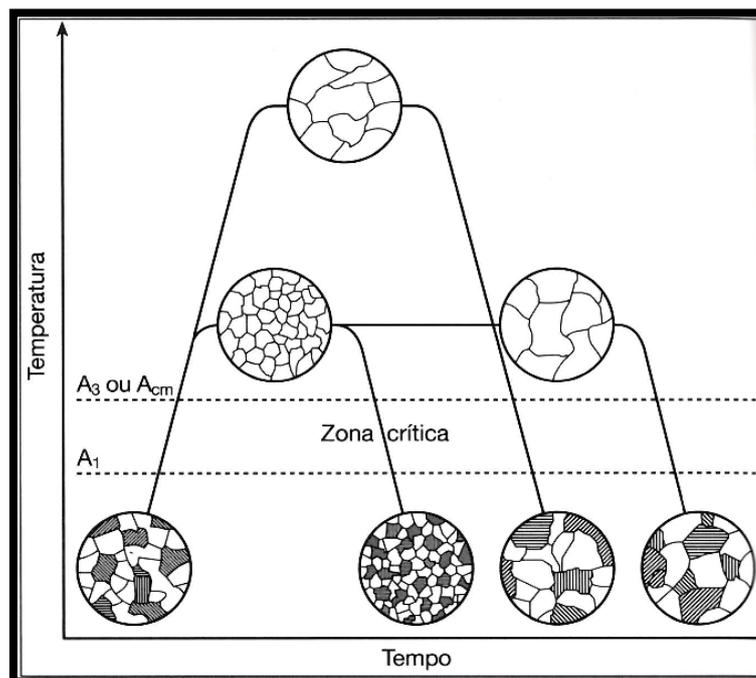
Ao manter o material aquecido por longos períodos de tempo, o grão tende a aumentar seu tamanho médio pelo efeito de coalescimento, quando grãos maiores crescem ao englobarem grãos menores vizinhos.

Através da adição de elementos de liga que formem uma segunda fase, onde serão nucleados novos grãos que limitam por um período de tempo o crescimento dos grãos adjacentes.

A combinação de deformações plástica a frio com o controle da temperatura, ao aquecer um material que foi deformado mecanicamente até uma temperatura conhecida como temperatura de recristalização, há nucleação de novos grãos que crescem impedindo o crescimento dos grãos vizinhos.

A figura 9 é uma representação esquemática do efeito da temperatura e do tempo de austenitização sobre o tamanho do grão austenítico e a microestrutura resultante.

Figura 9 Efeito do tempo e da temperatura sobre o tamanho do grão austenítico

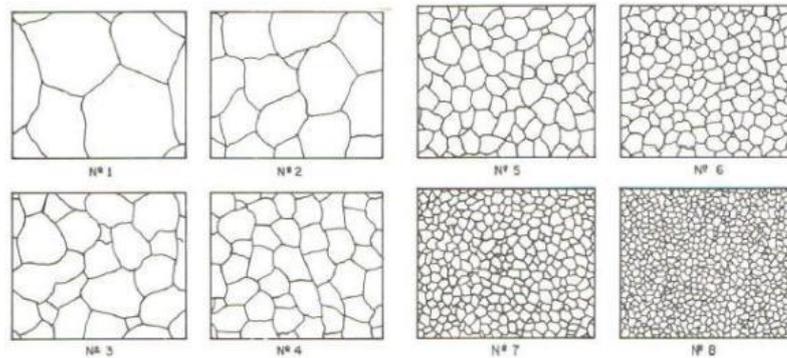


2.3.4. Técnicas para medição do tamanho do grão

Segunda a norma ASTM E 112 (2010), há três formas de se calcular o tamanho de grão em metais, por comparação, por contagem planimétrica e por intercepto.

- I. Por comparação é um método de menor precisão dimensional, no entanto mais rápido que os demais, neste método é utilizado uma carta gráfica com numeração de 1 a 10, sendo que números menores apresentam grãos de granulação grosseira e à medida que o valor aritmético aumenta, o tamanho médio dos grãos tende a ficar mais refinados, figura 10 é uma representação de uma carta dessas, este procedimento era adotado na norma ASTM E19, mas foi substituído com o advento da ASTM E 112 (CALLISTER, 2006).

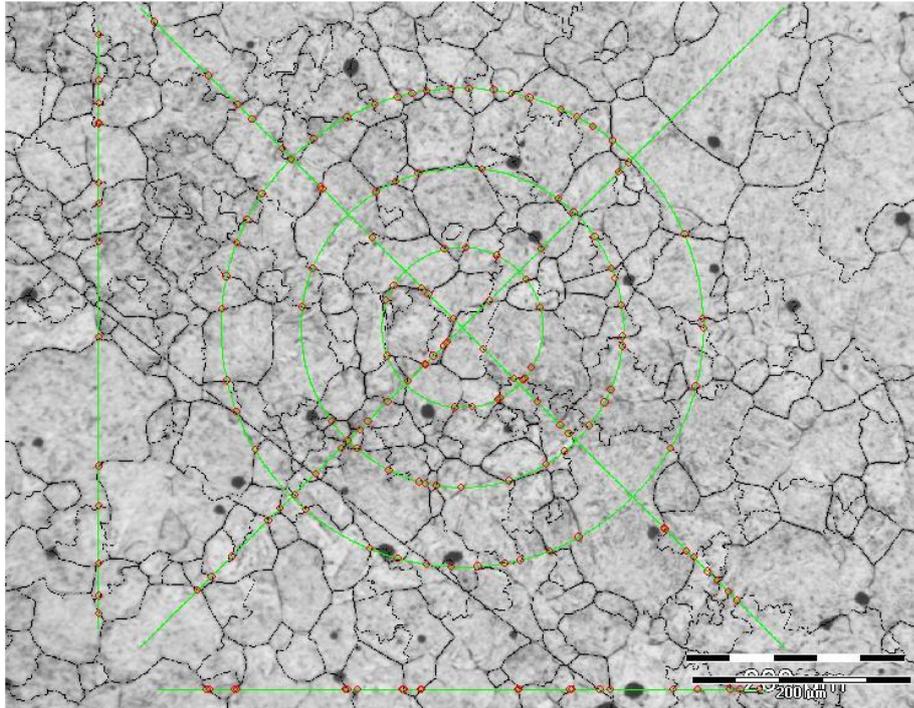
Figura 10 Carta gráfico para medição do tamanho de grão pelo método comparativo



Fonte: CHIAVERINI 2005

- II. Método Planimétrico envolve a contagem de grãos em uma área conhecida, isto gera uma contagem de grãos por unidade de área chamado N_A , que é utilizado para determinar o número de tamanho de grão ASTM conhecido com G , é um método mais preciso que por comparação. Para esta técnica sugere se realizar a medição em no mínimo 5 regiões diferentes da amostra, quanto maior o número de campos for analisado, maior será a precisão dos resultados; ainda em relação a este método, não deve ser utilizado em materiais com grãos alongados e ou deformados, apenas em grãos equiaxiais.
- III. Em tradução livre da norma ASTM E112 (2010) tem se que na medição do tamanho de grão por intercepto envolve a contagem de grãos que foram interceptados por uma linha de teste ou número de intersecções dos contornos de grãos, usada para calcular a média do comprimento linear do intercepto que determina o número ASTM G de tamanho de grão, pode ser utilizado para materiais com grãos alongados ou deformados por processo de conformação, é tão preciso quanto o método planimétrico, na figura 11, é mostrado um exemplo.

Figura 11 Exemplo de medição do tamanho de grão por intercepto



Fonte: Autor

2.4. Ataques Químicos

Os ataques químicos são de suma importância para caracterização microestrutural dos aços, pois através destes é possível fazer uma diferenciação entre as fases presentes. De acordo com o princípio ativo, esses reagentes químicos podem ser divididos em dois grupos, ataques químicos corrosivos e ataques químicos *Tint Etching* ou tingimento (BRAMFITT, LAWRENCE, 2004 apud SOUZA, 2008)

2.4.1. Ataques químicos corrosivos

O ataque químico corrosivo provoca uma corrosão seletiva controlada devido a diferença potencial eletroquímica entre a superfície e áreas com heterogeneidades físicas ou químicas. (GIRAULT et al, 1998). A forma e a velocidade que cada reagente ataca o material é dependente da composição química do metal, dos constituintes da microestrutura e da sua posição na escala eletroquímica, ou seja, de sua diferença de potencial em relação a solução, o mesmo é válido referente as diferentes fases presentes (FUKUGAUCHI, 2010), (DIAS, 2014).

Ataques químicos corrosivos normalmente são utilizados para análises metalográfica em escala de preto e branco, os reagentes de maior emprego são nital (solução de ácido

nítrico e álcool etílico), Picral (Solução de ácido pícrico e Álcool etílico) e Vilella (ácido pícrico, ácido clorídrico e álcool). (COLPAERT, 2008); (SOUZA, 2008); (DIAS, 2014).

2.4.2. Tint Etching

Ataques químicos denominados como *Tint Etching* utilizam o princípio da reflexão da luz branca do microscópio que incide sobre um filme depositado pelos reagentes na superfície do material analisado, cuja resposta é uma variedade de espectros de cores de acordo com as fases presentes e sua orientação cristalográfica (SOUZA, 2008).

- **REAGENTE NITAL**

O Nital, é uma solução versátil e muito utilizada em análises metalográficas rotineiras de aços comuns e ferros fundidos, é composto de ácido nítrico e álcool etílico, sua concentração geralmente varia de 2% a 5%, sua ação sobre esses materiais é atacar seletivamente os contornos de grãos ferríticos revelando-os (VORT, 1984) apud (SOUZA, 2008). Embora aplicado em larga escala este reagente apresenta uma série de limitações como aços com microestruturas mais complexas como bifásicas ou multifásicas, que além da Ferrita e Martensita encontram-se as fases Austenita Retida e Bainita, torna-se difícil a distinção entre elas ao microscópio óptico (SOUZA, 2008).

- **SOLUÇÕES PARA REVELAR TAMANHO DE GRÃO AUSTENÍTICO**

É importante identificar o tamanho de grão austenítico pois este tem influência nas propriedades dos aços, e para este tipo de análise é possível utilizar reagentes apropriados a fim de revelá-los, tanto para contornos de grão primários, ou para novos grãos austeníticos formados, uma destas soluções são as de ácido pícrico que podem conter além do ácido, água, detergente industrial ou outro agente tensoativo, ele funciona em aços de variadas microestruturas, incluindo aços bainíticos e martensíticos revelando contornos de grão austeníticos antes da transformação (COLPAERT, 2008)

Combinções dessas técnicas de ataques químicos, assim como, variações dos tipos e quantidades de reagentes, podem ser aplicadas para possibilitar a análise simultânea das características específicas e diferentes fases constituintes dos aços (SOUZA, 2008)

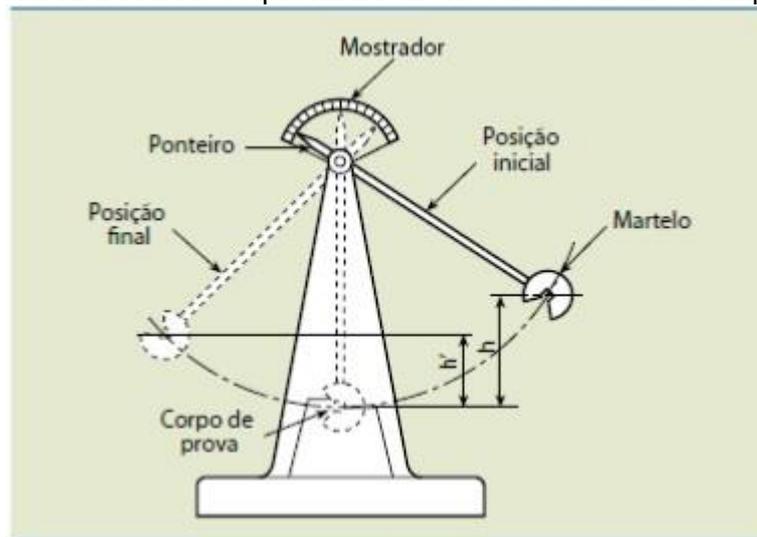
2.5. Ensaio de impacto e a tenacidade

A propriedade da tenacidade é a “capacidade de o material absorver energia mecânica sem se romper”, e pode ser medida através de ensaios normatizados, entre eles ensaio de impacto de Charpy e IZOD (GALLO, 2006)

2.5.1. Ensaio de impacto Charpy e Izod

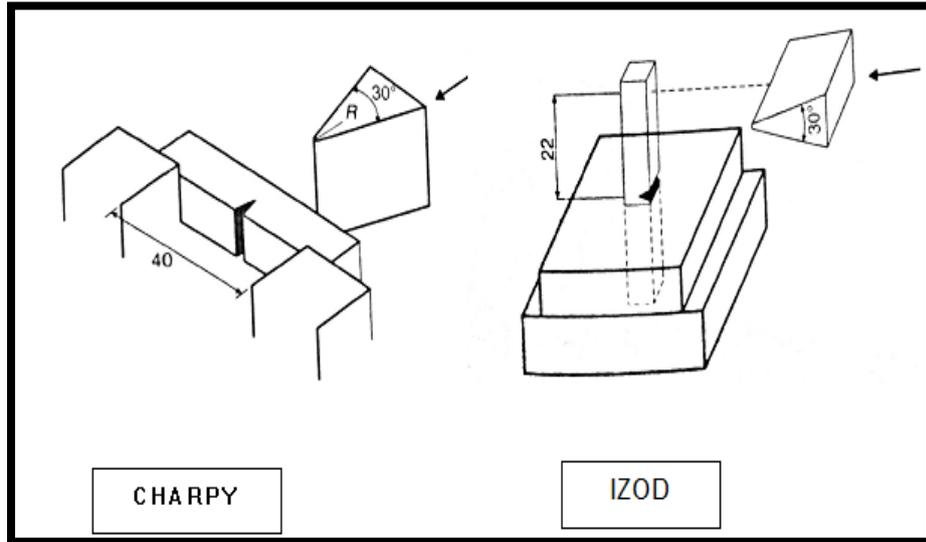
O ensaio de Charpy idealizado por Georges Augustin Aubert Charpy foi elaborado para que fosse possível avaliar a tenacidade dos materiais metálicos através do ensaio de corpos de prova entalhados de maneira padronizada, que são submetidos a esforços dinâmicos de impacto em um equipamento constituído de um martelo pendular que é liberado de uma altura inicial e que ao passar pelo seu ponto mais baixo entra em contato com o metal a ser ensaiado que por sua vez absorve energia até o rompimento, o martelo segue o curso até uma altura máxima menor de que a inicial, Esta energia absorvida pelo CDP (Corpos De Prova) é dada pela diferença entre as alturas iniciais e finais do pêndulo, a máquina de ensaio contém uma escala graduada em energia, Joule (J) que fornece a leitura direta (SOUZA, 1982); (GUIMARÃES, 1997); (SAMPAIO, 2011); (MANOEL, 2014). Na figura 12 é apresentado um desenho esquemático do método de ensaio de impacto Charpy e IZOD.

Figura 12 Desenho esquemático do método do ensaio de impacto



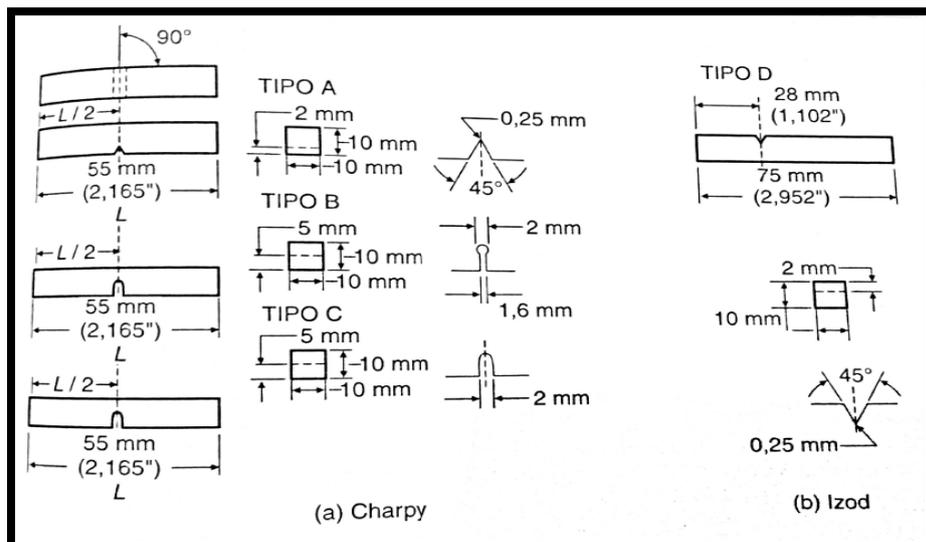
Fonte: FLORES (2018)

As principais diferenças entre o método Charpy e Izod estão na forma como os CDPs são ensaiados, seu posicionamento na máquina e o tipo e posição do entalhe na amostra. No ensaio de Charpy os corpos de provas são apoiados tendo seu entalhe do lado oposto a face de impacto do pêndulo enquanto o Izod a amostra fica engastada no equipamento do ensaio e a face entalhada será a que receberá o impacto do martelo, a figura 13 é uma representação desta distinção em relação ao posicionamento dos corpos de prova de Charpy e Izod (SOUZA, 1982).

Figura 13 Distinção de posicionamento entre CDPs de Charpy e Izod

Fonte: Garcia, 2015

Quanto aos corpos de prova, como pode ser observado detalhadamente na figura 14, o corpo de prova de Izod tem uma seção quadrada de 10 mm de lado, com 75 mm de comprimento e um entalhe em V localizado a 28 mm de uma das extremidades; o CDP de Charpy possui 55 mm de comprimento e seção transversal quadrada de 10 mm de lado e seu entalhe fica localizado no centro do comprimento da amostra, a norma ASTM E23 classifica os corpos de prova de acordo com o formato do entalhe nele confeccionado, tipo A para entalhes em V, tipo B para a forma de buraco de fechadura e tipo C para U invertido (SOUZA, 1982).

Figura 14 Dimensões e tipos de corpos de prova de impacto Charpy e Izod

Fonte: Garcia, 2015

2.5.2. Características do ensaio de impacto

O principal objetivo deste tipo de ensaio mecânico é avaliar a fragilidade dos materiais com a variação de parâmetros, principalmente com o da temperatura, o resultado obtidos por meio dele é mensurado pela energia absorvida pelo material em teste (SOUZA, 1982), além desta, são avaliados também a contração lateral da seção transversal fraturada e a aparência da superfície da fratura que são comparadas com outras amostras de ensaio padrão para determinar a porcentagem de fratura a frágil presente (GARCIA et al, 2015).

2.5.3. Fatores que influenciam nos resultados do ensaio de impacto

Os fatores que influenciam nos resultados do ensaio de impacto e no comportamento dúctil-frágil dos metais podem ser de origem física como formas, dimensões, entalhes dos corpos de prova e a taxa de deformação, e fatores metalúrgicos como composição química, tratamentos térmicos, tamanho de grão, orientação das amostras retiradas do material original; além destes a temperatura influencia fortemente neste comportamento (NOGUEIRA, 2006).

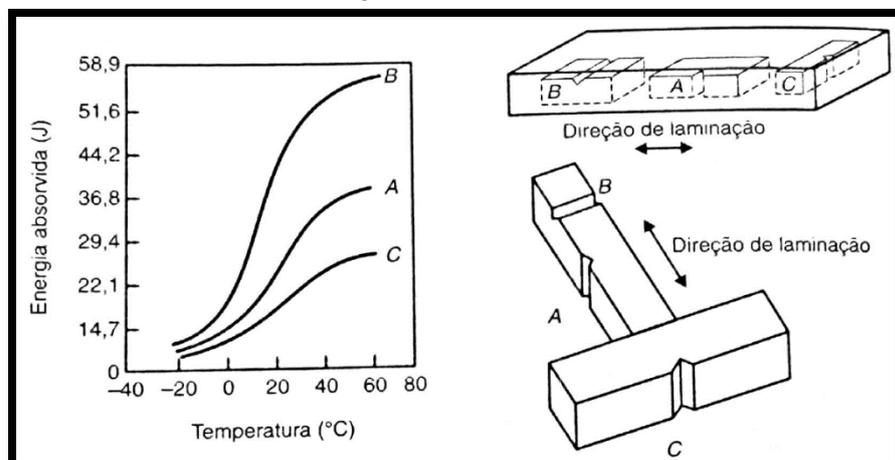
2.5.3.1. Entalhes

Entalhes em V tendem a absorver menor energia de impacto nas mesmas condições que entalhes com *keyhole*, buraco de fechadura (GARCIA et al, 2015).

2.5.3.2. Orientação da retirada dos corpos de provas

Devido a anisotropia dos materiais, a direção com que as amostras são retiradas do material original, chapa ou tarugo por exemplo, e que os entalhes são confeccionados influenciam nos resultados finais, principalmente na região de fratura dúctil (SOUZA, 1982), na figura 15 estão representados através das curvas a quantidade de energia absorvida durante o impacto variando com a temperatura e a direção de confecção do CDP e do entalhe em relação a direção de laminação.

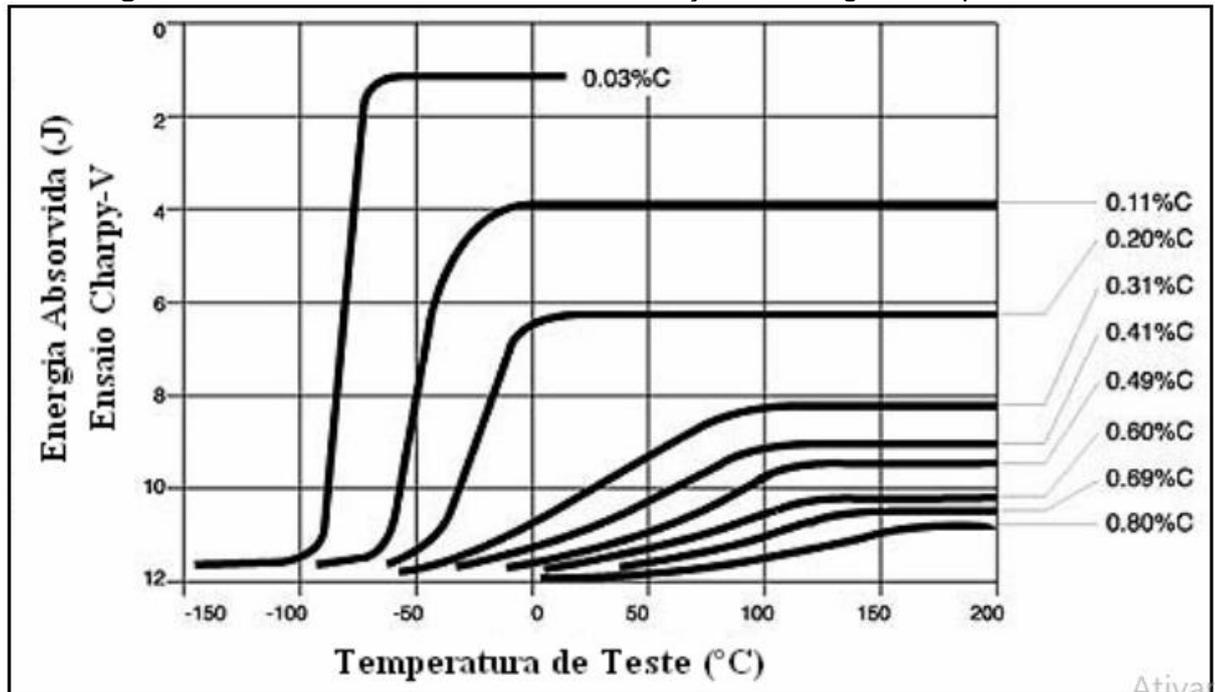
Figura 15 Influência da direção da confecção do corpo de prova na quantidade de energia absorvida



2.5.3.3. Composição química

Aços com menor porcentagem de carbono apresentam absorção de energia maior que aqueles com teores mais elevados (GARCIA et al, 2015), na figura 16 são apresentadas curvas que relacionam a energia absorvida por aços com diferentes porcentagens de carbono pela variação da temperatura.

Figura 16 Efeito do teor de carbono na absorção de energia de impacto



Fonte: GARCIA, 2015

2.5.3.4. Tamanho de grãos

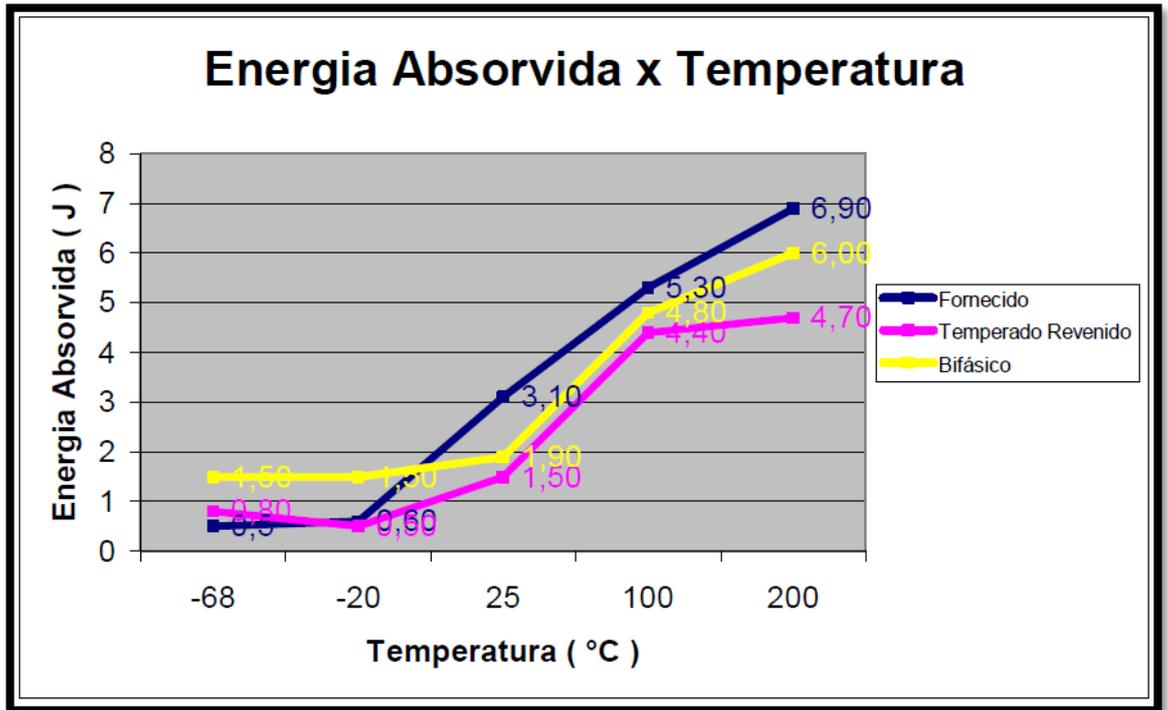
Em suma, materiais metálicos com grãos grosseiros apresentam menor resistência ao impacto, ou seja, é necessária uma quantidade menor de energia para rompê-lo (GARCIA et al, 2015).

2.5.3.5. Tratamento térmico

O tratamento térmico sendo um dos meios mais utilizados para modificação e controle da microestrutura, produz diferentes fases com propriedades mecânicas distintas, dependendo quais fases estão presentes o metal pode ser mais ou menos tenaz.

Gallo (2006) em seu trabalho com um aço médio carbono, estudou a influência do tratamento térmico e das fases formadas nas propriedades mecânicas, principalmente na tenacidade, foi avaliada as propriedades da microestrutura bifásica (martensita-ferrita), da martensita revenida e da perlita-ferrita, na figura 17 é mostrado um gráfico no qual é demonstrado os valores de energia absorvida pela temperatura em cada uma destas situações, onde é possível perceber como a tenacidade é afetada pelas fases resultantes de diferentes tratamentos térmicos.

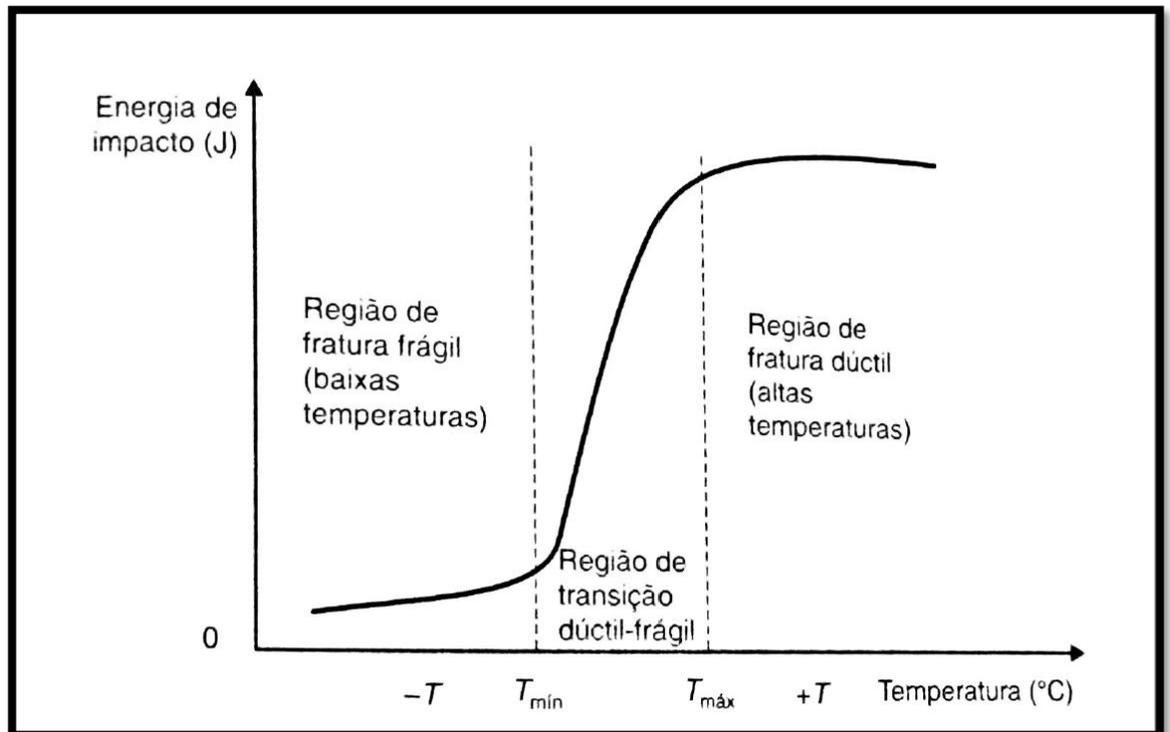
Figura 17 Energia absorvida X Temperatura X Microestrutura



Fonte: GALLO, 2006.

2.5.3.6. Temperatura

A influência da temperatura no comportamento mecânico dos metais têm sido alvo de muito estudo, em metais de baixa e média resistência cujo reticulado cristalino apresenta se sob a forma CCC (Cubico de Corpo Centrado), apresenta sensibilidade a variação de temperatura, podendo alterar seu comportamento de dúctil para frágil em uma faixa de temperatura, ou seja, em uma tempera T1 ao romper se por esforço mecânico apresenta uma característica de fratura dúctil com superfície fibrosa, em uma temperatura T2 mais abaixo que a primeira a superfície fratura apresenta aspecto cristalino mais liso e brilhante, característico de fratura frágil, por clivagem, e em uma temperatura intermediária denominada T3, tem um mistura das características de ambas situações possuindo caráter misto; Essa faixa de temperatura em que o material passa de um rompimento dúctil para um frágil e com essa miscelânea em seu intermédio é conhecido com faixa de temperatura de transição (SOUZA, 1982). Na figura 18 é exemplificado uma curva proveniente do ensaio de impacto que destaca a região de transição da fratura dúctil-frágil e a ação da temperatura sob a quantidade de energia de impacto recebida.

Figura 18 Curva de energia de impacto por variação da temperatura

Fonte: GARCIA, 2015

É válido salientar que metais como alumínio, titânio e cobre que apresentam estrutura cristalina do tipo CFC (cúbica de face centrada) apresentam fratura de caráter dúctil mesmo à baixas temperaturas (GARCIA et al, 2015).

2.6. Conceito de fratura dúctil e fratura frágil

Segundo Nogueira (2006), na classificação dos tipos de fratura têm se feito uso de diferentes critérios cuja origem remonta à diversas situações, o que gera certa confusão e polêmica, pois dependendo de quais critérios estão sendo adotados na análise, um mecanismo que para determinados parâmetros caracterizaria uma fratura frágil, pode ser caracterizada por propagação dúctil em outra situação; por exemplo um metal pode romper-se sem muita deformação plástica, o que normalmente seria classificado como fratura frágil no aspecto macrográfico, no entanto, à nível microscópico a deformação pode ter ocorrido devido a presença de microcavidades, o que levaria a interpretação de uma fratura dúctil. Como os critérios utilizados não são universais, é de suma importância que ao descrever e classificar uma fratura, os requisitos e critérios abordados estejam claros.

Sem pormenorizar, algumas das metodologias empregadas para classificação dos tipos de fratura podem ser em relação as condições de carregamento como sobrecarga, impacto, fadiga ou assistida pelo meio; pelo tipo de esforço sofrido tais como tração, compressão, flexão, cisalhamento, torção; e também pelo aspecto físico-visual, por exemplo, velocidade de propagação da trinca, visual da superfície fraturada, deformação plástica, tenacidade entre outros (NOGUEIRA, 2006).

Quando leva-se em consideração o aspecto físico-visual da fratura a classificação de frágil ou dúctil é realizada pela análise macroscópica com ou sem lentes de aumento da região rompida, caso seu aspecto seja fibroso é indicação de que o rompimento deu-se de maneira dúctil enquanto que a superfície fraturada de forma frágil, apresenta aspecto brilhante, cristalino e mais plano (GALLO, 2006). Na figura 19 é apresentada uma sequência de fotografias de corpos de prova de impacto com superfícies fraturadas com características dúcteis, frágeis e mistas, nela são apresentados a porcentagem de fratura dúctil pela caracterização da superfície rompida da amostra.

Figura 19 Superfícies de Fraturas de Corpos de Prova de Impacto

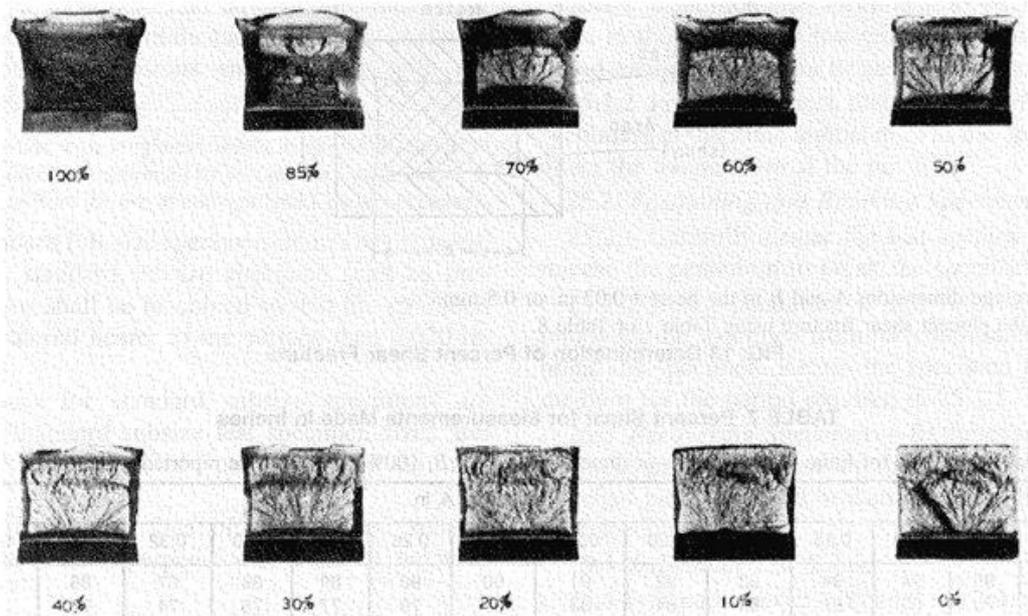


FIG. 14 Fracture Appearance Charts and Percent Shear Fracture Comparator

Fonte: ASTM E 23 (2011).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O material analisado é um aço AISI/ SAE 4340 de composição química listada na tabela 1 cujos valores foram retirados do certificado de qualidade emitido pelo fornecedor.

Tabela 1 Composição química do aço AISI/SAE 4340

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo
0,40%	0,23%	0,71%	0,02%	0,00%	0,77%	0,06%	1,79%	0,24%

Fonte: Autor

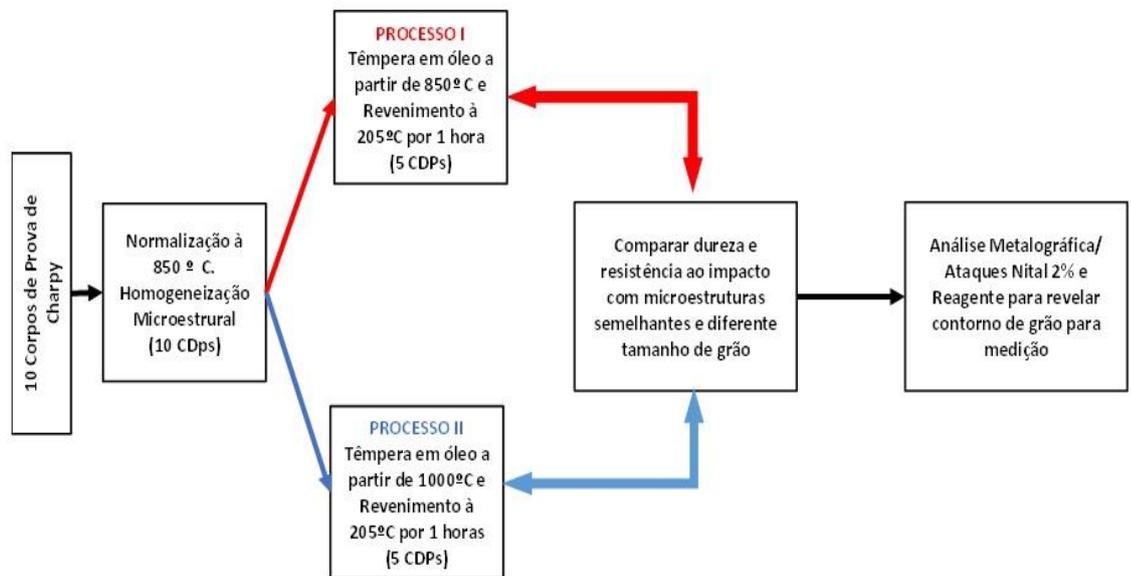
3.1. Confeção dos corpos de prova

No Senai Félix Guisard em Taubaté foram usinados 10 corpos de prova de Charpy seguindo as dimensões prescritas na norma ASTM E 23 (55 mm X10 mm X 10 mm), o entalhe em V foi confeccionado em uma “brochadeira manual”, no laboratório de Ensaios Mecânicos da Fatec Pindamonhangaba.

3.2. Processamentos térmicos

Na Figura 20 são mostrados em um fluxograma os processamentos térmicos realizados, os parâmetros adotados e objetivos pretendidos com cada variável.

Figura 20 Processos térmicos e parâmetros adotados



Fonte: Autor

Como é possível observar na figura acima, os 10 corpos de prova de charpy (CDPs) passaram inicialmente pelo processo de normalização para que sua microestrutura fosse homogeneizada, em seguida foram subdivididos em 2 lotes de 5 peças, cada amostra foi identificada com números e letras, conforme quadro na Figura 21.

Figura 21 Classificação dos lotes para tratamento térmico

LOTE	IDENTIFICAÇÃO
LOTE A	1A/ 2A/ 3A/ 4A/ 5A
LOTE B	1B/ 2B/ 3B/ 4B/ 5B

Detalhando os tratamentos térmicos da Figura 21 têm se:

- Lote A - Processo I: Temperatura de austenitização 850°C, tempo de patamar 24 minutos, têmpera em óleo e revenimento à 205°C por 1 hora.
- Lote B - Processo II; Temperatura de austenitização 1000°C, tempo de patamar 24 minutos, têmpera em óleo e revenimento à 205°C por 1 hora.

Todo o processamento térmico foi realizado no laboratório de tratamento térmico da Fatec Pindamonhangaba, e para isto foi utilizado um forno do tipo mufla da marca Grion, Figura 22.

Figura 22 Forno Mufla Grion utilizado para os processamentos térmicos

Fonte: Autor

3.3. Ensaios mecânicos

No laboratório de ensaios mecânicos da Fatec Pindamonhangaba foram realizados os testes de Impacto charpy e de dureza.

O teste de impacto de charpy foi realizado em temperatura ambiente de 25°C em uma máquina Instron Wolpert PW 30 com martelo de 30 kg, Figura 23.

O teste de dureza foi feito segundo a norma ASTM E18 na escala Rockwell C (HRc) em um durômetro Panatec ATMI com penetrador tipo pirâmide com carga de 150 Kg, Figura 24.

Figura 23 Máquina de Teste De Impacto



Figura 24 Durômetro Panatec



Após os ensaios, foram retiradas da seção transversal de dois corpos de prova de charpy, sendo um do lote A e outro do lote B, amostras para caracterização metalográfica e medição do tamanho do grão austenítico.

3.4. Análise metalográfica

As superfícies das fraturas foram avaliadas visualmente e registradas em fotografias com uma câmera digital da marca Olympus 200, foi analisada o caráter fractográfico das mesmas quanto a presença de indícios de clivagem e de rugosidade sinais de propagação frágil ou dúctil do rompimento, e também foi avaliada se há contração da seção transversal rompida.

Para a análise da microestrutura do material, foram seccionadas amostras da seção transversal dos corpos de prova, essas amostras foram embutidas a quente em baquelite na dimensão de 30 mm em uma embutidora Arotec 300.

O procedimento metalográfico deu-se de maneira habitual, utilizando sequência de lixas d'água de granulometrias 180, 220, 320, 600 e 1000, 1200, 1500 e 2000 mesh, sempre girando a amostra em 90° em relação ao lixamento anterior.

O polimento foi realizado com alumina da marca Buelher de 6 µm, 3 µm e 1 µm e 0,30 µm.

Todas as amostras metalográfica foram preparadas no laboratório de metalografia da Fatec Pindamonhangaba.

3.5. Ataques químicos

Os reagentes químicos utilizados para a revelação da microestrutura do material foram Nital (Ácido Nítrico e Álcool Etílico) e um reagente para revelação do contorno de grão (Ácido Pítrico, Ácido Clorídrico, Água Destilada e agente tensoativo)

Todo este procedimento foi realizado no laboratório químico da Fatec Pindamonhangaba.

3.5.1. Nital

O primeiro ataque químico foi realizado com nital na concentração de 2%, as amostras foram submergidas no reagente com o auxílio de uma pinça de inox sempre com movimentos suaves para que os gases soltos durante a reação do metal com a solução não impedissem que áreas da superfície das amostras fossem atacadas de forma não homogênea, o tempo de permanência na solução foi de aproximadamente de 10 segundos, posteriormente o ataque foi interrompido com água corrente, foi aspergido álcool etílico para que auxilia se na secagem da amostra com jato de ar quente proveniente do secador de cabelos.

3.5.2. Reagente para revelação do contorno de grão

Tendo como base os estudos de Voort (2010) e Moreirar *et al* (2015), optou-se pela composição química do reagente e as técnicas por eles utilizadas.

A composição química do reagente é (3 g de ácido pítrico, 0,5 ml de HCl, 250 ml de água destilada e 10 gotas de detergente neutro YPÊ como agente tensoativo)

A amostra foi imergida com sua superfície polida com sua face voltada para cima em um béquer contendo o reagente à temperatura de aproximadamente 20°C, o conjunto foi levado à um aparelho de limpeza ultrassônica com água abaixo do nível da solução para que não houvesse tombamento, permaneceu por 26 minutos e foi seguido por interrupção por meio de água corrente, secagem com jato de ar frio antecedida por aspersão de álcool etílico.

Posteriormente foi feito um polimento leve para melhor evidenciar os contornos de grão.

3.5.3. Reagente para revelar contorno de grão mais ataque com nital

A título de experiência e inspirado pelo trabalho de Souza (2008), que realizou um ataque prévio com o reagente Nital e posterior solução para revelar o tamanho de grão produzindo ótimos resultados, optou se por realizar um ataque semelhante que combina se a ação dos dois reagentes, diferentemente do estudo mencionado, neste trabalho foi realizado primeiramente o procedimento para revelar o tamanho de grão e posteriormente reagiu se a amostra com Nital por imersão no tempo de 10 segundos, seguido de aplicação de água corrente, álcool etílico e jato de ar quente.

3.6. Caracterização microestrutural e tamanho de grão

Para caracterização microestrutural das amostras, foi utilizado o software analySIS auto e o dimensionamento do tamanho de grão foi realizada com a técnica por contagem planimétrica segundo a norma ASTM E 112.

Para o dimensionamento do tamanho de grão pelo método planimétrico foram adotados os seguintes passos, descrito abaixo e ilustrado na Figura 26.

Passo 1: Obtenção da fotomicrografia de 5 regiões distintas de cada amostra, figura 25 utilizando o aumento de 100x.

Passo 2: Alterar a imagem para tons de cinza ou 8 bits.

Passo 3: Com a ferramenta “*Define separator*” indicar para o software o que deve ser considerado como contorno de grão.

Passo 4: Verificar se o contorno delineado pelo programa de fato corresponde ao que se deseja.

Por fim após esses passos, basta utilizar a ferramenta de contagem planimétrica, os resultados serão emitidos em forma de gráficos com a frequência de distribuição dos grãos por tamanho, e também uma planilha identificando o número ASTM G.

Figura 25 Regiões as quais foram mensurados o tamanho de grão

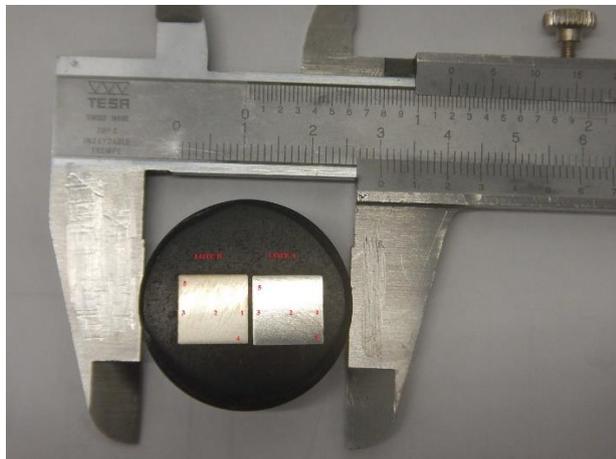
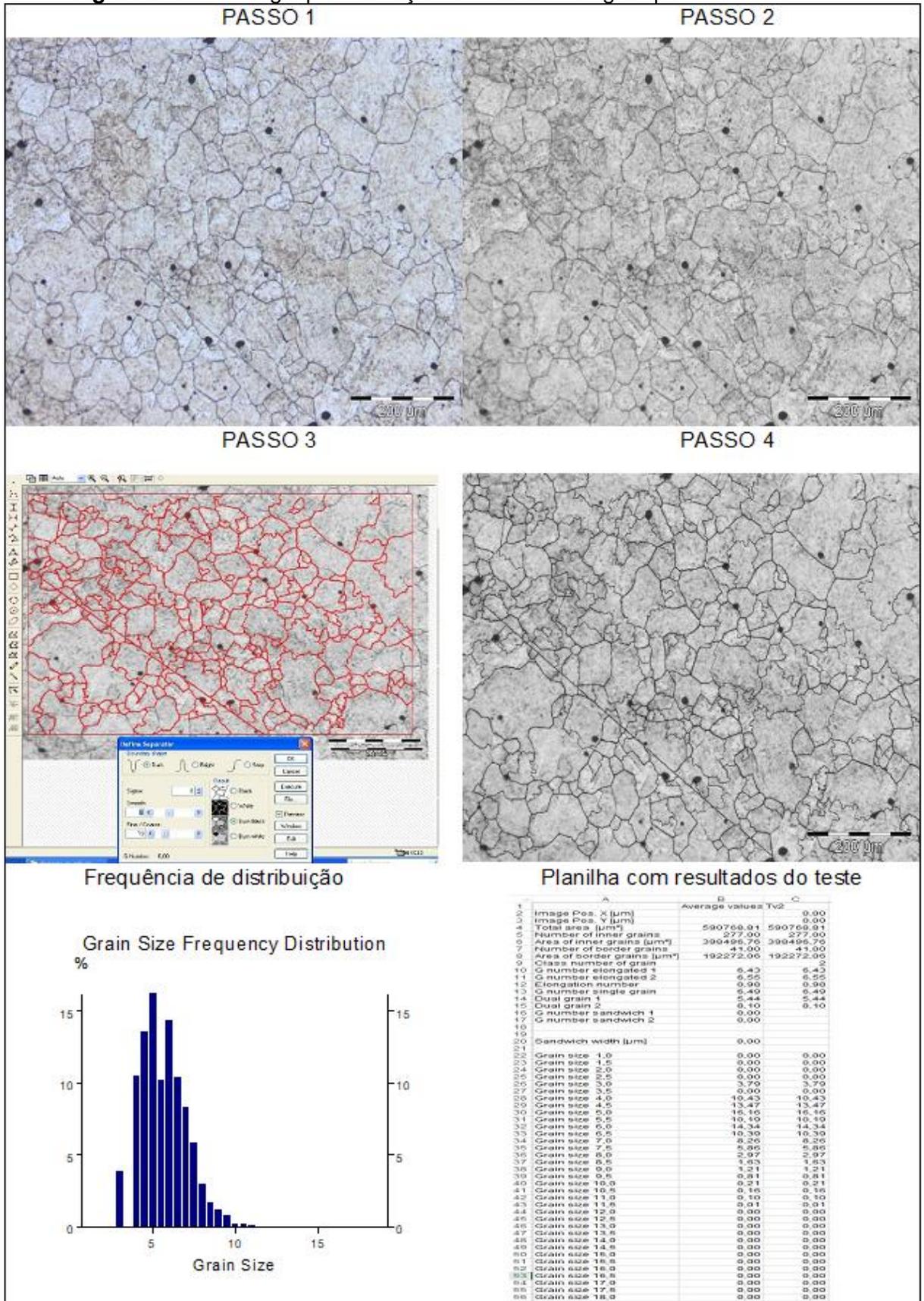


Figura 26 Metodologia para medição do tamanho de grão pelo software



4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Ensaio mecânicos

Nas Figuras 27 e 28 são apresentados os gráficos com a distribuição das médias dos resultados de dureza e de resistência ao impacto dos corpos de prova ensaiados

Figura 27 Gráfico resultados do teste de dureza

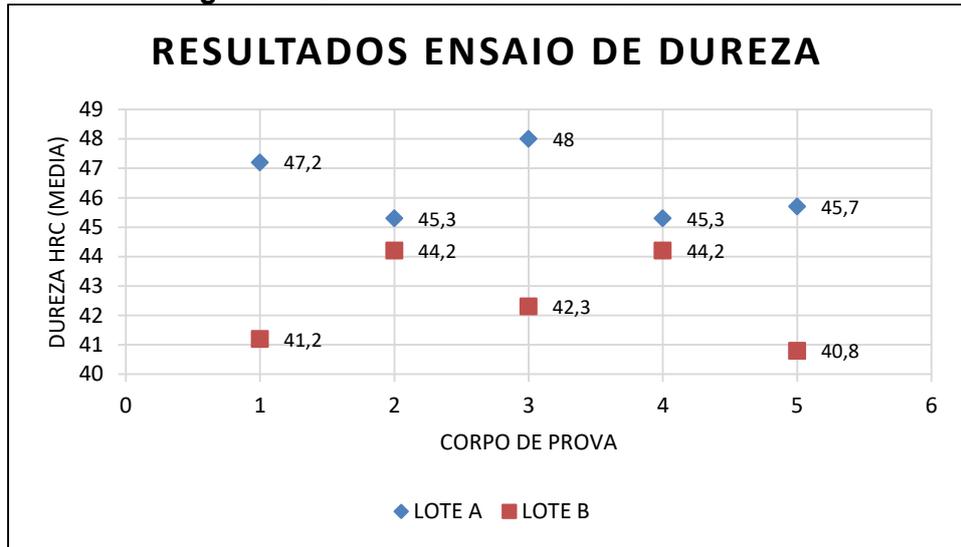
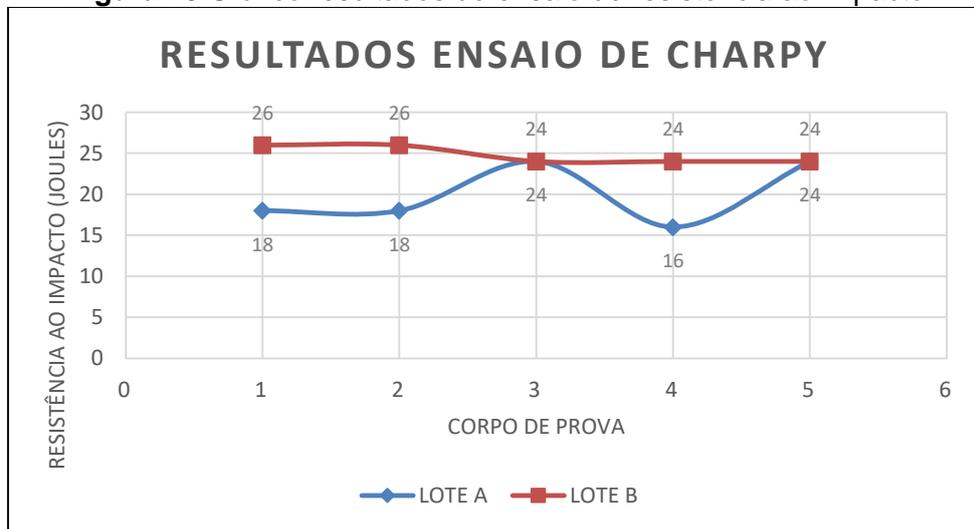


Figura 28 Gráfico resultados do ensaio de resistência ao impacto



Pela observação dos gráficos verifica-se que o lote B, que passou pelo processo térmico de têmpera e revenimento com temperatura de encharque de 1000°C resultou em valores de dureza menores em relação ao lote A, cujo tratamento térmico utilizado foi o mesmo, mas a temperatura de austenitização foi de 850°C. Quando analisa-se os resultados do ensaio de Charpy, verifica-se que embora o LOTE B tenha um tamanho médio de grão maior que o do LOTE A, resultado este que será apresentado mais adiante, aquele apresentou maiores valores de energia absorvida para o rompimento de seus corpos de prova, segundo

Schuller (2016), o que pode ter ocasionado isto é que a utilização da temperatura de austenitização de 1000°C, permitiu uma maior dissolução dos carbonetos fragilizantes.

No anexo A, são apresentados em forma de tabela todos os valores de dureza com suas respectivas médias e desvio padrão, tal qual a resistência ao impacto.

As Figuras 29 e 30 são referentes à uma visão geral do aspecto fractográfico das amostras rompidas no ensaio de impacto charpy, e as Figuras 31 e 32 são macrofotografias da superfície da fratura dos corpos de provas dos quais foram retiradas amostras metalográficas.

Figura 29 Aspecto fractográfico das amostras do lote A

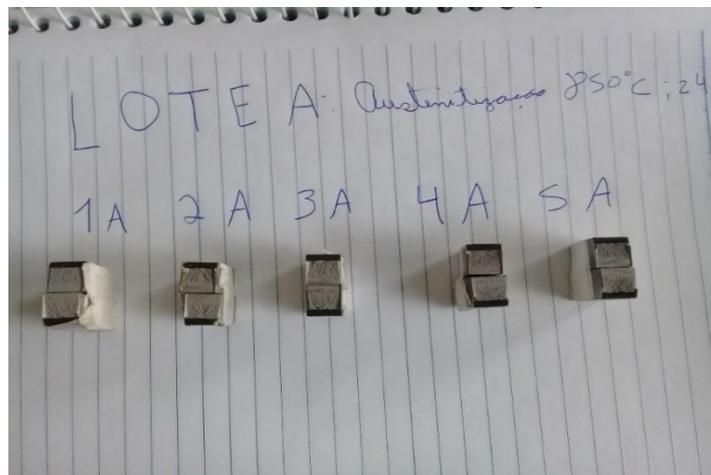


Figura 30 Aspecto fractográfico das amostras do lote B

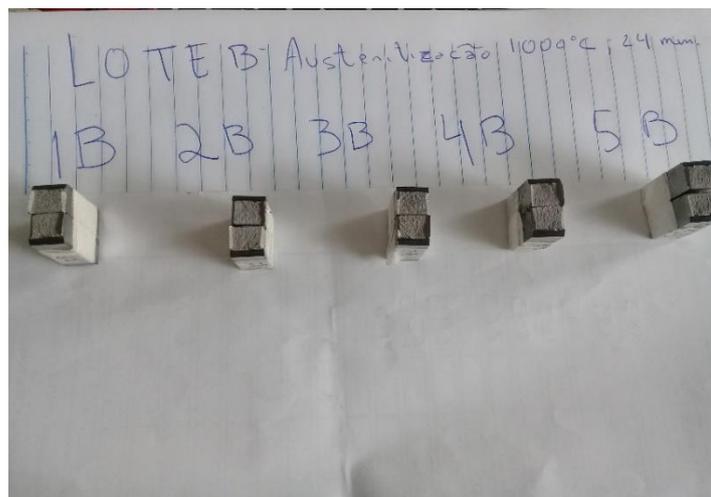
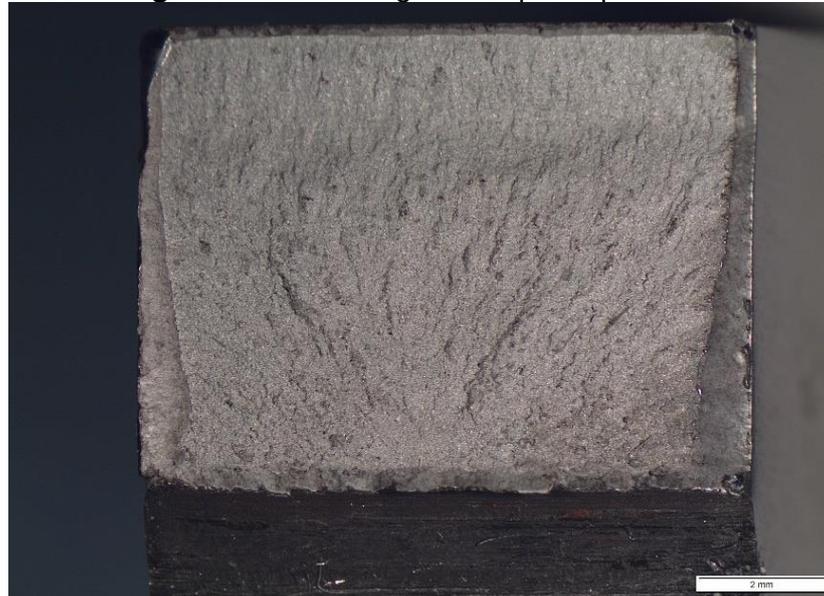


Figura 31 Macrofotografia corpo de prova 2A



Aumento: 10x

Figura 32 Macrofotografia corpo de prova 2B



Aumento: 10x

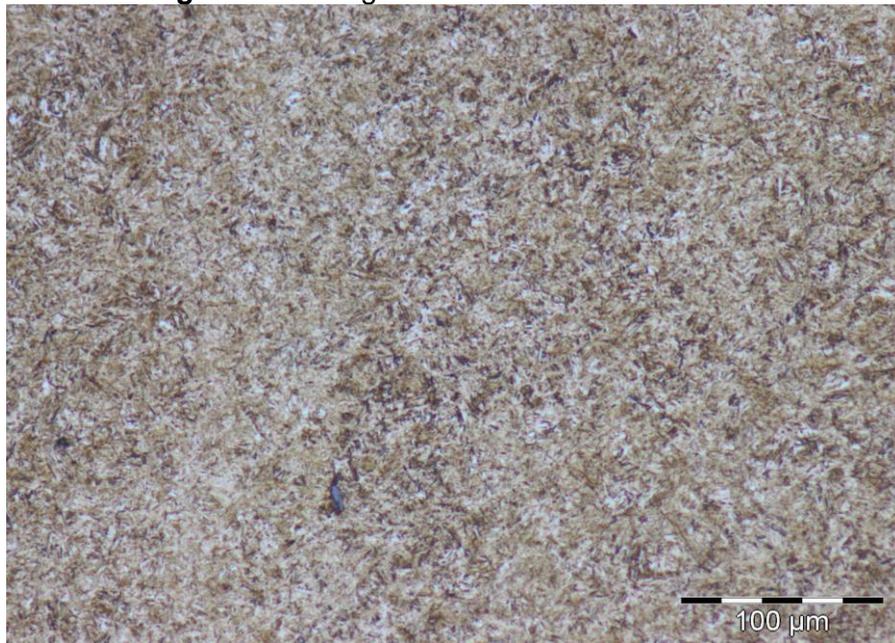
Ao observar as Figuras 31 e 32 da superfície do material rompido constata-se que a fratura correu de maneira frágil.

4.2. Ataques químicos e análise metalográfica

4.2.1. Reagente Nital

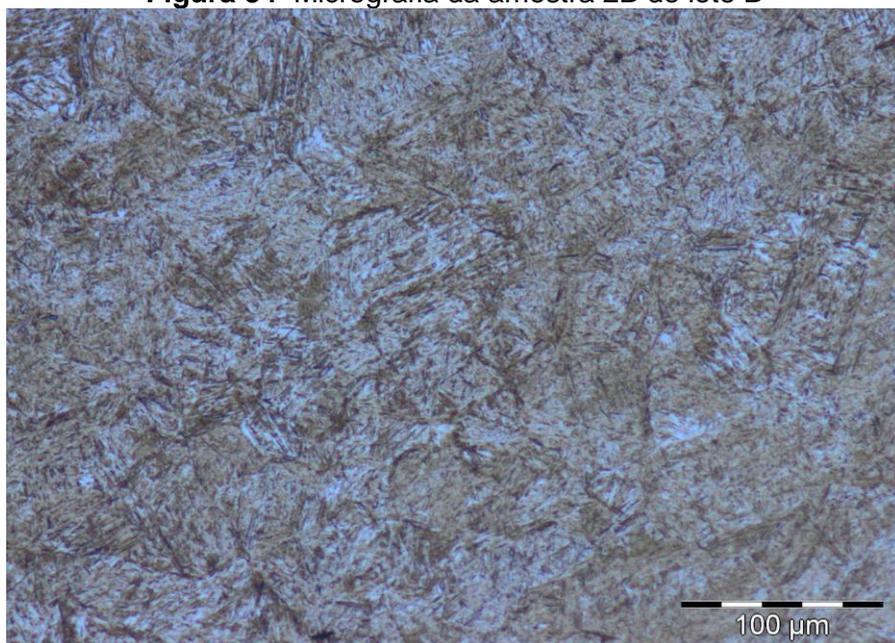
O ataque químico das amostras com o reagente nital 2% revelou uma microestrutura composta majoritariamente por martensita revenida e uma quantidade mínima de austenita retida, devido a não transformação martensítica durante o resfriamento em óleo, nas Figuras 33 e 34 são respectivamente referentes a micrografia da seção transversal das amostras 2A do lote A e 2B do lote B.

Figura 33 Micrografia da amostra 2A do lote A



Aumento 200x: Ataque Nital 2% imersão 10 segundos

Figura 34 Micrografia da amostra 2B do lote B

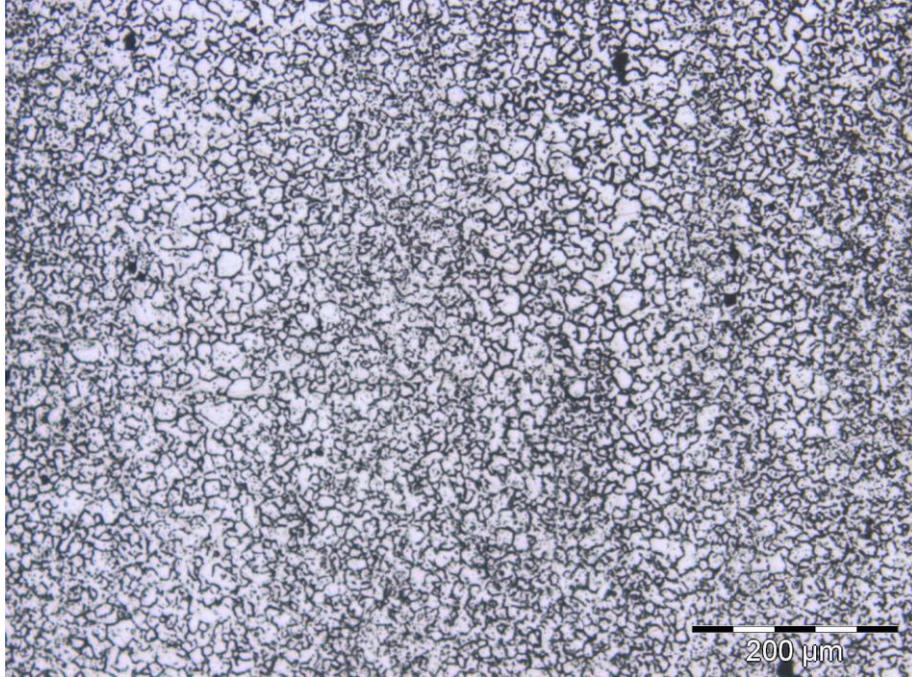


Aumento 200x: Ataque Nital 2% imersão 8 segundos

4.2.2. Reagente para revelação do contorno de grão e análise quantitativa

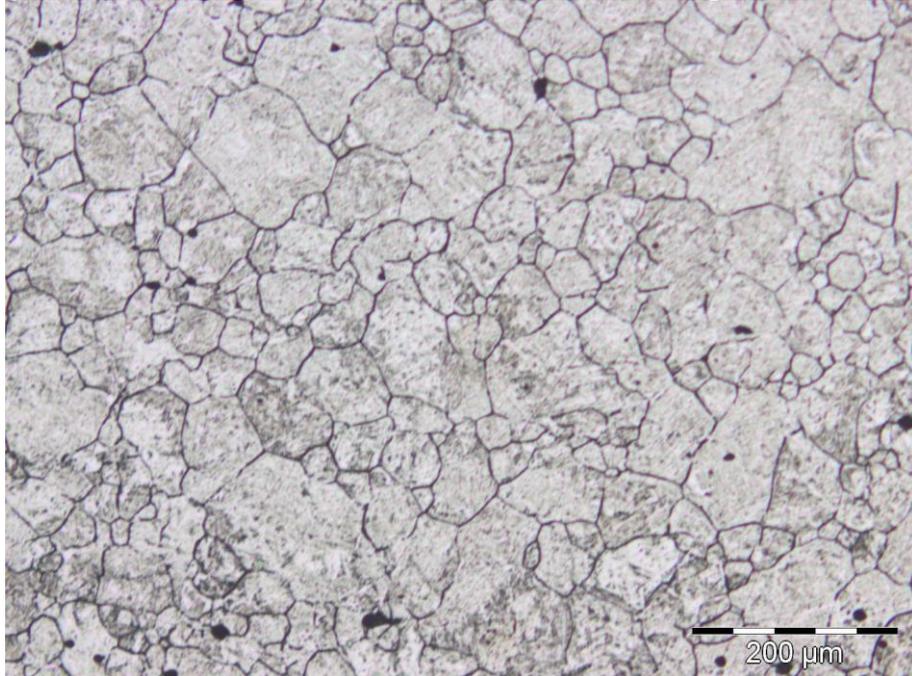
Nas Figuras 35 e 36 são apresentadas as microfotografias das mesmas amostras das imagens anteriores, nelas são retratados os contornos do grão austeníticos primários revelados pelo reagente.

Figura 35 Microfotografia da amostra 2A, contornos de grãos austeníticos



Aumento 100x: Reagente para revelação contorno de grão imersão

Figura 36 Microfotografia da amostra 2B, contornos de grãos austeníticos



Aumento 100x: Reagente para revelação contorno de grão imersão

Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos pela medição de tamanho de grão segundo a norma ASTM E 112 pelo método de contagem planimétrica.

Tabela 2 Número ASTM G de tamanho de grão

AMOSTRA		REGIÃO 1	REGIÃO 2	REGIÃO 3	REGIÃO 4	REGIÃO 5	Média	Desvio Padrão
LOTE A	NÚMERO ASTM G	9,62	9,39	9,39	9,40	9,61	9,48	0,12
LOTE B	NÚMERO ASTM G	6,57	6,49	6,61	6,54	6,49	6,54	0,05

Como pode ser observado pelos resultados, no LOTE A os grãos apresentam o número ASTM G maior, que indica o tamanho médio do grão menor do que aqueles encontrados na amostra referente ao LOTE B, demonstrando assim que a escolha do parâmetro da temperatura para provocar o crescimento do tamanho de grão do material foi efetiva. As Figuras 37 e 38 são dois dos gráficos de distribuição em porcentagem dos grãos de acordo com o tamanho e o número ASTM G de cada lote.

Figura 37 Distribuição do tamanho médio de grão amostra LOTE A

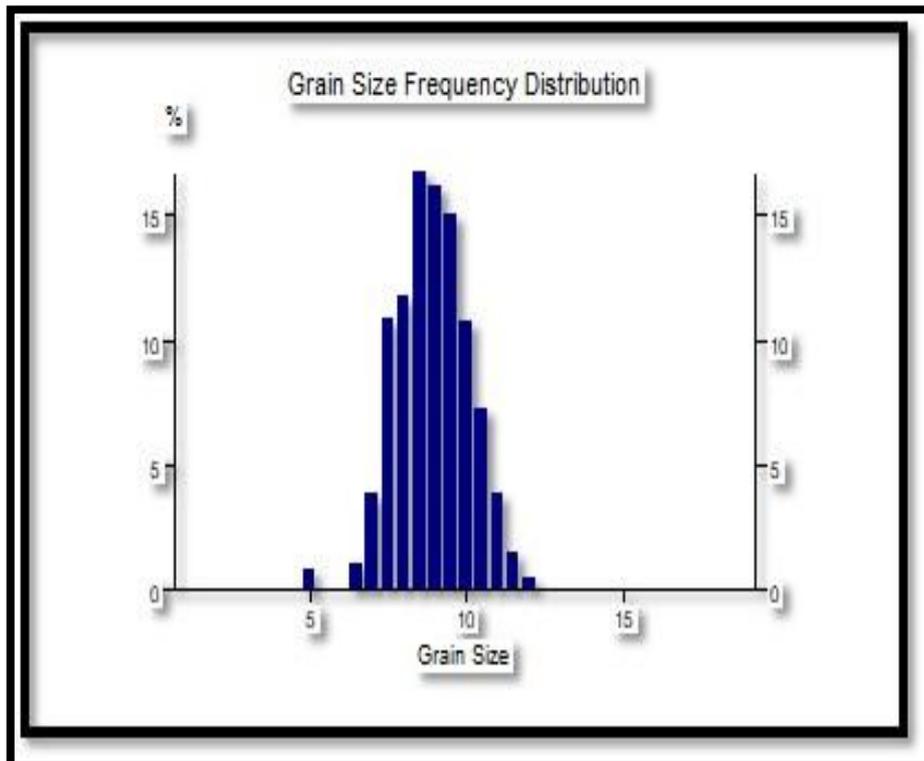
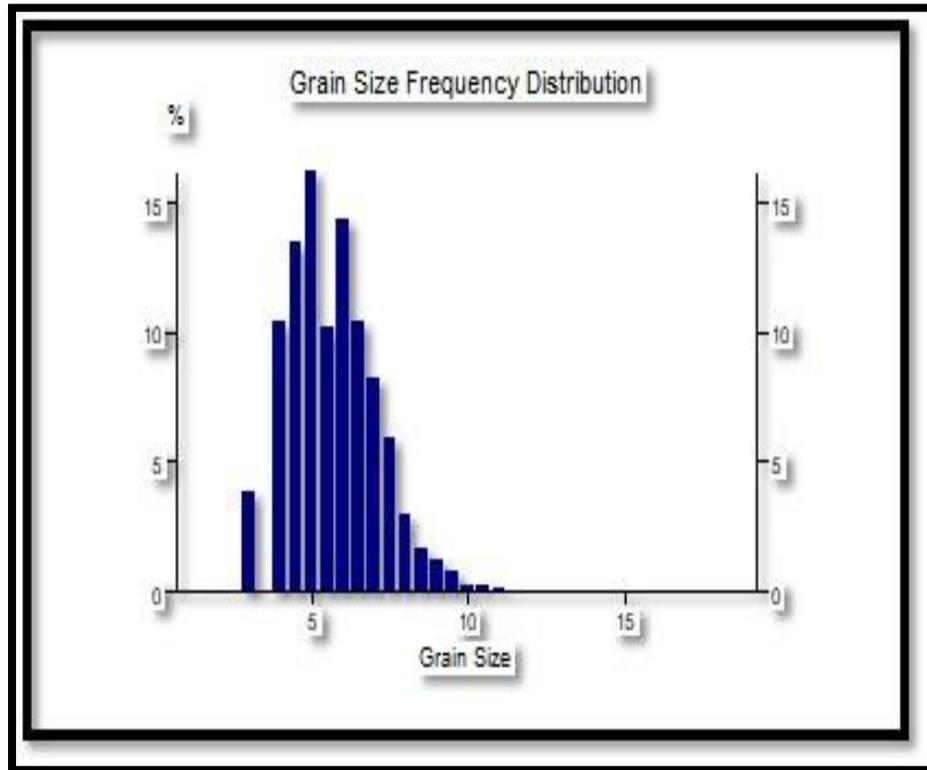
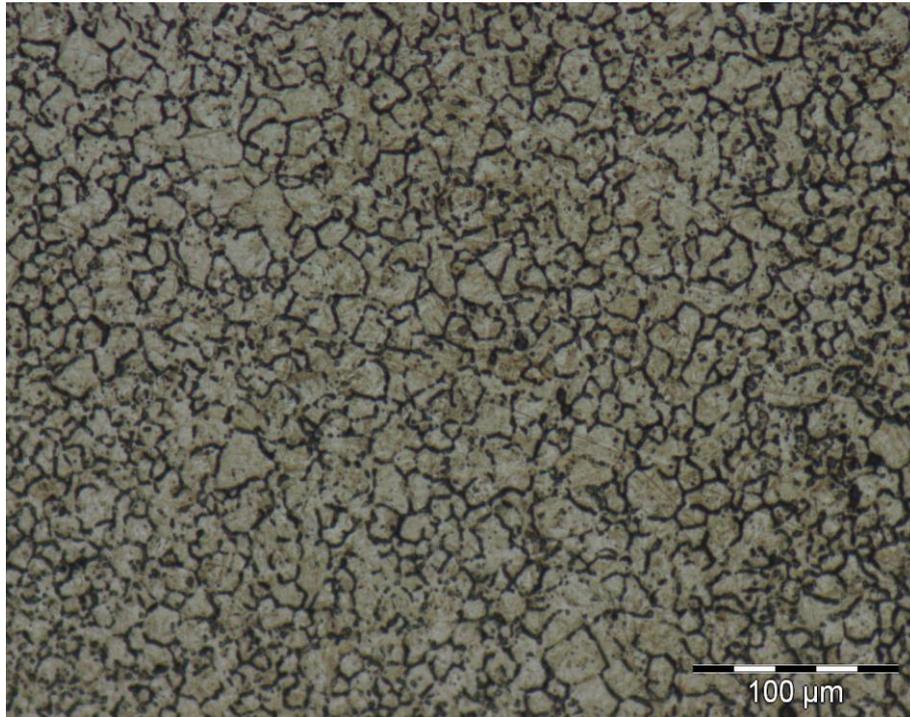


Figura 38 Distribuição do tamanho médio de grão amostra LOTE B

As Figuras 39 e 40, são microfotografias das amostras de ambos os lotes que além do procedimento para a revelação do tamanho de grão, utilizou se o ataque subsequente com o reagente Nital, é possível observar as ripas de martensita contidas no interior do grão austenítico primário.

Figura 39 Microfotografia da amostra do LOTE A com ataque combinado



Aumento 200x: Reagente para revelação contorno de grão e nital 2%

Figura 40 Microfotografia da amostra do LOTE B com ataque combinado



Aumento 200x: Reagente para revelação contorno de grão e nital 2%

5. CONCLUSÕES

Como o objetivo deste estudo é comparar as propriedades mecânicas do aço SAE 4340 submetido a têmpera e revenimento com duas temperaturas diferentes de austenitização e relaciona-las a microestrutura final obtida tem se que:

- A elevação da temperatura de austenitização de 850°C para 1000° C foi efetiva para provocar o crescimento de grão;
- A dureza do material é maior para aquele que contém menor tamanho médio de grão, ou seja, aquele cuja temperatura de encharque foi à 850° C;
- Embora o grão do aço que foi austenitizado à 1000°C seja maior, este apresentou maior resistência ao impacto à temperatura de 25°C devido a dissolução dos carbonetos fragilizantes dos contornos de grão para a matriz;

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Comparar a resistência ao impacto de um aço SAE 4340 de microestrutura multifásica com diferente tamanho de grão e com microestrutura martensítica
- Comparar a resistência ao impacto de um aço SAE 4340 com microestrutura bainítica tratado isotermicamente e o mesmo material temperado e revenido.
- Fazer a curva de transição dúctil-frágil para o aço SAE 4340 multifásico e temperado e revenido.

6. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 23**: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. São Paulo: Astm, 2011. 28 p. Disponível em: <[http://mhriau.ac.ir/_DouranPortal/Documents/ASTM E23 \(impact test\)_20160406_233024.pdf](http://mhriau.ac.ir/_DouranPortal/Documents/ASTM_E23_(impact_test)_20160406_233024.pdf)>. Acesso em: 11 dez. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 112**: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. São Paulo: Astm, 2010. 26 p. Disponível em: <http://mhriau.ac.ir/_DouranPortal/Documents/> Acesso em: 11 dez. 2017

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 18-03**: Standard Test methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of metallic materials, ASTM 2003. 22p. Disponível em <https://pt.slideshare.net/ManthanChavda2/astm-e18-88395764>. Acesso em 13/03/2018

BASTOS, Dinara Mendes; MUI, Taiana Sher Mir. **Técnicas Metalográficas para identificação de contornos de grão da austenita prévia em aço de médio carbono**. 2011. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Processos Metalúrgicos, Fatec Indamonhangaba, Pindamonhangaba, 2011.

BELTRÃO, M. A. N. PUC- RIO **Aço alta resistência e baixa liga (ARBL)**. Disponível em: <http://www.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0511137_09_cap_02.pdf> Acesso em 15/11/2017

BRAMFITT, B. L.; SPEER, J. G. A Perspective on the Morphology of Bainite. Metallurgical Transactions A, v.21, p.817-829, April, 1990.

CALLISTER, W. D. Jr. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5ª Edição. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2002. 589p.

CHIAVERINI, V. **Tratamento térmico das ligas metálicas**; Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais; 1ª Edição, 2003. 240 p.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. 600 p. Revista e Ampliada.

CHIANG, J; LAWRENCE, B; BOYD, J.D; PILKEY, A.K. **Effect of microstructure on retained austenite stability and work hardening of TRIP steels**, Materials Science and Engineering, 2011, Disponível em: www.elsevier.com/locate/msea, Acessado em 20 de Junho de 2018.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008. 652 p. 4ª Edição Revista e Atualizada por André Luiz V. da Costa e Silva.

DIAS, Erica Ximenes. **CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA DE UM AÇO DE FASES COMPLEXAS (CP)**. 2014. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Materiais, Universidade Estadual Paulista Campus Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2014. Disponível em: <<http://www.parthenon.biblioteca.unesp.br>>. Acesso em: 27 nov. 2017.

FUKUGAUCHI, Cristina Sayuri. **METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA DE UM AÇO TRIP POR MICROSCOPIA ÓPTICA**. 2010. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Materiais, Unesp Faculdade de Engenharia Campus Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2010. Disponível em: <<http://www.parthenon.biblioteca.unesp.br>>. Acesso em: 19 nov. 2017.

GALLO, Giulliano Batelochi. **Influência do tratamento térmico sobre a tenacidade de um aço AISI SAE 1045 com médio teor de carbono, avaliada por ensaio de impacto**. 2006. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Projetos e Materiais, Universidade Estadual Paulista Campus Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2006. Disponível em: <http://www.parthenon.biblioteca.unesp.br:1701/primo_library/libweb/action/search.do>. Acesso em: 01 dez. 2017.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2015. 384 p.

GIRAULT, E.; JACQUES, P.; HARLET, Ph.; MOLS, K.; HUMBEECK, J. V.; AERNOUDT, E.; DELANNAY, F. Metallographic Methods for Revealing the Multiphase Microstructure of TRIP-Assisted Steels. **Materials Characterization**. N.40, p.111-118. 1998.

LEE, Woei-Shyan; Su, Tzay-Tian. Mechanical Properties and Microestrutural Features of AISI 4340 High-Strength Steel Under Quenched and Tempered Conditions. **Journal of Materials Processing Technology**, n.87, p.198-206. 1999.

MANOEL, P. A. F. **Influência de parâmetros físicos e do processamento digital utilizado nos sinais oriundos do ensaio Charpy instrumentado**. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista - UNESP – Campus de Ilha Solteira, 180p, 2014. Disponível em: <<http://www.parthenon.biblioteca.unesp.br>>. Acesso em: 29 nov. 2017

MOREIRAR, Paulo Sérgio; FARIA, Geraldo Lúcio; FORTES, Reinaldo Clemente; RODRIGUES, Reginaldo Arcanjo. AVALIAÇÃO DE DIFERENTES TÉCNICAS DE CONTRASTE PARA REVELAR O CONTORNO DE GRÃO AUSTENÍTICO PRÉVIO EM AÇOS. **Anais do Congresso Anual da Abm**, Rio de Janeiro, v. 70, n. 70, p.212-220, ago. 2015. Anual. Disponível em: <<https://abmproceedings.com.br/ptbr/event/70-congresso-anual-da-abm>>. Acesso em: 19 jun. 2018.

NOGUEIRA, Fabiano da Cruz. **Influência do raio da ponta do entalhe, do tipo de carregamento e da microestrutura no processo à fratura do aço estrutural ABNT 4340**. 2006. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Mecânica,

Universidade Estadual Paulista Campus Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2006. Disponível em: <http://www.parthenon.biblioteca.unesp.br:1701/primo_library/libweb/action/search.do>. Acesso em: 30 nov. 2017.

SAMPAIO, Marcelo Santos. **Caracterização em impacto e fadiga do aço estrutural de fases complexas, utilizado na indústria automotiva**. 2011. 176 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Projetos e Materiais, Universidade Estadual Paulista Campus Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2011. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/105355/martins_ms_dr_guara.pdf?sequence=1>. Acesso em: 25 nov. 2017.

SCHULLER, Daniel; **Determinação da tenacidade à fratura do aço aeronáutico 300M, submetido a diferentes parâmetros de tratamento térmicos e criogenia, utilizando a técnica de corpo cilíndrico com entalhe**, 2016. 147 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de materiais da Universidade de São Paulo- São Carlos 2016. Disponível em : <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18158/tde-12052016-092247/pt-br.php>, Acesso em 15 Jul. 2018.

SILVA, Aluísio Pinto da. **Estudo da transformação da austenita retida induzida por deformação, em um aço AISI 4340 com estrutura multifásica**. 2006. 125 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Projetos e Materiais, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2006. Disponível em: <http://www.parthenon.biblioteca.unesp.br:1701/primo_library/libweb/action/search.do>. Acesso em: 01 nov. 2017.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas especiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 646 p.

SOUZA, Sergio Augusto de. **Ensaio mecânico de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, 1982. 286 p.

SOUZA, Gisélia Alves de. **CHARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE UM AÇO MÉDIO CARBONO E BAIXA LIGA (COM ESTRUTURA BAINÍTICA/MARTENSÍTICA) VIA MICROSCOPIA ÓPTICA**. 2008. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Projetos e Materiais, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2008. Disponível em: <<http://www.parthenon.biblioteca.unesp.br>>. Acesso em: 01 nov. 2017.

VAN VLACK, Lawrence Hall. **Princípio de Ciência dos Materiais**. São Paulo: Editora Blucher, 1970. 378 p. Traduzido pelo Engenheiro Luiz Paulo Camargo Ferrão. 15ª Reimpressão-2007.

VAN VLACK, Lawrence Hall. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. 4. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1984. 567 p. Tradução Edison Monteiro, 26ª Tiragem.

VOORT, George F. Vander. Revelando Contorno de Grão Austenítico Primário em Aços Tratados Termicamente. **Industrial Heating**: The International Journal of Thermal technology, Campinas, v. 1, n. 9, p.18-24, out. 2010. Disponível em: <https://issuu.com/sfeditora/docs/2010.10_ih__alta_>. Acesso em: 19 jun. 2018.

<https://paginas.fe.up.pt/~falves/DiagramaFeC.pdf>. Acesso 13/08/2018.

<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAhaYAE/pfa-influencia-conformabilidade#>

<http://engfabioflores.blogspot.com>. Acessado em 15/04/2018

<http://www.ggdmetals.com.br/produto/sae-4340/> acessado em 06/09/2017

<http://www.tenax.com.br/tenax/produtos/acos-para-construcao-mecanica/sae-4340/> acessado em 06/09/17

**ANEXO A- RESULTADOS DO ENSAIO DE DUREZA ESCALA HRC E
RESISTÊNCIA AO IMPACTO CHARPY**

Amostra	Processo Térmico	DUREZA (HRC)					ENSAIO DE CHARPY (JOULES)
		PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	
1A	I	48,5	47,5	45,5	47,2	1,25	18
2A	I	44,0	45,0	47,0	45,3	1,25	18
3A	I	48,5	48,0	47,5	48,0	0,41	24
4A	I	43,0	46,5	46,5	45,3	1,65	16
5A	I	47,0	44,5	45,5	45,7	1,03	24
1B	II	38,0	42,5	43,0	41,2	2,25	26
2B	II	45,0	44,5	43,0	44,2	0,85	26
3B	II	44,0	43,0	40,0	42,3	1,70	24
4B	II	45,0	44,0	43,5	44,2	0,62	24
5B	II	41,5	41,0	40,0	40,8	0,62	24