

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO**

**Tecnologia em Materiais**

Julio Cesar Justo

**AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA DE ENCHARQUE E DA  
VELOCIDADE DE RESFRIAMENTO NA TENACIDADE DO AÇO SAE  
1045 NORMALIZADO**

**São Paulo**

**2015**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO**  
**Tecnologia em Materiais**

Julio Cesar Justo

**AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA DE ENCHARQUE E DA  
VELOCIDADE DE RESFRIAMENTO NA TENACIDADE DO AÇO SAE  
1045 NORMALIZADO**

Monografia apresentada no curso de Tecnologia em  
Materiais - ênfase em Metais da FATEC-SP, como  
requisito parcial para a obtenção do título de  
Tecnólogo em Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Domingos Xavier

**São Paulo**

**2015**

**ATA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

Aluno (a): Julio Cesar Justo

Nº de Matrícula: 10209154

Título do Trabalho: Avaliação da Temperatura de encharque e da velocidade de resfriamento na tenacidade do aço SAE 1045 normalizado.

Data da Apresentação: 30 de junho de 2015

Horário: 20h00min

Local: sala 56- B

Orientador (a): Prof. Dr. Marcos Domingos Xavier

	Nota
Membros da Banca: Prof. Dr. Marcos Domingos Xavier	<u>8,0</u>
Prof. Djanilson Pereira Vanderlei	<u>8,0</u>
Prof. Bernardo Loeb	<u>8,0</u>

Nota Mínima para aprovação:  $\geq 7$

Observação da Banca:

Executar as correções sugeridas pela banca examinadora.

Julio Cesar Justo  
Ciente: Julio Cesar Justo

Prof. Dr. Marcos Domingos Xavier

Prof. Djanilson Pereira Vanderlei

Prof. Bernardo Loeb

*À minha família que sempre  
me apoiou e me incentivou nos estudos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao orientador, Prof. Dr. Marcos Domingos Xavier que me auxiliou no decorrer deste trabalho, proporcionando os esclarecimentos necessários para sanar todas as duvidas pertinentes.

A meus pais e irmãos, que sempre me auxiliaram na elevação da minha carreira profissional e pessoal.

A meus professores, com destaque ao Prof. Mestrando Djanilson Vanderlei e ao Prof. Dr. Marcos Domingos Xavier que durante todo o curso impulsionaram minha carreira profissional, citando o excelente discernimento de ambos, mostrando uma visão crítica de fatos para um melhor entendimento no decorrer dos dias e buscar uma melhoria para cada caso.

## **RESUMO**

A normalização é um tipo de tratamento térmico utilizado nos aços-carbono com o intuito de refinar grãos, tornando-os com uma distribuição mais uniforme e desejável. Esse tratamento é obtido a partir do aquecimento num intervalo entre 55 e 85°C acima da temperatura correspondente à zona crítica, permanecendo na mesma por um tempo conhecido como tempo de encharque, destinado à homogeneização térmica desde a superfície até o centro da peça. A seguir, a amostra é retirada do forno para que seja resfriada ao ar.

O objetivo desta pesquisa é mostrar a influência das temperaturas de encharque e de resfriamentos ao ar calmo e forçado sobre a tenacidade, a dureza e a microestrutura do aço SAE 1045 (aço que contém 0,45% em peso de carbono) e propriedades mecânicas quando submetido ao tratamento térmico de normalização.

Os valores térmicos 740, 850, 950 e 1000°C foram aplicados nos tratamentos térmicos.

A tenacidade e as durezas Rockwell tipos A e C nas propriedades mecânicas de cada coordenada (temperatura x taxa de resfriamento) foram medidas e associadas com a estrutura interna. O tamanho de grão e o tipo de Perlita foram analisados.

Os resultados mostraram que o crescimento do grão austenítico ocorre com a elevação da temperatura de encharque, exercendo forte influência na dureza e na energia absorvida nos ensaios de impacto. As diferenças entre os resultados dos testes mecânicos e microestruturais são independentes do tipo de resfriamento adotado.

**Palavras-chave:** Normalização. Tratamento Térmico. Tamanho de Grão. Tenacidade. Dureza. Aço SAE 1045. Energia Absorvida. Microestrutura. Resfriamento.

## **ABSTRACT**

The normalization is a type of Termic Treatment used to carbon steel in order to refine grains, becoming it with a more uniform distribution and desirable. This treatment's obtained from the heating in a range between 55 and 85°C above the critical zone temperature, staying until a time known as soaking Temperature, destined to termic homogenization from the surface to the center of the piece. Next, the sample is withdraw of the furnace wherefore it cooled on air.

The aim of this research is showing the influence between the soaking temperature and the cooling rate on calm and forced air about the tenacity, the hardness and microstructure of SAE 1045 Steel (including in your composition 0,45%wt of Carbon), and mechanical properties when the same is submitted to normalizing heat treatment.

The thermal values 740, 850, 950 and 1000°C were applied in heat treatments.

The toughness and hardness Rockwell types A and C on mechanical properties of each coordenated pair (temperature x cooling rate) were measured and associated with the internal structure. The grain size and Perlite type were analyzed.

The results showed that Austenitic grain growing occur with increase the soaking temperature and that it has strong influence over the hardness and absorbed energy in the Impact Tests. The differences between the results of mechanical tests and microstructures are independent of the adopted cooling type.

**Keywords:** Normalization. Heat Treatment. Grain size. Toughness. Hardness. SAE 1045 Steel. Energy Absorbed. Microstructure. Cooling.

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 - Comportamento de dois metais quando são deformados até a ruptura.....	15
Figura 2 - Ilustração do diagrama Ferro-Carbono.....	20
Figura 3 - Representação das fases presentes num aço hipoeutetóide.....	23
Figura 4 - Diagrama Ferro-carbono agregando a região do ponto eutetóide em que é localizado o tratamento térmico de Normalização e Recozimento Pleno.....	24
Figura 5 - Diagrama TTT do aço SAE 1045.....	24
Figura 6 - Patamares de tratamento térmico de Normalização.....	25
Figura 7 - Elevação simultânea da tenacidade e resistência mecânica pelo refino de grão.....	27
Figura 8 - Efeitos dos mecanismos de endurecimento dos aços.....	28
Figura 9 - Microestrutura perlítica de um aço.....	34
Figura 10 - Microestrutura de um aço SAE 1045, apresentando ferrita e Perlita.....	34
Figura 11 - Modelo do corpo de prova Charpy, com entalhe em “V” .....	37
Figura 12 - Esquema do ensaio de Impacto.....	37
Figura 13 - Posicionamento dos Ensaios de Impacto IZOD e CHARPY.....	37
Figura 14 - Resultados de Ensaios de Impacto Charpy para diversos tipos de aços contendo 0,4%p de carbono.....	38
Figura 15 - Ilustração da propagação de trinca visualizado nas seções transversais a nível microscópico. À esquerda, fratura transgranular e à direita, intergranular.....	40
Figura 16 - Estágios em que ocorre uma fratura taça-cone. (a) Empescoçamento; (b) Pequenas cavidades; (c) União das cavidades para formar a trinca; (d) Propagação da trinca; (e) Fratura.....	40
Figura 17 - Modelos de fraturas (a) dúctil tipo taça-cone do alumínio e (b) frágil do aço baixo carbono.....	41
Figura 18 - Modelo da máquina de corte ("Cut-off").....	42
Figura 19 - Modelo do forno utilizado para o tratamento de Normalização.....	44
Figura 20 - Equipamento de Ensaio de Impacto.....	45
Figura 21 - À esquerda: Lixadeira de cinta. À direita: Brochadeira para confeccionar o entalhe no corpo de prova tipo Charpy.....	47
Figura 22 - À esquerda: Politriz Lixadeira Metalográfica. À direita: Microscópio Óptico com aumento de 50 a 1000x.....	47

Figura 23 - Microscópio Eletrônico de Varredura.....	48
Figura 24 - Metalografias realizadas em aço SAE 1045 Normalizados a ar calmo (1) a 740°C (2) a 850°C (3) a 950°C e (4) a 1000°C. Todas estão em 200x e ataque: Nital 2%.....	54
Figura 25 - Metalografias realizadas em aço SAE 1045 Normalizados a ar forçado (1) a 740°C (2) a 850°C (3) a 950°C e (4) a 1000°C. Todas estão em 200x e ataque: Nital 2%.....	55
Figura 26 - MEV de amostras fraturadas por ensaio de Impacto. Cada uma tratada a (55) 740°C; (63) 850°C; (69) 950°C e; (92) 1000°C. A 850°C nota-se uma inclusão intermetálica presente provavelmente proveniente do processo de fundição do material. Em todas as amostras há predominância de planos de escorregamentos, característica de fratura frágil .....	56
Figura 27 - MEV das amostras fraturadas por ensaio de Impacto. Cada uma tratada a (60) 740°C; (67) 850°C; (71) 950°C e; (74) 1000°C. Nota-se que quanto maior a temperatura de encharque, mais <i>dimples</i> serão formados provavelmente por difusão, característica de fratura dúctil, além de aumentar o refino de grão.....	57

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
AISI	AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE
Al	ALUMÍNIO
ARBL	AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA
ASTM	AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS
C	CARBONO
CCC	CÚBICO DE CORPO CENTRADO
CFC	CÚBICO DE FACES CENTRADAS
Cr	CROMO
DIMPLES	PEQUENAS CAVIDADES
Eabs	ENERGIA ABSORVIDA
HB	DUREZA BRINELL
HC	HEXAGONAL COMPACTA
HRA	DUREZA ROCKWELL A
HRC	DUREZA ROCKWELL C
MEV	MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA
mm	MILÍMETROS
Mn	MANGANÊS
MPA	MEGA PASCAL
NITAL	REAGENTE METALOGRÁFICO
P	FÓSFORO
S	ENXOFRE
SAE	SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS
Si	SILÍCIO
$\sigma_r$	LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO
TTT	TEMPERATURA - TEMPO - TRANSFORMAÇÃO

## SUMÁRIO

Agradecimentos.....	I
Resumo.....	II
Abstract.....	III
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	IV
Lista de Figuras.....	V
1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVO.....	17
2.1 Justificativa.....	17
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	18
3.1 O aço.....	18
3.1.1 A estrutura cristalina das ligas de Ferro.....	19
3.1.2 Diagrama Fe-C.....	20
3.1.3 Transformação hipoeutetóide.....	22
3.2 Tratamento térmico de normalização.....	23
3.2.1 Refino de grão por deformação plástica severa.....	29
3.2.2 Refino de grãos por processamento termomecânico.....	30
3.2.3 Análise crítica do Refino de grão a partir do processamento termomecânico.....	31
3.2.4 Aspectos microestruturais.....	34
3.2.5 Propriedades mecânicas do aço SAE 1045 Normalizado.....	35
3.3 Ensaio de Impacto Charpy.....	35
3.3.1 Temperatura de transição dúctil x frágil.....	35
3.3.2 Fatores que influenciam a temperatura de transição.....	38
3.3.3 Fraturas frágeis e dúcteis.....	39
3.3.3.1 Aspectos macroscópicos e microscópicos.....	40
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
4.1 Composição química do aço SAE 1045.....	41
4.2 Preparação das amostras Charpy.....	42
4.3 Tratamentos térmicos de normalização.....	43
4.3.1 Forno de tratamento térmico.....	43
4.3.2 Ciclos de tratamentos térmicos.....	44

<b>4.4 Ensaio de impacto Charpy.....</b>	<b>44</b>
4.4.1 Equipamento.....	45
4.4.2 Técnica de ensaio.....	45
<b>4.5 Análises microestruturais.....</b>	<b>46</b>
4.5.1 Preparação das amostras.....	46
<b>4.6 Análises de fraturas.....</b>	<b>47</b>
4.6.1 Preparação das amostras Charpy.....	48
<b>5 RESULTADOS.....</b>	<b>48</b>
<b>5.1 Ensaio de impacto Charpy.....</b>	<b>48</b>
5.1.1 Tenacidade das amostras resfriadas ao ar calmo.....	52
5.1.2 Tenacidade das amostras resfriadas ao ar forçado.....	53
<b>5.2 Análises microestruturais.....</b>	<b>53</b>
5.2.1 Resfriamento ao ar calmo.....	53
5.2.2 Resfriamento ao ar forçado.....	54
<b>5.3 Análises de fraturas.....</b>	<b>55</b>
5.3.1 Amostras resfriadas ao ar calmo.....	55
5.3.2 Amostras resfriadas ao ar forçado.....	56
<b>6 DISCUSSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS.....</b>	<b>57</b>
<b>7 CONCLUSÕES.....</b>	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>59</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Os aços foram desenvolvidos a partir do ano de 586 a.C até o início da Idade Moderna (1918 d.C), na época conhecida por II IDADE DO FERRO ou Idade do Aço. Nesse período, dando importância ao final dessa era, foi onde originaram-se a expansão territorial de impérios, além das culturas de várias civilizações sobrepondo as menos dotadas de poderio econômico-militar. Além disso, o progresso tecnológico estava em decadência, principalmente no Ocidente, pois grande parte da população era voltada para o pensamento e comportamento religiosos. Esse fato fez com que o adensamento populacional aumentasse, tornando os locais de moradias mais vulneráveis aos ataques inimigos, proporcionando na inovação de técnicas nas áreas da construção civil, segurança, comércio, naval, entre outras (NAVARRO, 2006).

O primeiro conflito que é aceito como a Idade do Aço é conhecida como a Guerra de Secessão (1861-1865) ocorrido nos Estados Unidos. Nessa época, os americanos tinham duas representações: os Estados do Norte que eram voltados para a política de povoamento, enquanto que nos Estados confederados do Sul predominavam uma sociedade mais agrário-escravocrata - ou seja, uma política voltada para a escravidão. A principal causa desta guerra foi o fato de que os Estados do Sul possuíam uma economia voltada ao latifúndio escravista e a produção - principalmente algodão -, tudo para a exportação. Já os Estados do Norte tinham a tese de abolir a escravatura, além de ter sua economia baseada na indústria. Essas diferenças fizeram com que o Norte entrasse em guerra com o Sul.

Na Guerra da Tríplice Aliança (1864-1870) - também conhecida como Guerra do Paraguai -, foi o primeiro conflito sul-americano a sentir efeitos da nova tecnologia. Este conflito fez com que o poderio militar da Armada Imperial brasileira sofresse uma imensa evolução com a substituição de madeira por aço (VISACRO, 2011).

Já a Guerra Franco-Prussiana (1870-1871) que aconteceu entre a França e a Prússia, era considerado um reino de alto poderio militar com uma forte economia obtida através de um intenso processo de industrialização no século XIX. Isto favoreceu na Unificação da Alemanha em um único império e vários reinos germânicos. Nesta guerra, a Prússia tinha uma excelente estratégia a partir da

obrigatoriedade na prestação do serviço militar além de uma indústria bélica, armamentos e táticas para esta finalidade (VISACRO, 2011).

Mas foi somente nas duas Guerras Mundiais do século XX (1914 - 1918 e 1939 - 1945) que os conflitos a respeito da era industrial atingiram seu auge. Resumindo, a principal área de atuação nessas duas guerras era principalmente forçar a população ao serviço militar, fortalecido pela indústria bélica e das Forças Armadas (VISACRO, 2011).

O material em estudo é o aço SAE 1045, de composição química definida no item 4.1. Este tipo de aço apresenta uma baixa temperabilidade, ou seja, uma baixa penetração à dureza na seção transversal. Além disso, ele tem uma boa resistência mecânica e resistência à fratura.

No caso de um forjamento, o aço SAE 1045 tem que ser realizado entre 870°C e 1240°C.

Além do forjamento, que é realizar uma conformação mecânica de compressão num material dúctil, assumindo a morfologia de uma ferramenta, o aço SAE 1045 pode passar pelos seguintes tratamentos térmicos:

- Recozimento - Tratamento térmico no qual o material fica dentro do forno até alcançar a temperatura ambiente;
- Têmpera - É tratar o aço até a temperatura de austenitização, seguida de um resfriamento rápido na água, óleo ou salmoura;
- Revenimento - É o tratamento térmico seguido após a têmpera para a redução e ajuste da dureza desejada. Neste caso, é feito um resfriamento final a ar calmo;
- Nitretação - Geralmente utiliza-se deste tratamento para aumentar a resistência ao desgaste a partir do endurecimento da superfície, com a inclusão de nitrogênio no material;
- Têmpera Superficial - É aquecer o material rapidamente até um patamar, seguido de resfriamento em água ou óleo. Neste caso, as condições de uma têmpera superficial vão depender da geometria da peça, da dureza desejada e do equipamento utilizado;
- Normalização - É o principal tratamento térmico que está sendo discutido aqui.

O termo tenacidade à fratura, ou simplesmente tenacidade, é um termo indicativo no qual mostra a resistência de um material submetido a uma fratura, apresentando ou não trinca em sua estrutura, ou qualquer tipo de defeito que ocasione concentradores de tensões. A tenacidade é uma propriedade que necessariamente é levada em consideração na produção de aços para fins estruturais.

Um caso similar de realização da medição dessa propriedade é quando o material está absorvendo energia e deformando plasticamente, antes mesmo que ele possa sofrer fratura. Alguns carregamentos quando dinâmicos, ou seja, com uma taxa de deformação muito elevada, e apresentando um entalhe (isto é, um tipo de ponto concentrador de tensão), é verificada a tenacidade à fratura a partir de ensaio de impacto.

No caso de apresentarmos uma situação que tenha pequena taxa de deformação (ou carregamento estático), um simples ensaio de tração já podemos contar, pois teremos tensões e deformações atuando no material metálico, cujos também definimos numa curva até que o material sofra a fratura. Aqui levamos em consideração a área da curva tensão-deformação do material em análise.

Para que um material metálico tenha tenacidade, ele tem outras duas propriedades: Ductilidade e Resistência. A curva a seguir mostra dois tipos de materiais metálicos, um dúctil - com maior resistência mecânica - e outro frágil que nem tem tempo de sofrer deformação plástica.

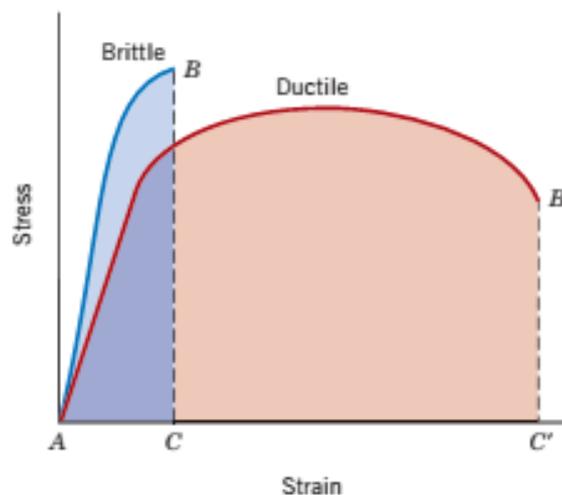


Figura 1 - Comportamento de dois metais quando são deformados até sua ruptura. (CALLISTER, 2012)

O principal método em que podemos obter a tenacidade de um material metálico é através de um ensaio de Impacto, em que mostra a energia necessária na qual o material absorve sem que ele sofra ruptura.

Ao falarmos do ensaio de Impacto para esta finalidade, primeiramente é necessário entender como funciona este método. Primeiramente temos um martelo no formato de um pêndulo, no qual este irá impactar com a amostra do material a partir de uma altura já determinada, e quando ele colide com o material, um ponteiro no braço do martelo seguirá o movimento do mesmo até uma certa quantidade de energia que o material absorveu. Esta energia absorvida - em Joules - é a quantidade que demonstra no qual o material absorveu no momento da ruptura.

Segundo CHIAVERINI (2005), demonstra que há vários métodos para a obtenção da tenacidade de um material metálico, tais como:

- Ensaio de Impacto;
- Ensaio de Torção;
- Ensaio de Dobramento;
- Entre outros.

Mas temos que levar também em consideração que todos os materiais possuem fatores que interferem para a obtenção da tenacidade, como os descritos abaixo:

- Materiais que passaram por tratamento térmico de têmpera, nos quais eles estão carregados de tensões internas devido a realização de têmperas muito severas, ou também por reaquecimentos bruscos;
- Geração de falhas internas e externas no material, além de serem não visíveis a olho nu;
- Materiais encruados, em que passaram por deformação plástica, podendo ser ocasionados pela geração de acúmulo das discordâncias mas também devido a conformação que também gerou tensões internas excessivas;
- Materiais com alta dureza;
- Materiais segregados;

- Teor dos elementos de liga do material, em que é necessário temperaturas maiores para a realização de tratamento térmico, elevando a tenacidade;
- Entre outras.

No item 3.2 é esclarecido o tratamento térmico de normalização, que será a base fundamental para a realização dos ensaios aplicados para este trabalho.

## **2 OBJETIVO**

Este trabalho tem como objetivo avaliar a tenacidade, a dureza e a microestrutura do aço SAE 1045 normalizado, através de ensaios laboratoriais, aplicando quatro temperaturas de encharque e duas velocidades de resfriamento.

### **2.1 Justificativa**

A elevação de temperatura de encharque causa crescimento dos grãos austeníticos. O efeito deste crescimento sobre o tamanho de grão ferrítico final e deste sobre a tenacidade foi alvo do estudo inicial.

A velocidade de resfriamento também altera o tamanho dos grãos do material normalizado. Assim, buscou-se também verificar o seu efeito sobre o refino cristalino e conseqüentemente, na tenacidade do aço. Neste tópico, resfriamentos ao ar forçado e ao ar calmo foram aplicados.

## 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 3.1 O aço

As ligas ferrosas possuem uma grande importância no setor primário, sendo que uma das principais ligas utilizadas são os aços, além de serem as mais aplicadas. Mas alguns fatores devem ser levados em consideração para tais aplicações:

- Trata-se de um material de baixo custo na produção;
- A extração de seu minério mais abundante (o minério de ferro), também conhecido como Hematita (com composição  $Fe_2O_3$ ), tem aproximadamente 70% (CHIAVERINI, 2005) do principal metal que é necessário para a produção de aço;
- Alternativa barata e por ser um material com boas propriedades mecânicas.

O aço comum, também conhecido como aço-carbono, é definido como sendo uma liga de ferro contendo até 2,11% de carbono. Além disso, durante sua fabricação, elementos residuais estão presentes no material.

Os aços-carbono, segundo CHIAVERINI - 2005, são classificados conforme seu teor de carbono:

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

Essa classificação segue um sistema específico na produção do aço. Os principais sistemas mais utilizados mundialmente são:

- SAE - "*Society of Automotive Engineers*", *Sociedade da Engenharia Automotiva*;
- AISI - "*American Iron and Steel Institute*", Instituto Americano do Ferro e do Aço.

Tabela 1 - Classificação dos aços (CHIAVERINI, 2005)

DESIGNAÇÃO		TIPOS DE AÇO
AISI - SAE	UNS	
10XX	G10XXX	Aços carbono comuns
11XX	G11XXX	Aços de usinagem fácil, com alto S
15XX	G15XXX	Aços-Mn com Mn>1%
40XX	G40XXX	Aços-Mo com 0,25% de Mo médio
41XX	G41XXX	Aços-Cr-Mo com $0,4\% \leq Cr \leq 1,1\%$ e $0,08\% \leq Mo \leq 0,35\%$
43XX	G43XXX	Aços-Ni-Cr-Mo com $1,65\% \leq Ni \leq 2\%$ ; $0,4\% \leq Cr \leq 0,9\%$ ; $0,2\% \leq Mo \leq 0,3\%$
51XX	G51XXX	Aços-Cr com $0,7\% \leq Cr \leq 1,1\%$
86XX	G86XXX	Aços-Ni-Cr-Mo com 0,55% Ni; 0,5% Cr; 0,2% Mo
87XX	G87XXX	Aços-Ni-Cr-Mo com 0,55% Ni; 0,5% Cr; 0,25% Mo
88XX	G88XXX	Aços-Ni-Cr-Mo com 0,55% Ni; 0,5% Cr; $0,3\% \leq Mo \leq 0,4\%$

Segundo CHIAVERINI, 2005, nos dois sistemas apresentados na tabela 1, XX ou XXX representam a porcentagem em peso de carbono. Por exemplo, no aço SAE 1025, há um teor de carbono de 0,25%. Esse mesmo teor está presente no aço UNS G10250, onde os três últimos valores devem ser divididos por 1000, dando como resultado a porcentagem de carbono.

No caso do aço SAE 1045, o 10 significa que é um aço-carbono e o 45 corresponde ao seu teor de 0,45% de carbono (CALLISTER, 2012).

### 3.1.1 A estrutura cristalina das ligas de Ferro

Para entender as ligas ferrosas, primeiramente é necessário conhecer a ligação química envolvida na estrutura cristalina.

No caso dos metais, o tipo de ligação química predominante é a ligação metálica, cuja é caracterizada pelo subnível "d" dos átomos estarem totalmente preenchidos e o subnível "s" incompleto (subnível este por onde há a fluidez dos elétrons em todo o metal, conhecido como "*mar de elétrons*"). É pelo subnível "s" que os metais possuem a maior facilidade de conduzir corrente elétrica.

A ligação metálica gera um arranjo tridimensional de átomos, chamado célula cristalina ou unitária, cujo empilhamento forma o reticulado (estrutura) cristalino e cristais micrométricos (grãos).

Os tipos mais comuns de estruturas cristalinas nos metais são:

- CCC - Cúbica de Corpo Centrado;
- CFC - Cúbica de Faces Centradas e;
- HC - Hexagonal Compacta.

A maioria dos metais apresenta estrutura CFC. No ferro comercialmente puro, a partir da temperatura ambiente até aproximadamente 912°C, esse material possui a estrutura CCC. Como o ferro tem alotropia - mais de uma estrutura cristalina -, sofre uma mudança na estrutura de CCC para CFC. Quando a temperatura é elevada entre 1394°C e 1538°C, a estrutura volta a ser CCC. Finalmente, acima de 1538°C, o ferro puro passa a ser um material fundido (CALLISTER, 2012).

A estrutura HC, embora não faça parte da morfologia do ferro, está presente em outros metais que podem ser utilizados como elementos de liga, tais como o cádmio, o cobalto, o titânio, o zinco, entre outros.

### 3.1.2 Diagrama Fe-C

O sistema de ligas binárias mais famoso é o Ferro-Carbono. Esse sistema tem a grande característica de mostrar os seguintes compostos: aços e ferros fundidos, conforme a figura 2.

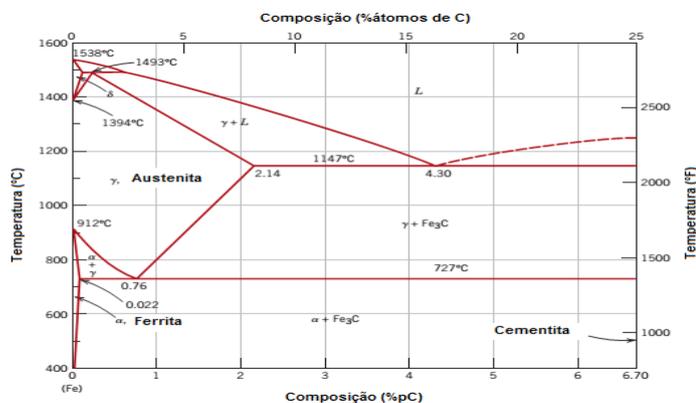


Figura 2 - Ilustração do diagrama Ferro-Carbono (CALLISTER, 2009)

Este diagrama apresenta no lado direito uma quantidade limite de 6,7% de carbono, porque acima desse valor a liga ferrosa é extremamente dura, porém, muito frágil.

No exemplo do ferro puro, as fases presentes são ferro alfa, ferro gama e o ferro delta.

A ferrita é definida como sendo uma solução sólida de carbono no ferro alfa. Sua estrutura cristalina é CCC e estável somente a temperaturas abaixo de 910°C. Esta fase tem uma solubilidade máxima de 0,025% de carbono no ferro alfa, a 723°C. A ferrita tem as principais características: é uma fase dúctil, apresentando baixa dureza e pouca resistência mecânica.

Além da ferrita, temos também a austenita, que é uma solução sólida de carbono no ferro gama, apresentando uma estrutura cristalina CFC e ela aparece a partir da alotropia do ferro puro, coexistindo entre as temperaturas 912°C e 1394°C, mas que surge também em outras temperaturas, dependendo do teor de carbono, até na máxima solubilidade de 2,14% de carbono a 1147°C. Até o limite de solubilidade de carbono de 2,14%, existem os aços. Acima dessa solubilidade, até 6,7% de carbono, há os ferros fundidos.

Assim como a ferrita, a austenita também é dúctil, com dureza e resistência mecânica baixas.

As porcentagens apresentadas de carbono significam, conforme a tabela abaixo:

Tabela 2 - Solubilidade de Carbono no Ferro (CHIAVERINI, 2005)

<b>%CARBONO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>
0,008	Máxima Solubilidade no Ferro $\alpha$	Ambiente
2,11	Máxima Solubilidade no Ferro $\gamma$	1148°C

Outra fase estável do ferro a partir de sua alotropia é a fase delta, onde a estrutura CFC transforma-se em CCC, entre 1394°C e 1538°C e a sua máxima solubilidade de carbono é atingida em 0,10% a 1493°C.

A cementita, conhecida por carboneto de ferro (ou  $Fe_3C$ ) apresenta um retículo cristalino ortorrômbico, contendo até 6,7% de carbono na estrutura. É uma

fase frágil, mas em contrapartida, tem dureza e resistência mecânica elevadas. Trata-se de uma fase metaestável, que com o passar do tempo, se decompõe em ferro e grafite, por se tratarem de componentes termodinamicamente mais estáveis.

Uma microestrutura muito importante dos aços é a perlita, composta de ferrita e cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Estas duas fases são provenientes da transformação da austenita, no resfriamento. A microestrutura 100% perlítica ocorre a 0,76%pC e tem as seguintes características:

- Lamelas de cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) na matriz ferrita;
- Lamelas intercaladas com 88% e 12% de ferrita e cementita, respectivamente;

### 3.1.3 Transformação hipoeutetóide

O resfriamento lento dos aços hipoeutetóides (menos de 0,76%pC) apresentam a seguinte transformação microestrutural:

1 - Ao alcançar a linha  $A_3$ , inicia-se a transformação da austenita em ferrita primária. Isto acontece porque os contornos de grãos austeníticos possuem alta energia, favorecendo para que uma nova fase comece a sua nucleação. E será nessa região que a ferrita se formará, coexistindo-a com a austenita. A temperatura de início dessa transformação depende também do teor de carbono.

2 - A austenita se transformando em ferrita irá ocorrer até que a temperatura  $A_1$  seja atingida ( $723^\circ\text{C}$ , nos aços carbono), independente do teor de carbono. O restante da austenita que não se transformou em ferrita apresentará composição eutetóide, transformando-se em perlita. Essa ferrita que se formou antes, não sofrerá modificações, sendo chamada de ferrita pró-eutetóide ou ferrita primária. Ou seja, os grãos de perlita formados estarão envoltos dessa ferrita.

Abaixo é apresentada a figura da transformação hipoeutetóide, contendo as fases presentes em cada ponto:

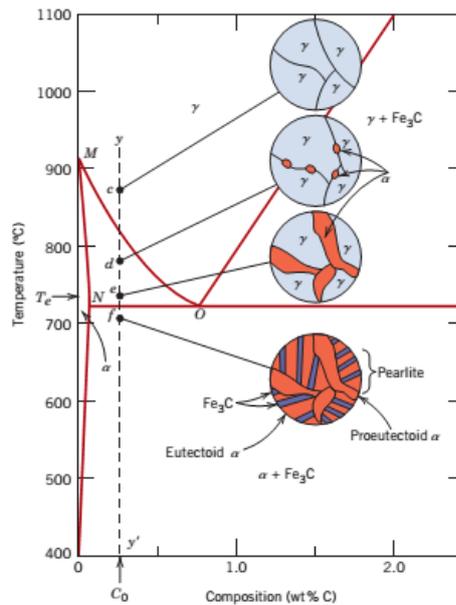


Figura 3 - Representação das fases presentes num aço hipoeutetóide (CALLISTER, 2012)

### 3.2 Tratamento térmico de normalização

A normalização dos aços é um modelo de tratamento térmico que visa o refino de grãos, ou seja, reduzir o tamanho médio dos mesmos para a produção de uma distribuição mais uniforme na microestrutura e aumento da tenacidade. Este tipo de tratamento térmico é muito aplicado após a produção de peças forjadas ou laminadas (CALLISTER, 2012).

A execução do tratamento térmico de normalização considera o aquecimento a no mínimo 55°C acima da temperatura de austenitização (temperatura na qual o aço transforma-se numa estrutura austenítica) do diagrama Ferro-Carbono, conforme a figura 4. Estas temperaturas variam conforme o teor de carbono ilustrado na tabela 3:

Tabela 3 - Temperaturas de Normalização dos aços carbono (CHIAVERINI, 2005).

Teor de Carbono	Faixa de Temperatura (°C)	Características
< 0,77%pC	Acima de A <sub>3</sub> (*)	
0,77%pC	Acima de A <sub>1</sub> (727°C)	A <sub>1</sub> (Eutetóide)
0,77 < %pC < 2,11	Acima de A <sub>cm</sub> (*)	

(\*) Estas temperaturas oscilam numa faixa de temperatura e é dependente do teor de carbono, sempre dentro do campo austenítico.

A etapa posterior ao aquecimento é a retirada do aço do forno e seu resfriamento no ar ambiente.

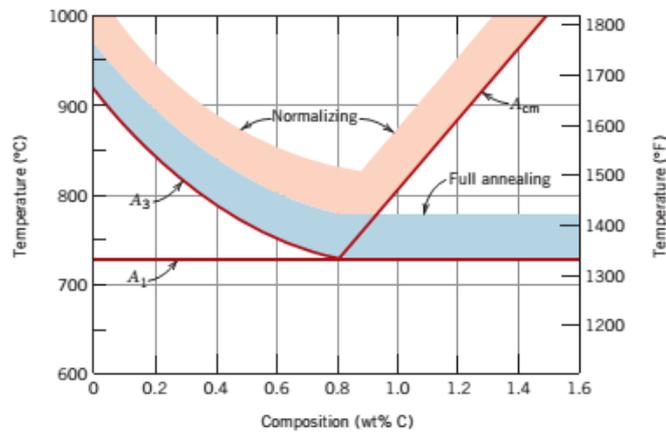


Figura 4 - Diagrama Ferro-carbono agregando a região do ponto eutetóide em que é localizado o tratamento térmico de Normalização e Recozimento Pleno (CALLISTER, 2009)

A seguir é apresentado um diagrama TTT (Temperatura, Tempo, Transformação) do aço SAE 1045, que mostra fases em equilíbrio e fora do equilíbrio e os parâmetros de tratamento térmico (temperaturas e velocidades de resfriamento).

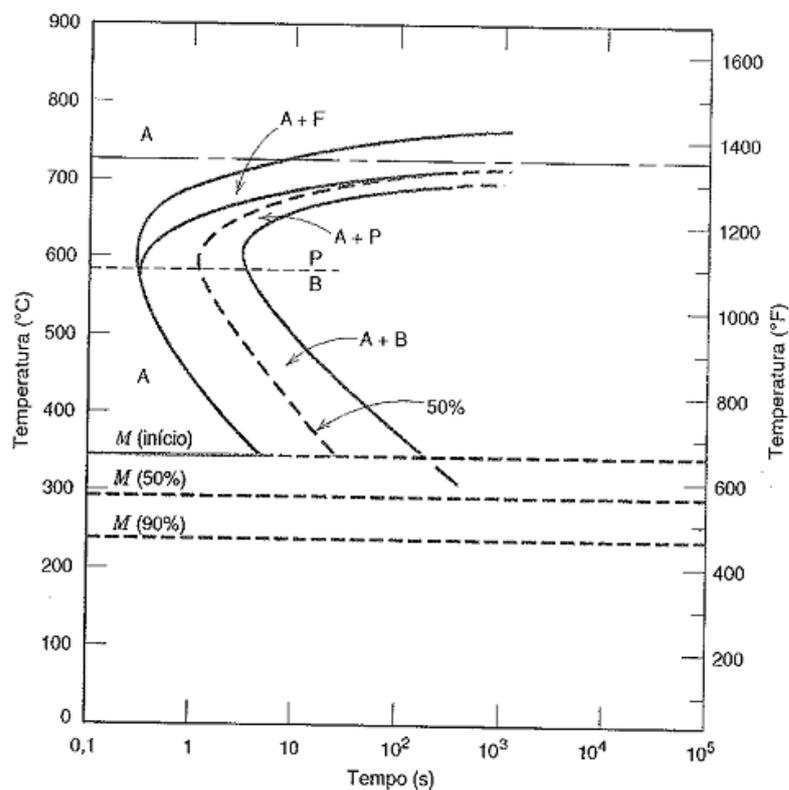


Figura 5 - Diagrama TTT do aço SAE 1045 (CALLISTER, 2012)

O tratamento térmico de normalização segue patamares de temperatura, nas quais uma transformação microestrutural acontecerá. Estes patamares são idênticos a figura 6.

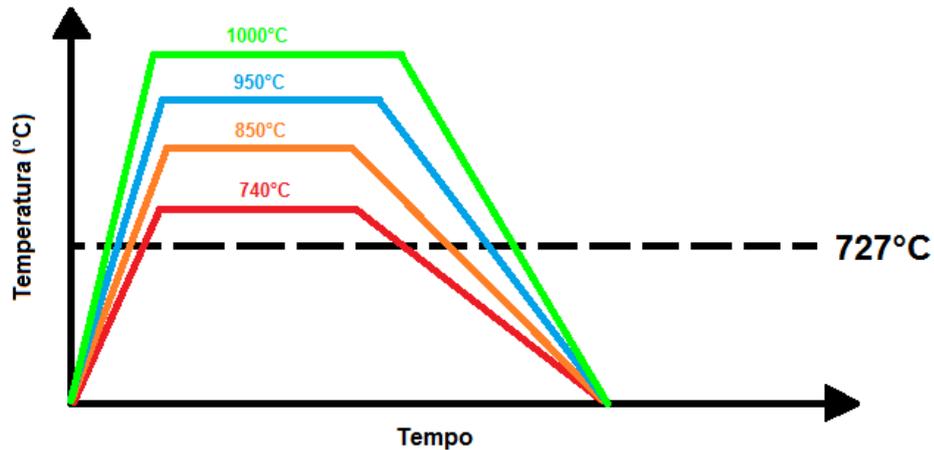


Figura 6 - Patamares de tratamento térmico de Normalização.

A normalização é muito utilizada para um pré tratamento térmico de têmpera e revenimento (nos quais não serão discutido aqui) para obter uma estrutura bem uniforme a partir de processos como a laminação, por exemplo, além de reduzir empenamentos, facilitar a solução de carbonetos e elementos de liga. Nos casos de aços-liga, quando resfriados lentamente após a laminação, os carbonetos ficam muito volumosos e maciços, além de dificultarem em serem dissolvidos na matriz a partir de processos posteriores de austenitização. A normalização vai corrigir esse problema, transformando os grãos em ferrita e perlita fina (para aços de baixo carbono) ou em perlita fina e cementita (para aços de alto carbono). Mas em algumas ocasiões e dependendo do tipo de aço, podemos obter outra microestrutura, conhecida como bainita (CHIAVERINI, 2005).

Da mesma forma que aços estruturais, os aços comuns podem ter suas aplicações expandidas caso as propriedades possam ser melhoradas a partir do refino de grão, sem que haja a necessidade de alterar a composição química. Alguns autores citam que para melhorar a resistência à fratura em baixas temperaturas, é necessário que se tenha uma alta resistência dinâmica, ou seja, aços que suportam altas taxas de deformações (cerca de  $10^3.s^{-1}$ ) tendo grãos refinados.

Na década de 1950, o cientista E. O. Hall publicou na Universidade de Scheffield - Reino Unido - um artigo que demonstrava em seus experimentos uma relação entre o comprimento das bandas de deslizamento e o tamanho de grão, focando-se seus estudos em aços baixo carbono, utilizando como base de seus estudos o trabalho experimental realizado entre 1946-1949 do cientista N. J. Petch da Universidade de Leeds - Inglaterra -, visando o estudo da fratura frágil, em que ao variar as medições das tensões de clivagem em relação ao tamanho de grão ferrítico a temperaturas muito baixas, Petch encontrou uma relação exata na qual Hall a descrevera. Logo depois, baseados nos estudos desses dois cientistas, foi proposta a relação de Hall-Petch descrevendo a relação entre o tamanho de grão e a resistência mecânica de aços baixo carbono, ou seja, a relação entre o limite de escoamento e o tamanho de grão (DE ASSIS, 2011).

Segundo especificações da ASTM, algumas indústrias utilizam o conceito de grãos finos conforme a tabela abaixo:

Tabela 4 - Classificação do tamanho de grão dos aços, conforme especificações das normas ASTM.

<b>Ordem</b>	<b>Tamanho ( <math>\mu\text{m}</math> )</b>	<b>Granulometria</b>
1 a 3	250 a 150	Grãos Grosseiros
4 a 6	88 a 44	Grãos Médios
7 a 8	31 a 22	Grãos Finos

A partir do ano de 1990, muitas pesquisas já foram realizadas tratando-se de aços com grãos ultrafinos, mas até o ano de 2014 ainda não tem-se uma definição unificada para "tamanho de grão ultrafino". Por consenso e levando em consideração algumas pesquisas já realizadas e que verificaram a melhora nas propriedades mecânicas, tais como resistência mecânica e tenacidade, relacionando o tamanho de grão, considera-se que em aços baixo-carbono tenha um tamanho médio de grão igual ou inferior a  $5\mu\text{m}$ , isto para definir um aço de grãos ultrafinos.

Vários cientistas de diversos países citam que quando fazemos o refino de grão trata-se de um método muito eficiente no caso de aumentar a resistência mecânica, a tenacidade, a resistência à fratura e a resistência à fadiga. O principal ponto chave é a realização do refinamento da fase Ferrita nos aços obtida através das interações que acontecem nos processamentos termomecânicos e os

tratamentos térmicos. A figura abaixo ilustra o que acontece com as propriedades tenacidade e resistência mecânica quando realizamos um refino de grão.

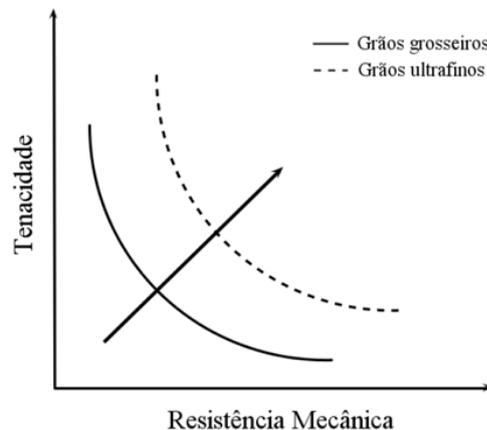


Figura 7 - Elevação simultânea da tenacidade e resistência mecânica pelo refino de grão.

Os aços de composições químicas básicas com grãos ultrafinos possuem maior potencial para o aumento na resistência mecânica convencional do que utilizar aços baixa-liga (NARAYAMA E TORIZUKA, 2008). Alguns dos benefícios interessantes para a utilização de aços com grãos ultrafinos são:

- Evitar o consumo de elementos de liga;
- Fácil reciclagem;
- Evitar tratamentos térmicos desnecessários, tais como a Têmpera;
- Redução de custos da produção;
- Processamento sustentável;
- Melhor soldabilidade, já que possui menor teor de carbono;
- Obtenção da "Superplasticidade" com altas taxas de deformação em temperaturas moderadas. A superplasticidade é a capacidade em que alguns metais podem deformar-se de forma uniforme com vários milhares de porcentagem em altas temperaturas. Diferentemente de ligas normais, materiais com essa propriedade, rompem-se após distenderem até 100%. Para a existência desta propriedade, o grão do metal tem de ser pequeno, redondo, além da liga ter uma taxa de deformação baixa.

Com isso, o principal propósito desses dois cientistas é fazer uma revisão dos conceitos metalúrgicos, tendo como objetivo uma abordagem das principais

dificuldades para a obtenção de um produto que contenha grãos ferríticos ultrafinos em escala industrial e de grandes espessuras, e para tornar-se viável a nível tecnológico, substituindo aços de alto custo agregado numa produção.

Mas para que possamos obter uma excelente razão resistência do material pelo custo de sua produção, além da economia de energia, da redução dos recursos, minimizando os impactos ambientais, faz-se necessário o uso de aços com alto desempenho e baixo custo, aplicando tecnologias muito mais econômicas para a otimização dos processos. Os aços de grãos ultrafinos tem aumentado cada vez mais o interesse comercial por todos esses fatores citados. Na figura abaixo é ilustrada o que acontece com as propriedades limites de escoamento e limites de resistência do material quando é realizado um tratamento térmico específico.

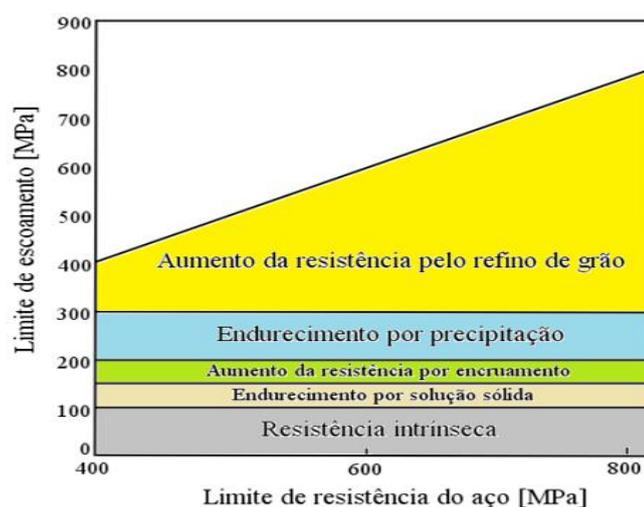


Figura 8 - Efeitos dos mecanismos de endurecimento dos aços (WENG, 2009).

Historicamente, para a obtenção de aços com propriedades de resistência mecânica e tenacidade mais viáveis ocorre principalmente pelo processo de normalização ou laminação a frio seguida de recozimento para recristalização controlada.

Nos últimos anos, o controle de processos termomecânicos tem sido empregado para controlar o estado da Austenita antes e durante a transformação em ferrita. Mas especificamente nos últimos 35 anos houve uma melhora para o entendimento da importância dos fatores metalúrgicos relativos ao material e para o controle do refinamento de grãos ferríticos através das poucas técnicas de processamento (HURLEY e HODGSON, 2001). Eles mostraram que mesmo gastando muito e também com muito esforço, a realização do refinamento da fase

ferrítica em aços baixo-carbono sem a utilização de elementos de liga é uma tarefa extremamente difícil a nível científico e tecnológico.

Então, um grande desafio é a obtenção de uma nova classe de aços com alta resistência com a redução brusca do uso de elementos de liga. Até com simulações em laboratórios estão nesse foco, apresentando vantagens em que se compara a transformação sólido-sólido de Austenita em Ferrita, obtendo o refinamento dos grãos através da normalização, além de grãos ferríticos de tamanho médio inferiores a 5µm com a utilização de processamentos industriais e resfriamentos acelerados (MILITZER e BRECHET, 2009).

Atualmente, existem duas técnicas de processamento estabelecidas em escala de laboratório capazes de refinar grãos até tamanhos ultrafinos: através de deformações severas e termomecânico (HAN e YUE, 2003).

### 3.2.1 Refino de grão por deformação plástica severa

Este tipo de refino de grão é baseado na deformação plástica severa dos materiais a partir de um processo de Extrusão desenvolvido na ex-URSS em 1973, na qual algumas técnicas tais como a Equal Channel Angular Pressing (ECAP - Pressão Angular em Canal Igual), Accumulative Roll-Bonding (ARB - Rolo Compressor Acumulativo) e Severe Torsional Straining (STS - Esforço de Tensão Severa) melhoram as propriedades, de acordo com a relação de Hall-Petch já citada anteriormente.

O estudo de materiais processados por deformação plástica severa recebe atenção especial devido às grandes mudanças que ocorrem nas propriedades e na microestrutura dos materiais. Este interesse surgiu porque as técnicas de deformação plástica severa promovem grandes deformações nos materiais e são utilizadas como um método para o refino de grão dos metais, fazendo com que eles apresentem uma granulometria ultrafina e/ou nanométrica.

Embora esses métodos sejam capazes de obter escalas sub-micrométricas ou nanométricas, a necessidade de equipamentos especiais para alcançar a enorme pressão necessária torna inadequada e não rentável na produção em massa de materiais com grãos ultrafinos. Além disso, tensões residuais consideráveis ainda

permanecem mesmo depois de uma grande parcela da energia interna ter sido dissipada para o refinamento dos grãos, sendo necessário um posterior tratamento térmico de recozimento (para alívio das tensões), para assegurar uma aplicação prática.

### 3.2.2 Refino de grãos por processamento termomecânico

Ao utilizarmos um modelo metalúrgico para a obtenção do refino de grão nas indústrias de mesma área, estamos nos referindo que é necessário executar alguns tipos de processamentos que envolvem deformação plástica seguindo de um posterior tratamento térmico. Analisando os diversos tipos de processos termomecânicos, este é o que mais se aplica um grande potencial no refinamento dos grãos pela recristalização, seguida de uma forte nucleação nos grãos ferríticos. Essa recristalização, por ser um método importante e expansivamente a nível industrial, aplica-se num modelo conhecido como recristalização dinâmica, podendo variar os grãos da ordem de 2 a 5 $\mu$ m em aços baixo carbono e baixa liga (os aços baixa liga a que referimos aqui são os ARBL), por se tratarem de aços comerciais com baixo valor agregado, pois para sua obtenção é feita através de laminação convencional controlada seguida de rápido resfriamento.

Ao entender o mecanismo da deformação a quente, percebemos que a microestrutura da Austenita passa por muitas variações, como a mudança de Austenita para Ferrita. Neste caso, o efeito que causa a partir da deformação plástica, embutindo a cinética de reação em que ocorre essa transformação, podemos fazer as seguintes considerações:

- Mudança na energia livre;
- Mudança na taxa de nucleação, e;
- Mudança na área de contorno de grão de forma eficaz para que ocorra a nucleação.

Agora, quando fazemos uma recristalização controlada do material, carbonetos finos estáveis que precipitam irão atuar como barreira, além de limitar o crescimento dos grãos de Austenita, os quais após a deformação plástica,

favorecem na nucleação da Ferrita, tendendo a serem menores os grãos, além do mais podemos perceber que a Ferrita irá nuclear com muita preferência nas regiões dos contornos de grão Austenítico.

Mas algumas pesquisas demonstram que a transformação dinâmica induzida pela tensão gerada na deformação, pode produzir Ferrita com uma granulometria média de 1 a 3 $\mu$ m (ou até menos), e ganhou uma grande atenção de forma muito significativa a partir do processo de refino de grão e pela sua simplicidade, e eficiência.

Já no caso de realização do processo de deformação a morno, antecedida pelo refino de grão, é justificável que aços e outros metais que apresentem grãos finos sofram redução na espessura, além de controlar a velocidade de deformação ideal, pois o excesso de discordâncias atinge um estado, possibilitando no aparecimento de uma recristalização estática e de forma acelerada, no caso de grãos finos. Então, algumas transformações como contendo elevado nível de discordâncias, sendo necessário um maior escoamento, além de ter uma menor temperatura de transição Dúctil-Frágil, não abrindo mão da conformabilidade de produtos.

Consequentemente, a alta densidade de discordâncias residuais é a chave para a otimização das condições de deformação a quente.

### 3.2.3 Análise crítica do Refino de grão a partir do processamento termomecânico

Ao refinarmos os grãos de um material metálico envolve um alto controle na microestrutura, cuja esta é muito dependente nas propriedades mecânicas de um produto. Isto porque é sucedida através das seguintes etapas de transformações:

- Recuperação, na qual a quantidade de discordâncias é reduzida devido a difusão que ocorre no material;
- Recristalização, que é a etapa na qual são criados novos grãos de tamanho equiaxiais em que os contornos de grão se movimentam reduzindo no acúmulo de tensões internas, e;
- Crescimento de grão, em que isto vai depender se a temperatura que o material é deixado for elevada o suficiente para este processo.

Com estudos desde o final da década de 1990, vários países desenvolvem projetos de pesquisa em que visam na obtenção de aços que contenham tamanho de grão até menores que  $1\mu\text{m}$ .

Nos últimos anos, pesquisadores investigam um modo em que os grãos ferríticos ultrafinos para aços de baixo carbono podem ser obtidos. Alguns resultados se tornaram evidentes através de fenômenos como formação de grãos e subgrãos por deformação severa na temperatura ambiente, seguida de uma transformação dinâmica da fase na qual foi induzida por deformação plástica, prosseguida pela recristalização dinâmica e contínua da ferrita em trabalhos a quente.

Mas o problema é que não é fácil obter os grãos ultrafinos em estruturas de aços baixo carbono, motivo na qual os processos são baseados a altas deformações, sendo necessário a utilização de aços com elementos de liga e composição química adequados, além de reduzir os procedimentos para sua obtenção evitando retrabalhos de processamento, visando a nucleação da fase ferrítica a uma baixa taxa de crescimento do grão. Assim poderemos deixar compatíveis a tenacidade à fratura, favorecida pela ferrita a partir do aumento da resistência mecânica graças aos mecanismos de endurecimento propícios na formação dos grãos ultrafinos.

No caso de um desequilíbrio que acontece com a resistência mecânica e a ductilidade, é um grande desafio para obter aços de grãos ultrafinos para aplicações práticas. Somente quando este problema tiver uma solução viável, será o momento em que os materiais com grãos ultrafinos tornem-se muito atraentes, devido às seguintes propriedades: alta resistência com composições químicas comuns, sem a necessidade de utilização de elementos de liga, cujos alguns deles tornam o processo inviável economicamente e financeiramente (TSUJI, 2009). Agora a relação tensão-deformação é um tema que deve ser elucidado com muita cautela antes mesmo que os aços de grãos ultrafinos possam ser aplicados, pois a quantidade de tensões ou até mesmo num encruamento pode comprometer o material.

Já para aços carbono que exigem alto desempenho do que antes, além de possuírem a restrição devido às propriedades mecânicas desfavoráveis, vários deles podem ser utilizados na construção civil por apresentarem boa conformabilidade.

Mas neste caso, pode ser utilizado um aço médio carbono. Entretanto, este material não suporta muita solicitação mecânica, no caso de altas deformações. Para isto, a utilização de um tratamento térmico encarece o material. Então, com estudos muito recentes a respeito de grãos ultrafinos, estes tornam projetos mais viáveis para aços estruturais.

No caso de obter processamentos para aços de grãos ultrafinos, na sua totalidade da seção do material e grandes espessuras, é muito difícil e complicada. Utilizando de processamentos termomecânicos controlados, além de melhorarem a microestrutura, favorece na obtenção de propriedades mecânicas, em se tratando aços com baixo carbono. Agora, quando refinamos aços através de resfriamento em alta velocidade usufruindo de laminação convencional, podemos conseguir uma microestrutura refinada no final do processo. Mas para isto, é necessário controlar a temperatura do material no momento em que ele sofre deformação, gerando uma região uniforme composta de ferrita equiaxial ultrafina, cuja microestrutura pode gerar materiais com estruturas avançadas e com uma alta resistência mecânica.

Segundo NARAYAMA MURTY e TORIZUKA (2008), afirmam que podem realizar o refino de grão nos aços através de apenas um passe numa laminação a morno. Entretanto, seria necessário o custo muito elevado com equipamentos para que grandes deformações pudessem ser feitas, inviabilizando o processamento, pois exigiria no uso de grandes laminadores que gerem altas tensões no material. No caso de deformações em multipasses e controlando a temperatura do processo de laminação já resolve esse problema, pois o processo só exigirá temperaturas em que há mudança na microestrutura do material e com poucos esforços mecânicos.

Um outro problema muito preocupante que se trata do processo de laminação é fazer a estrutura ferrítica que está refinada de ficar dispersa no material. Ou seja, quando os grãos ultrafinos nos aços baixo-carbono estão sendo formados, temos que levar em consideração o grau de deformação do material, assim como a temperatura de trabalho, o tempo e a velocidade do resfriamento quando o material já passou por todo o processamento. Um problema que pode ocorrer no resfriamento rápido é a formação de uma microestrutura muito dura e frágil, conhecida como martensita, na qual confere no material uma queda da tenacidade e aumento da resistência mecânica. Mas também podemos obter uma estrutura bainítica, cuja tem uma boa resistência mecânica em menor grau que a martensita, e

sua tenacidade é maior. E quando as fases martensita e bainita estão dispersas na matriz microestrutural do material, elas vão se formando conforme as velocidades de resfriamento em que são feitas no material em diversos pontos.

### 3.2.4 Aspectos microestruturais

O principal constituinte que aparece no tratamento térmico de Normalização é conhecido como Perlita, em que sua principal característica está na presença das fases Ferrita e Cementita.

Nos aços hipoeutetóides, esse constituinte aparece em conjunto com uma fase matriz: a Ferrita pró-eutetóide ou também conhecida como Ferrita primária, em que sua localização onde é formada se dá a partir do resfriamento do material na região austenítica, ultrapassando o limite de solubilidade de carbono na austenita.

Um caso típico de aço hipoeutetóide que tem a característica Ferrita pró-eutetóide como matriz e Perlita é o aço SAE 1045.

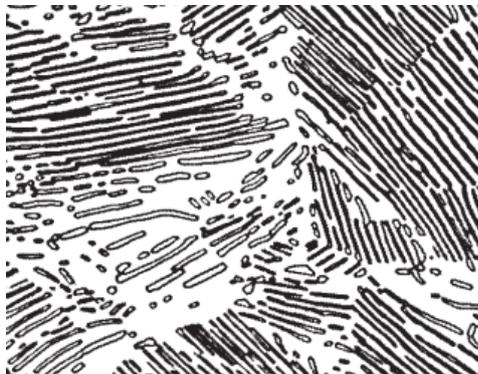


Figura 9 - Microestrutura perlítica de um aço (CALLISTER, 2012)

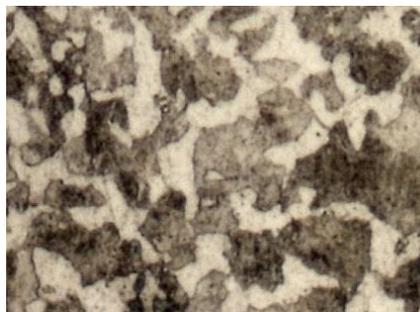


Figura 10 - Microestrutura de um aço SAE 1045, apresentando ferrita e Perlita.

### 3.2.5 Propriedades mecânicas do Aço SAE 1045 Normalizado

As principais propriedades mecânicas que buscamos ao realizar um tratamento térmico de Normalização são as propriedades ligadas ao ensaio de tração - alongamento (%), limite de escoamento, limite de resistência à tração -, dureza, e tenacidade à fratura. Para o aço SAE 1045, temos os seguintes valores, conforme a tabela 5.

Tabela 5 - Principais propriedades mecânicas do aço SAE 1045 Normalizado

PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO SAE 1045 NORMALIZADO					
Temperatura (°C)	Limite de Escoamento ( $\sigma_{esc}$ ) - MPa	Limite de Resistência à tração ( $\sigma_r$ )	Dureza Brinell (HB)	Tenacidade à fratura - (J/m <sup>3</sup> )	Alongamento (%)
900	400	650	260 (máx.)	(*)	20

(\*) A tenacidade à fratura vai depender da geometria da peça, taxa de deformação, estado de tensões, entre outros fatores.

### 3.3 Ensaio de Impacto Charpy

Ao estudarmos o comportamento frágil na época da Segunda Guerra Mundial, engenheiros metalúrgicos e projetistas perceberam em estruturas soldadas, tais como navios e tanques de guerra, que essa característica era muito comum no inverno.

Embora as estruturas metálicas dos materiais aplicados fossem de aços-liga, mesmo que apresentassem boa ductilidade, através de ensaios de tração à temperatura ambiente, eles apresentavam o fenômeno da fratura frágil.

Linhas de pesquisas foram muito importante para o avanço tecnológico que explicassem as causas desse tipo de fratura. Em uma delas, foi determinado que três fatores eram os principais responsáveis pelo aparecimento da fratura frágil (Garcia, 2012):

- Existência de um estado triaxial de tensões, presente graças a presença de um entalhe;

- Temperaturas baixas;
- Taxa ou velocidade de deformação elevada.

Apesar desses três fatores estarem presentes ao surgir uma fratura frágil, não necessariamente atuam ao mesmo tempo.

Ao aplicar altas cargas em corpos entalhados, vários ensaios de impacto foram utilizados para determinar a susceptibilidade da ocorrência de fratura frágil. No caso de juntas soldadas, cientistas já desconfiavam que o problema era no material quando este recebia a solda. Depois de um tempo, descobriram que a soldagem não sofriam diferenças, se comparadas a juntas rebitadas ou até parafusadas. Mas o controle de qualidade bem rigoroso já era uma exigência para impedir que os materiais sofressem defeitos de soldagem.

Um grande problema ao realizar um projeto de uma estrutura soldada é quando o material apresenta concentradores de tensões, como por exemplo, uma junta soldada sofrendo tratamento térmico de têmpera. Esse material passa a ter na estrutura soldada uma região com tensões internas tão elevadas que o material pode trincar mesmo com baixo esforço mecânico.

Para resolver esse problema, navios foram construídos com rebites, tendo como principal objetivo eliminar ou reduzir a propagação das trincas em toda a sua estrutura.

Uma das técnicas empregadas para mostrar as condições citadas, é conhecida como Ensaio por Impacto tipo Charpy, ou técnica Charpy do entalhe em "V" (CVN - *Charpy V-Notch*). O formato do corpo de prova, assim como o esquema do equipamento utilizado são ilustrados, respectivamente, nas figura 11 e 12. Este ensaio consiste em aplicar uma carga com um martelo na forma de pêndulo, cujo está suspenso a uma altura " $h$ ". Ao soltar o pêndulo, a carga instantaneamente atinge o corpo de prova entalhado, fraturando até que o pêndulo atinge uma nova altura " $h'$ ". A energia absorvida calculada a partir da diferença das alturas, é a energia absorvida do impacto.

Segundo CALLISTER, 2012, o tamanho e a forma do corpo de prova, assim como a configuração e a profundidade do entalhe, influenciam significativamente nos resultados dos testes. O corpo de prova Charpy, conforme a figura 11 tem um comprimento normalizado de 55mm.

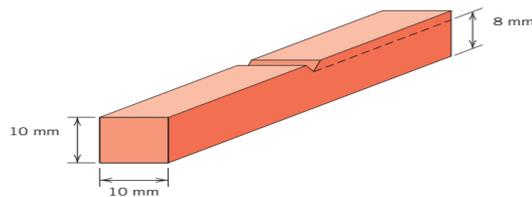


Figura 11 - Modelo do corpo de prova Charpy, com entalhe em "V" (CALLISTER, 2012)

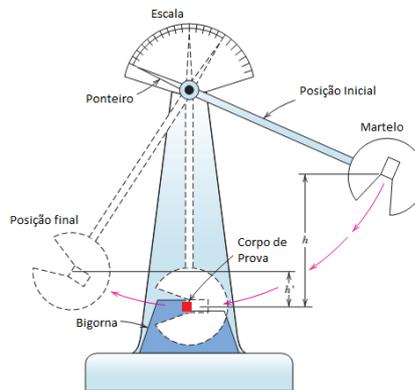


Figura 12 - Esquema do ensaio de Impacto (GARCIA, 2012)

O Ensaio de Impacto Charpy tem uma característica se comparado ao ensaio IZOD: é a posição do corpo de prova, conforme a figura 13.

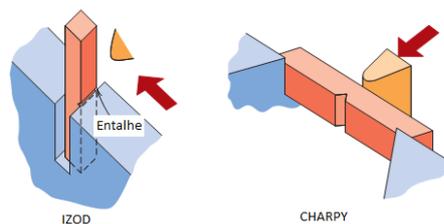


Figura 13 - Posicionamento dos Ensaios de Impacto IZOD e CHARPY (CALLISTER, 2012)

### 3.3.1 Temperatura de transição dúctil x frágil

Os ensaios Charpy e Izod têm como característica a determinação em que um material apresenta transição dúctil-frágil a partir do decaimento da temperatura num intervalo. Esse fenômeno tem relação direta com a energia absorvida medida no ensaio de Impacto.

A transição dúctil-frágil não acontece de forma perceptível em alguns metais, mas reduzindo a temperatura, a tenacidade também tende a cair. Algumas ligas de alumínio e de cobre, com estruturas CFC (cúbica de faces centradas), mesmo a temperaturas extremamente baixas, permanecem ainda dúcteis. No caso de materiais com estrutura CCC (cúbica de corpo centrado) e HC (hexagonal compacto) a transição dúctil-frágil é evidente devido aos diferentes sistemas de

escorregamento vinculado a cada estrutura cristalina e às atividades das discordâncias. No caso da geração, movimentação e recuperação das discordâncias numa estrutura cristalina CFC ocorrem apenas em baixas tensões, não sendo suficientemente elevada a fim de causar o rompimento de ligações atômicas, conduzindo a uma ruptura por clivagem - ruptura esta que ocorre a partir do rompimento das ligações químicas através do plano de escorregamento mais favorável. Geralmente quando ocorre uma nucleação e a trinca se propagando por clivagem, pode ser causada por uma fratura frágil transgranular em planos cristalográficos específicos.

No caso dos aços, a temperatura de transição dúctil-frágil vai depender da composição química e da microestrutura. Um fator importante para essa temperatura diminuir é a realização de um tratamento térmico de recozimento para que haja a redução do tamanho de grão. A figura a seguir ilustra o comportamento dúctil-frágil de alguns tipos de aços com relação a temperatura, sabendo que eles foram temperados e revenidos a uma dureza de 35HRC.

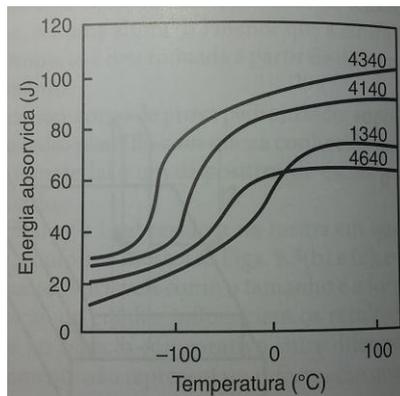


Figura 14 - Resultados de Ensaio de Impacto Charpy para diversos tipos de aços contendo 0,4%p de carbono (GARCIA, 2012)

### 3.3.2 Fatores que influenciam a temperatura de transição

Composição química, microestrutura, tamanho de grão, são alguns fatores que fazem com que haja alteração da temperatura de transição dúctil-frágil. Segundo CALLISTER, 2012, quando fazemos um tratamento térmico de refinamento de grãos numa microestrutura, o material tende a elevar a resistência mecânica e a tenacidade dos corpos de prova Charpy. Isto é evidente em aços de baixa

resistência devido também ao teor baixo de carbono e, conforme for elevando em quantidade, é necessário uma temperatura de transição maior.

### 3.3.3 Fraturas frágeis e dúcteis

Os dois tipos de fraturas possíveis nos metais são fratura dúctil e fratura frágil. Estes tipos de fraturas são classificadas dependendo do modo em que os metais deformam-se plasticamente na região fraturada. Para o tipo de fratura frágil, não há uma deformação considerável, ou seja, o material se rompe ao atingir uma pequena quantidade de deformação.

Podemos observar que a fratura frágil possui uma característica interessante: o aspecto cristalino na região que o material rompeu-se. Além disso, trincas internas propagam-se mais facilmente perpendicularmente à direção onde ocorre a tensão aplicada. A maioria de suas fraturas ocorrem de forma plana.

*"Algumas peças de aço, como "marcas de sargento" no formato em V, podem se formar próximo do centro da seção transversal da fratura, apontando para trás, na direção do ponto onde iniciou-se a fratura. (CALLISTER, 2012)."*

A forma mais comum de uma fratura frágil acontecer é por deslizamento dos planos cristalográficos específicos, onde ocorre a ruptura repetidamente de ligações químicas, também conhecida como ruptura por clivagem ou fratura transgranular.

Fratura transgranular é quando uma trinca vai percorrendo entre grãos.

Outro tipo de fratura frágil é quando a trinca percorre entre os contornos de grãos, também conhecida como fratura intergranular. Neste tipo de fratura geralmente surge a partir de processos onde há redução da resistência do material ou fragilizado pelas regiões dos contornos de grão.

A fratura dúctil, diferentemente da frágil, apresenta deformação plástica bem significativa, além de absorver mais energia, sendo dissipada antes que aconteça a ruptura do material. Seu tipo de fratura é caracterizada como um aspecto fibroso.

Para ambas as fraturas, a temperatura influencia diretamente num ensaio de impacto, podendo um material dúctil apresentar fratura frágil.

### 3.3.3.1 Aspectos macroscópicos e microscópicos

A nível macroscópico, as fraturas frágeis, como já mencionado, apresentam um aspecto de superfície plana perpendicularmente à tensão aplicada. Este tipo de fratura apresenta uma textura cristalina na região da ruptura do material.

Já nas fraturas dúcteis, também como mencionado, essa fratura tem um aspecto fibroso.

A seguir é ilustrada o modo em que esses dois tipos de fraturas se propagam nos materiais metálicos.

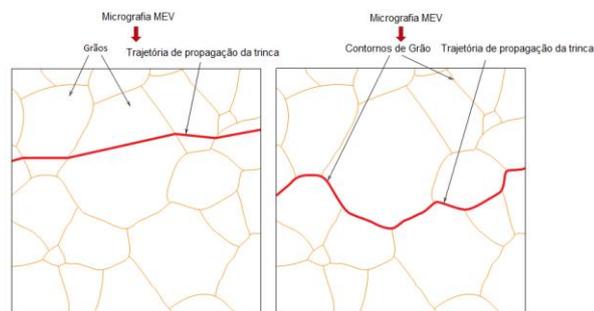


Figura 15 - Ilustração da propagação de trinca visualizado nas seções transversais a nível microscópico. À esquerda, fratura transgranular e à direita, intergranular. (Modificado de CALLISTER, 2012).

A figura abaixo, mostra o comportamento dos metais a nível macroscópico. Neste caso, os metais quando sofrem fratura dúctil, apresentam um formato tipo taça-cone, ou seja, uma superfície com "taça" e a outra que se encaixa, "cone".

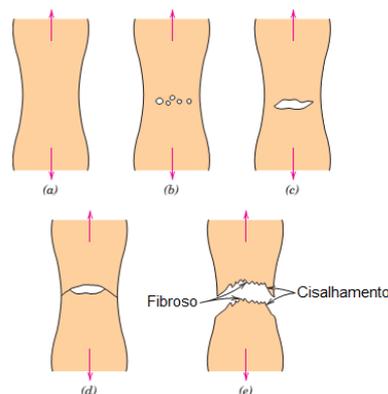


Figura 16 - Estágios em que ocorre uma fratura taça-cone. (a) Empescoçamento; (b) Pequenas cavidades; (c) União das cavidades para formar a trinca; (d) Propagação da trinca; (e) Fratura. (Modificado de CALLISTER, 2012).

A seguir é ilustrada o formato taça-cone de um alumínio, evidenciando a fratura dúctil num ensaio de tração e comparado-o a uma superfície plana de uma fratura frágil para um aço de teor de carbono entre 0,15 e 0,25% (CHIAVERINI, 2005).

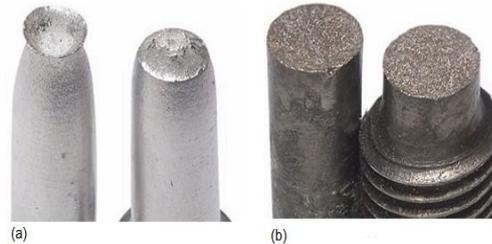


Figura 17 - Modelos de fraturas (a) dúctil tipo taça-cone do alumínio e (b) frágil do aço baixo carbono. (Modificado de CALLISTER, 2012).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Composição química do aço SAE 1045

O aço SAE 1045 tem uma composição química básica conforme a tabela 6:

Tabela 6 - Composição química de um aço SAE 1045 (CHIAVERINI, 2005)

C (%)	Mn (%)	Si (%)	Cr (%)	Al (%)	P (%)	S (%)
0,43 - 0,48	0,60 - 0,90	0,15 - 0,35	0,30 - 0,40	0,02 - 0,05	0,025 máx	0,02 - 0,04

A seguir são apresentados os dados experimentais da mesma composição química, quando realizados em laboratório, a questão de comparação com a literatura. Na tabela 7 apresentamos três medições distintas do mesmo material, visualizados da seguinte maneira: as medições dos elementos químicos presentes na amostra 1 estão disponíveis onde na primeira coluna tem a numeração um. Isto é válido para as outras duas amostras.

Um item interessante é que o espectrômetro utilizado consegue realizar leituras de vários elementos, a partir de uma descarga de elétrons no metal.

Tabela 7 - Composição química experimental do aço

	15/08/2014 21:33:28
---	---------------------

Método: Fe-10-F  
 Comment: Aço Baixa / Média Liga  
 Id da Amostra: Analista: Liga:

15/08/2014 21:33:14

Concentrações

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.456	0.266	0.666	0.0257	0.0220	0.0510	0.0088	0.0293
2	0.474	0.270	0.667	0.0261	0.0227	0.0478	0.0085	0.0300
3	0.473	0.267	0.666	0.0259	0.0228	0.0466	0.0090	0.0278

	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0582	< 0.0015	0.0527	< 0.0010	0.0275	0.0032	< 0.0100	< 0.0030
2	0.0585	< 0.0015	0.0554	< 0.0010	0.0300	0.0029	0.0132	< 0.0030
3	0.0578	< 0.0015	0.0540	< 0.0010	0.0300	0.0029	< 0.0100	< 0.0030

	Sn	As	Zr	Bi	Ca	Ce	B	Zn
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0031	0.0081	< 0.0015	< 0.0040	0.00043	0.0070	0.00070	< 0.0020
2	0.0029	0.0082	< 0.0015	< 0.0040	0.0010	0.0060	0.00049	< 0.0020
3	0.0033	0.0087	< 0.0015	< 0.0040	0.00089	0.0077	0.00073	< 0.0020

	La	Fe						
	%	%						
1	< 0.0010	98.3						
2	< 0.0010	98.3						
3	< 0.0010	98.3						

#### 4.2 Preparação das amostras Charpy

Para preparar os corpos de prova tipo Charpy foi utilizada a máquina de corte, conhecida como Cut-off. Nessa máquina, uma barra de aço SAE 1045 de seção quadrada foi cortada em 18 corpos de prova, com as dimensões: 10x10x55 mm<sup>3</sup>, sendo dois deles nomeados originais, ou seja, que não passaram por tratamento térmico.



Figura 18 - Modelo da máquina de corte ("Cut-off")

Após o corte da barra retangular e com os corpos de prova nas dimensões estabelecidas pela norma SAE, estes foram entalhados numa brochadeira para ficarem do formato conforme a figura 11.

Então, separou-se dois corpos de prova como sendo amostras originais, ou seja, sem tratamento térmico e efetuado o ensaio de dureza Rockwell.

#### 4.3 Tratamentos térmicos de normalização

Após todos os processos de preparação, os corpos de prova passaram pelo tratamento térmico de normalização, conforme a tabela 8:

Tabela 8 - Quantidade de corpos de prova utilizados em cada temperatura após o tratamento térmico de Normalização objetivando ao ensaio específico realizado.

<i>Corpos de prova para medir Dureza</i>					<i>Corpos de prova para realização de ensaio de Impacto</i>				
	Temperatura					Temperatura			
Normalização	740°C	850°C	950°C	1000°C	Normalização	740°C	850°C	950°C	1000°C
Ar Calmo	2	2	2	2	Ar Calmo	2	2	2	2
Ar Forçado	2	2	2	2	Ar Forçado	2	2	2	2

O tratamento térmico de Normalização a ar calmo é o caso tradicional. Já a Normalização a ar forçado é considerado como sendo um caso especial.

A Normalização é muito indicada para a obtenção de uma estrutura homogênea e com refino de grão, melhorando a tenacidade à fratura e a resistência mecânica.

##### 4.3.1 Forno de tratamento térmico

Para a realização do aquecimento dos aços, foi utilizado um forno, conforme a figura 19. Em cada aquecimento, os corpos de prova ficaram por aproximadamente uma hora dentro do forno para homogeneização, seguido por um resfriamento ao ar, sendo três a ar calmo e três auxiliado por um secador de cabelos.



Figura 19 - Modelo do forno utilizado para o tratamento de Normalização.

#### 4.3.2 Ciclos de tratamentos térmicos

Na normalização, os ciclos de tratamentos térmicos são aquecimentos até a austenitização completa do material, seguidas de resfriamento ao ar. Mas antes, é muito importante a observação das seguintes características:

- Aços que possuem alta temperabilidade - sofrem têmpera facilmente -, não podem ou não devem ser normalizados, quando resultar em estruturas martensíticas;
- Numa normalização, a microestrutura é característica e irá variar conforme as dimensões e morfologia da peça. Com isto, é definida a taxa de resfriamento do material.

Um material que passa por vários ciclos sucessivos de tratamento térmico de normalização favorecem no tamanho de grão austenítico, deixando o material mais fácil para a conformação mecânica, porque quando o material é austenitizado, dissolverá mais carbono na austenita.

#### 4.4 Ensaio de impacto Charpy

Os ensaios de impacto são conhecidos para a realização de estudos a partir da fratura frágil que acontecem nos metais. Tal ensaio é muito empregado em materiais que estão sendo alterados, ao tratar-se de condições adversas, como por exemplo a temperatura. Os materiais aprovados são aceitos em aplicações específicas.

A principal razão para a utilização de ensaios de impacto é para medir a tendência do metal em se comportar de modo frágil, sendo que pode-se prever se o material é viável para tal aplicação ou não.

Para isso, é preciso confeccionar corpos-de-prova de forma padronizada com entalhe em uma das superfícies. Para provocar um estado de tensões triaxial, levando a ruptura no local entalhado, o material sofre um impacto por flexão através de um martelo pendular.

No caso do ensaio de impacto tipo Charpy, o material a ser ensaiado tem o formato conforme a figura 11 e sendo posicionados no equipamento conforme a figura 13.

#### 4.4.1 Equipamento

O equipamento utilizado para a realização do ensaio de impacto tipo Charpy tem o formato da figura 20. É composto de um martelo pendular com uma massa e a uma distância entre o martelo e o eixo de sustentação do mesmo que cai até causar impacto no material, fraturando-o.



Figura 20 - Equipamento de Ensaio de Impacto.

#### 4.4.2 Técnica de ensaio

O Ensaio de Impacto tipo Charpy consiste em fazer cair um martelo pendular de massa e de comprimento conhecidos. Quando o corpo de prova sofre o impacto, o martelo sobe até uma altura menor que a altura inicial do pêndulo. Assim, uma

quantidade de energia que é transferida para o material, é possível ser medida através dessa diferença de alturas.

A energia absorvida é calculada após a fratura do material em que multiplica-se a diferença de altura pela massa do martelo pendular. Geralmente, esse valor de energia já é medido pelo próprio equipamento, a partir de uma escala graduada de energia em Joules.

Ao realizar a leitura da energia absorvida no equipamento, quanto menor ela for medida, mais frágil é o comportamento do material diante da situação submetida.

Mas o ensaio de impacto tem uma interpretação limitada, que será útil apenas para comparar materiais numa situação específica (SOUZA, 2011).

O tamanho da amostra também afeta diretamente os resultados, uma vez que as dimensões determinam se o material está num plano de deformações, alterando significativamente as conclusões.

#### 4.5 Análises microestruturais

Foram definidos dois corpos de prova em cada uma das quatro temperaturas de encharque. Para que seja feita a análise metalográfica, a partir da comparação das estruturas do aço SAE 1045, oito amostras foram feitas o tratamento térmico de normalização a ar calmo e oito a ar forçado, impulsionado por jato de ar de um secador de cabelos.

##### 4.5.1 Preparação das amostras

Os corpos de prova para a análise foram cortados a partir de uma barra de seção quadrada numa máquina de corte, conforme a figura 18. Depois, eles passaram pelo processo de tratamento térmico de Normalização a ar calmo e ar forçado.

Antes de fazer a metalografia dos materiais, primeiramente foi necessário fazer o lixamento da superfície numa lixadeira de cinta, e realizar o entalhe numa brochadeira, conforme a figura 21.



Figura 21 - À esquerda: Lixadeira de cinta. À direita: Brochadeira para confeccionar o entalhe no corpo de prova tipo Charpy.

Em seguida, foi realizada a metalografia com a utilização de politriz e lixas de granulometria 220, 320, 400 e 600. Logo após, foram polidas e atacadas com reagente metalográfico NITAL (composto de ácido nítrico e álcool etílico na proporção 1:50). Então, as amostras atacadas foram visualizadas em microscópio óptico.



Figura 22 - À esquerda: Politriz Lixadeira Metalográfica. À direita: Microscópio Óptico com aumento de 50 a 1000x.

#### 4.6 Análises de fraturas

Para a realização da análise de fratura de um material, é preciso determinar as prováveis causas da fratura realizando estudos dos processos de fabricação das amostras.

Um caso típico é a análise das fraturas de navios de transporte da Segunda Guerra Mundial que eram feitos de aço soldados. Mesmo estando longe das regiões dos conflitos, os navios partiam-se ao meio.

Embora apresentassem uma boa ductilidade, os cascos sofriam fratura a baixas temperaturas, exatamente na zona termicamente afetada, devido a alta

concentração de tensões devido a defeitos de fabricação do material ou cantos vivos, propagando trincas muito grandes e catastróficas.

#### 4.6.1 Preparação das amostras Charpy

As amostras utilizadas para a análise de fraturas são as que passaram pelo ensaio de impacto tipo Charpy. Logo após estes ensaios, os corpos de prova foram identificados em Normalização a ar calmo e ar forçado, conforme a temperatura de encharque utilizada, e armazenados em óleo de têmpera para evitar a corrosão na região fraturada.

Ao realizar as análises das amostras, foi necessário retirar o óleo de têmpera, lavando-os com água e sabão líquido neutro e, para remover a água na região fraturada, utilizou-se álcool isopropílico.

Em seguida, as amostras passaram por visualização das regiões fraturadas num Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV, sendo que todas elas foram escolhidas regiões e fotografadas.



Figura 23 - Microscópio Eletrônico de Varredura

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Ensaio de impacto Charpy

Nos ensaios de impacto tipo Charpy, é apresentada a seguinte tabela com os valores de energias absorvidas em relação a temperatura de encharque e o tratamento térmico executado.

Tabela 9 - Dados experimentais dos ensaios de impacto tipo Charpy

ENSAIO DE AMOSTRAS NORMALIZADAS - ENERGIA ABSORVIDA IMPACTO							
TEMPERATURA DE ENCHARQUE: 740°C			TEMPERATURA DE ENCHARQUE: 850°C				
Amostra	Normalização		ENERGIA ABSORVIDA (J)	Amostra	Normalização		ENERGIA ABSORVIDA (J)
	Ar calmo	Ar forçado			Ar calmo	Ar forçado	
A1	X		64,0	A5	X		39,9
A2	X		50,0	A6	X		40,7
	MÉDIA		57,0		MÉDIA		40,3
	DESVIO PADRÃO		9,9		DESVIO PADRÃO		0,6
A3		X	58,0	A7		X	39,3
A4		X	56,0	A8		X	40,4
	MÉDIA		57,0		MÉDIA		39,9
	DESVIO PADRÃO		1,4		DESVIO PADRÃO		0,8
TEMPERATURA DE ENCHARQUE: 950°C			TEMPERATURA DE ENCHARQUE: 1000°C				
Amostra	Normalização		ENERGIA ABSORVIDA (J)	Amostra	Normalização		ENERGIA ABSORVIDA (J)
	Ar calmo	Ar forçado			Ar calmo	Ar forçado	
A9	X		38,7	A13	X		44,7
A10	X		42,7	A14	X		45,9
	MÉDIA		40,7		MÉDIA		45,3
	DESVIO PADRÃO		2,8		DESVIO PADRÃO		0,8
A11		X	45,0	A15		X	46,4
A12		X	39,0	A16		X	45,9
	MÉDIA		42,0		MÉDIA		46,2
	DESVIO PADRÃO		4,2		DESVIO PADRÃO		0,4

Tabela 10 - Energias absorvidas das amostras que passaram pelo ensaio de impacto tipo Charpy.

NORMALIZAÇÃO					
AR CALMO			AR FORÇADO		
Eabs MÉDIO (J)	Desvio Padrão ( $\sigma_{Eabs}$ )	TEMPERATURA (°C)	Eabs MÉDIO (J)	Desvio Padrão ( $\sigma_{Eabs}$ )	TEMPERATURA (°C)
57,00	9,90	740	57,00	1,41	740
40,30	0,57	850	39,90	0,78	850
40,27	2,83	950	42,00	4,24	950
45,30	0,85	1000	46,20	0,35	1000

Nota-se a 1000°C que em ambos os tratamentos térmicos de normalização a ar calmo e ar forçado, que a energia absorvida sofreu um aumento. Isto se deve a imprecisão nos dados porque a quantidade de corpos de prova foram insuficientes para uma melhor análise.

Não importando o tratamento térmico de Normalização que foi realizado, percebeu-se que conforme a temperatura de encharque foi aumentando, a energia

absorvida foi caindo de forma logarítmica, aproximando-se ambas as curvas praticamente no mesmo patamar, conforme o gráfico abaixo.

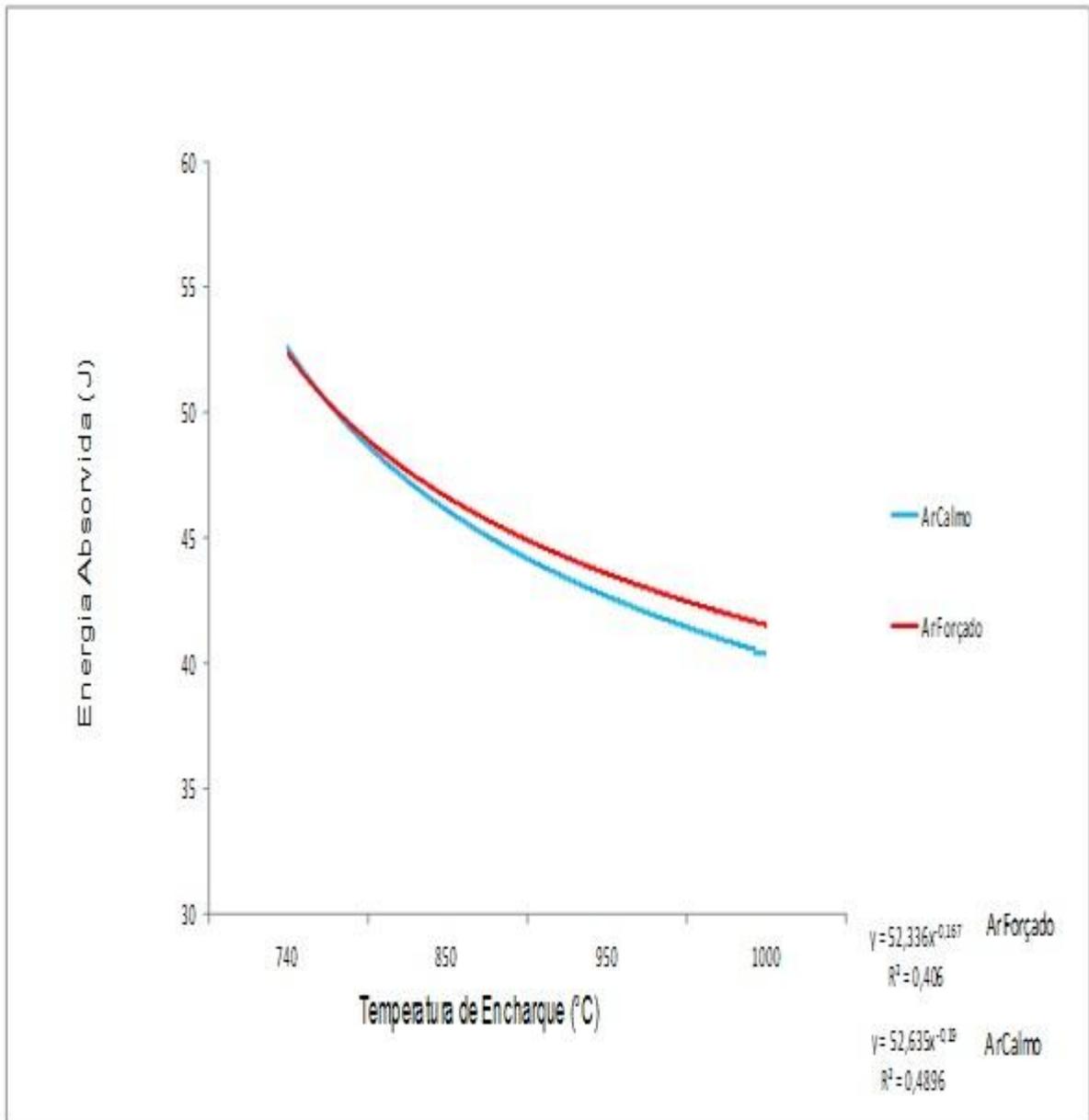


Gráfico 1 - Curvas mostrando a queda na energia absorvida com relação a temperatura de encharque em dois tratamentos térmicos de Normalização a ar calmo e a ar forçado.

Após o ensaio de impacto, foi necessário realizar o ensaio de dureza. Verificou-se que as amostras que passaram por tratamento térmico de Normalização a ar forçado possuem uma dureza um pouco maior que no tratamento a ar calmo. Isto acontece porque a velocidade de resfriamento a ar forçado é maior do que a ar calmo, evidenciado pelos dados experimentais, conforme a tabela 11.

Tabela 11 - Dados experimentais das amostras de impacto que passaram pelo ensaio de dureza.

ENSAIO DE 16 AMOSTRAS NORMALIZADAS - IMPACTO												
TEMPERATURA DE ENCHARQUE: 740°C												
Amostra	Normalização		Durezas									
	Ar calmo	Ar forçado	HRA			MÉDIA	DESVPAD	HRC			MÉDIA	DESVPAD
A1	X		54,0	55,0	55,5	54,83	0,76	18,0	18,0	19,0	18,33	0,58
A2	X		56,5	54,0	55,0	55,17	1,26	20,0	19,0	19,0	19,33	0,58
			MÉDIA DAS MÉDIAS			55,00		MÉDIA DAS MÉDIAS			18,83	
			DESVIO PADRÃO			0,24		DESVIO PADRÃO			0,71	
A3		X	55,5	56,0	55,0	55,50	0,5	20,0	18,0	18,5	18,83	1,04
A4		X	57,0	56,0	56,0	56,33	0,58	19,0	18,5	19,0	18,83	0,29
			MÉDIA DAS MÉDIAS			55,92		MÉDIA DAS MÉDIAS			18,83	
			DESVIO PADRÃO			0,59		DESVIO PADRÃO			0,00	

TEMPERATURA DE ENCHARQUE: 850°C												
Amostra	Normalização		Durezas									
	Ar calmo	Ar forçado	HRA			MÉDIA	DESVPAD	HRC			MÉDIA	DESVPAD
A5	X		57,0	49,0	51,5	52,50	4,09	20,0	20,0	19,5	19,83	0,29
A6	X		57,5	57,0	56,5	57,00	0,50	21,0	21,5	20,5	21,00	0,50
			MÉDIA DAS MÉDIAS			54,75		MÉDIA DAS MÉDIAS			20,42	
			DESVIO PADRÃO			3,18		DESVIO PADRÃO			0,82	
A7		X	58,0	57,5	56,0	57,17	1,04	24,0	23,5	22,5	23,33	0,76
A8		X	54,5	54,0	58,5	55,67	2,47	24,5	22,0	22,5	23,00	1,32
			MÉDIA DAS MÉDIAS			56,42		MÉDIA DAS MÉDIAS			23,17	
			DESVIO PADRÃO			1,06		DESVIO PADRÃO			0,24	

TEMPERATURA DE ENCHARQUE: 950°C												
Amostra	Normalização		Durezas									
	Ar calmo	Ar forçado	HRA			MÉDIA	DESVPAD	HRC			MÉDIA	DESVPAD
A9	X		47,0	47,0	48,0	47,33	0,58	16,5	18,5	15,0	16,67	1,76
A10	X		47,5	49,5	49,0	48,67	1,04	20,5	20,0	16,5	19,00	2,18
			MÉDIA DAS MÉDIAS			48,00		MÉDIA DAS MÉDIAS			17,83	
			DESVIO PADRÃO			0,94		DESVIO PADRÃO			1,65	
A11		X	44,5	47,0	57,0	49,50	6,61	22,0	15,0	15,5	17,50	3,91
A12		X	43,5	49,0	52,5	48,33	4,54	16,5	21,5	19,0	19,00	2,50
			MÉDIA DAS MÉDIAS			48,92		MÉDIA DAS MÉDIAS			18,25	
			DESVIO PADRÃO			0,82		DESVIO PADRÃO			1,06	

TEMPERATURA DE ENCHARQUE: 1000°C												
Amostra	Normalização		Durezas									
	Ar calmo	Ar forçado	HRA			MÉDIA	DESVPAD	HRC			MÉDIA	DESVPAD
A13	X		60,0	62,0	58,5	60,17	1,76	21,0	24,0	22,0	22,33	1,53
A14	X		57,0	56,5	59,5	57,67	1,61	22,5	21,0	20,5	21,33	1,04
			MÉDIA DAS MÉDIAS			58,92		MÉDIA DAS MÉDIAS			21,83	
			DESVIO PADRÃO			1,77		DESVIO PADRÃO			0,71	
A15		X	57,0	61,0	60,0	59,33	2,08	23,0	22,5	22,0	22,50	0,50
A16		X	60,0	56,5	55,0	57,17	2,57	20,5	22,0	21,5	21,33	0,76
			MÉDIA DAS MÉDIAS			58,25		MÉDIA DAS MÉDIAS			21,92	
			DESVIO PADRÃO			1,53		DESVIO PADRÃO			0,82	

### 5.1.1 Tenacidade das amostras resfriadas ao ar calmo

O termo tenacidade à fratura, ou simplesmente tenacidade, é um termo indicativo no qual mostra a resistência de um material submetido a uma fratura, apresentando ou não trinca em sua estrutura, ou qualquer tipo de defeito que ocasione concentradores de tensões. A tenacidade é uma propriedade que necessariamente é levada em consideração na produção de aços para fins estruturais.

Um caso similar de realização da medição dessa propriedade é quando o material está absorvendo energia e deformando plasticamente, até que ele sofra fratura.

O principal método em que podemos obter a tenacidade de um material metálico é através de um ensaio de Impacto, em que mostra a energia necessária na qual o material absorve sem que ele sofra ruptura.

No tratamento térmico de Normalização a ar calmo, temos que as amostras apresentaram os resultados conforme a tabela 12.

Tabela 12 - Dados médios das amostras do ensaio de impacto Charpy após tratamento térmico de Normalização a ar calmo.

<b>AMOSTRAS DE ENSAIO DE IMPACTO TIPO CHARPY NORMALIZADAS A AR CALMO</b>				
<b>Eabs MÉDIO (J)</b>	<b>Desvio Padrão ( <math>s_{Eabs}</math> )</b>	<b>Dureza Média (HRA)</b>	<b>Dureza Média (HRC)</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>
57,00	9,90	55,00	18,83	740
40,30	0,57	54,75	20,42	850
40,70	2,83	48,00	17,83	950
45,30	0,85	58,92	21,83	1050

Percebe-se que a dureza média cai proporcionalmente com relação a energia absorvida, conforme a temperatura de encharque vai aumentando gradativamente.

Então, podemos afirmar que um material que absorve mais energia num ensaio de impacto, este tem a tendência de ter a dureza maior em temperaturas menores. Ou seja, ao elevar a temperatura, a amostra tende a sofrer maior processo de difusão, tendo uma dureza menor.

### 5.1.2 Tenacidade das amostras resfriadas ao ar forçado

Analogamente ao ensaio de Normalização a ar calmo, no tratamento a ar forçado temos os seguintes resultados.

Tabela 13 - Dados médios das amostras do ensaio de impacto Charpy após tratamento térmico de Normalização a ar forçado.

<b>AMOSTRAS DE ENSAIO DE IMPACTO TIPO CHARPY NORMALIZADAS A AR FORÇADO</b>				
<b>Eabs MÉDIO (J)</b>	<b>Desvio Padrão ( <math>s_{Eabs}</math> )</b>	<b>Dureza Média (HRA)</b>	<b>Dureza Média (HRC)</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>
57,00	1,41	55,92	18,83	740
39,85	0,78	56,42	23,37	850
42,00	4,24	48,92	18,25	950
46,16	0,35	58,25	21,92	1000

Na Normalização a ar forçado mostrou que os dados são parecidos quando comparados ao tratamento a ar calmo, apresentando as mesmas características em relação a energia absorvida e a dureza média.

## 5.2 Análises microestruturais

### 5.2.1 Resfriamento ao ar calmo

Ao realizar a metalografia das amostras de aço 1045 normalizados a ar calmo percebemos que os grãos foram aumentando na mesma proporção das temperaturas que foram executados os tratamentos térmicos.

Além disso, nota-se também que a dureza torna-se menor à medida que a temperatura aumenta.

A figura abaixo mostra as microestruturas das amostras nas respectivas temperaturas, antes que sejam realizados os ensaios de impacto.

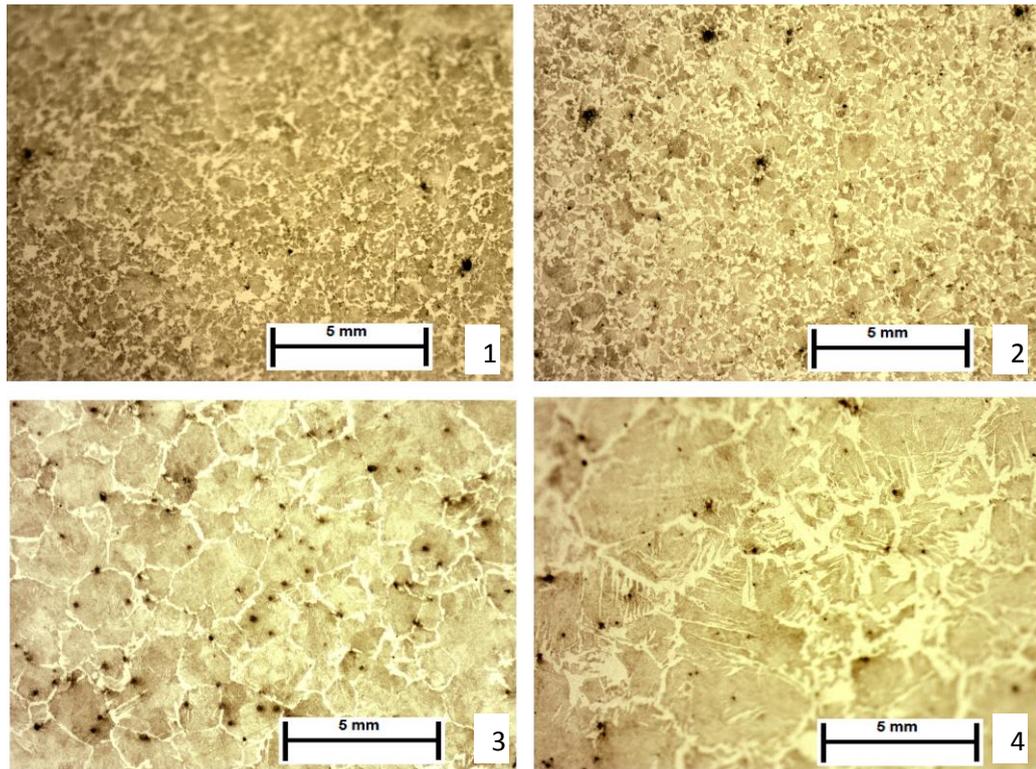


Figura 24 - Metalografias realizadas em aço SAE 1045 Normalizados a ar calmo (1) a 740°C (2) a 850°C (3) a 950°C e (4) a 1000°C. Todas estão em 200x e ataque: Nital 2%.

### 5.2.2 Resfriamento ao ar forçado

Da mesma maneira que no resfriamento a ar calmo, na normalização a ar forçado as amostras apresentaram resultados similares com relação a dureza e o tamanho de grão. A exceção é na temperatura a 740°C em que comparando a micrografia a ar calmo e a ar forçado, a segunda apresentou-se um maior refino de grão. Com isso, teoricamente, a dureza teria que estar maior, mas ao realizar as medições, elas estão praticamente no mesmo patamar, não sofrendo muitas mudanças significativas.

A seguir é apresentada a figura das microestruturas encontradas na normalização a ar forçado antes de passarem pelo ensaio de impacto.

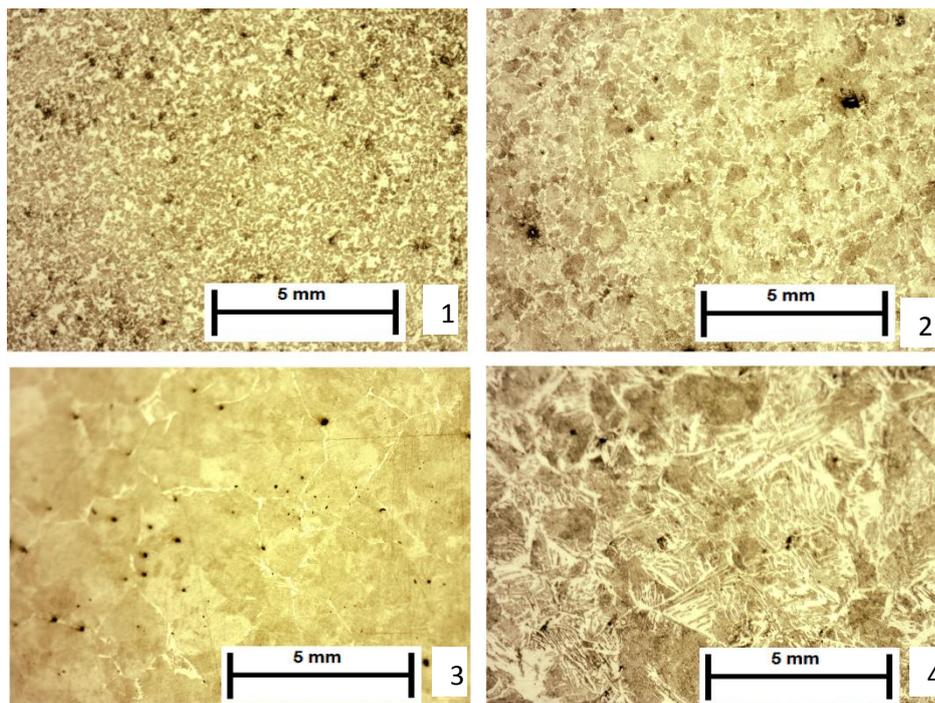


Figura 25 - Metalografias realizadas em aço SAE 1045 Normalizados a ar forçado (1) a 740°C (2) a 850°C (3) a 950°C e (4) a 1000°C. Todas estão em 200x e ataque: Nital 2%.

### 5.3 Análises de fraturas

#### 5.3.1 Amostras resfriadas ao ar calmo

Ao analisar as fraturas através do MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura, percebemos que em todas as amostras, quando realizadas tratamento térmico de normalização a ar calmo, apresentaram predominância de fratura frágil.

Também ficou evidente que em algumas regiões, as amostras tiveram a presença de zonas de transição frágil, identificadas por planos de escorregamento e também por apresentarem pouco "*dimples*".

Os *dimples* na tradução do inglês significa pequenas cavidades, ou seja, são regiões parecidas com recifes de corais. Regiões com essa característica procuram ser mais dúcteis do que fraturas planares. Abaixo, está a figura que apresentam *dimples* e predomínio de fratura frágil em todas as temperaturas no tratamento térmico de normalização a ar calmo.

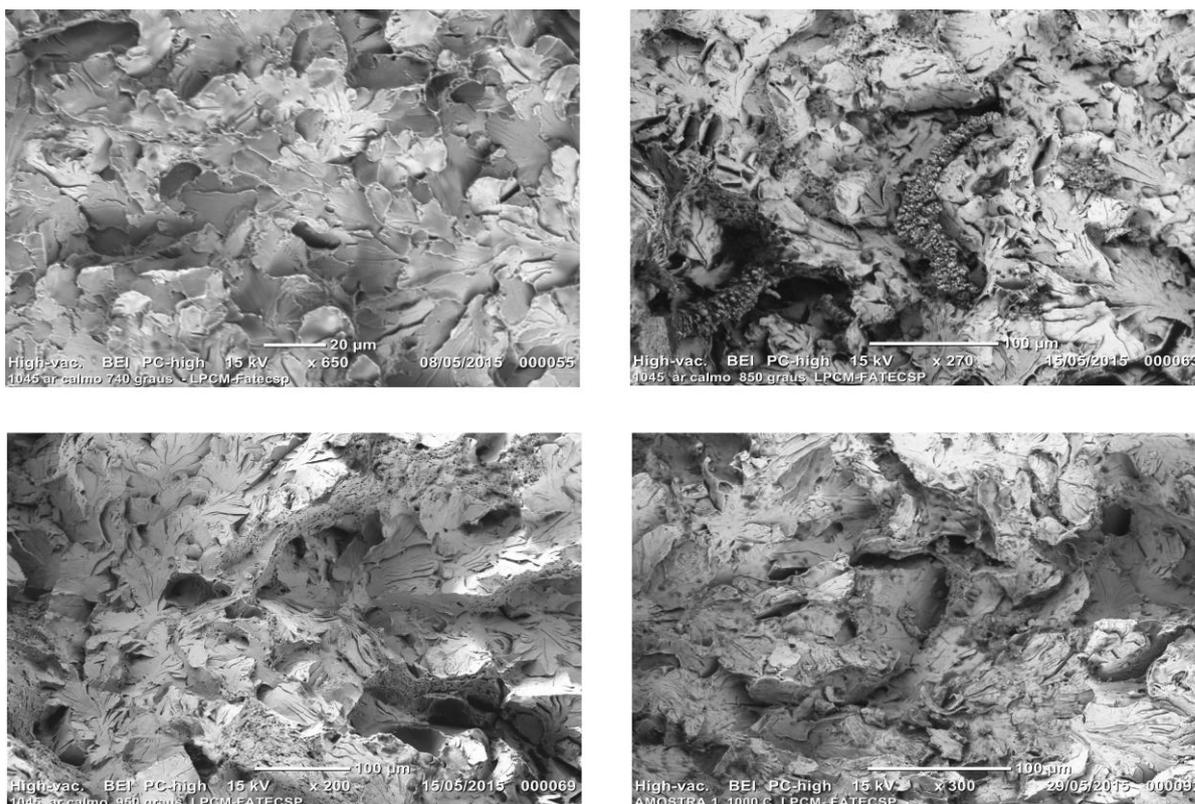


Figura 26 - MEV de amostras fraturadas por ensaio de Impacto. Cada uma tratada a (55) 740°C; (63) 850°C; (69) 950°C e; (92) 1000°C. A 850°C nota-se uma inclusão intermetálica presente provavelmente proveniente do processo de fundição do material. Em todas as amostras há predominância de planos de escorregamentos, característica de fratura frágil.

Podemos notar que no tratamento térmico de normalização a ar calmo, praticamente não apresenta uma quantidade significativa de *dimples* a temperaturas mais baixas. Isto torna-se evidente nas micrografias de microscopia eletrônica de varredura - MEV - da figura 26, além de apresentarem predominância de planos de escorregamento, determinando que os materiais sofreram fraturas frágeis.

### 5.3.2 Amostras resfriadas ao ar forçado

Nas amostras que passaram por tratamento térmico de normalização a ar forçado, elas apresentaram mais *dimples*, conforme a temperatura foi aumentando, devido ao processo de difusão, mas somente podem ser vistos por microscopia eletrônica, não sendo possível esta avaliação em microscópio óptico porque o aumento é menor. Notou-se também que a dureza também é ligeiramente maior, comprovado pelos dados do gráfico 1, tabelas 10 e 12.

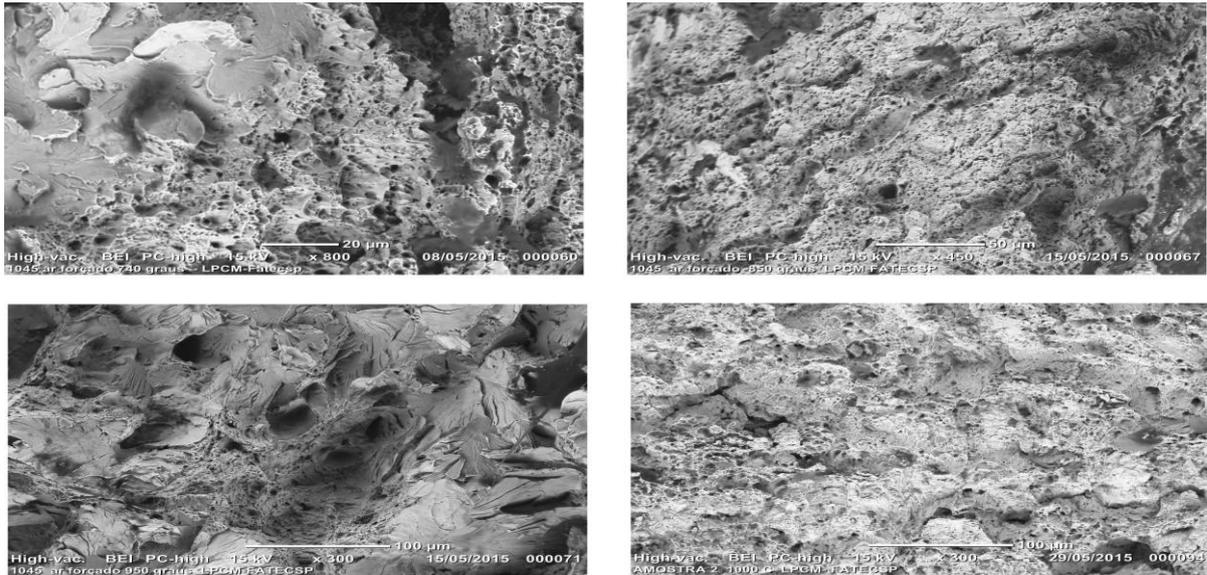


Figura 27 - MEV das amostras fraturadas por ensaio de Impacto. Cada uma tratada a (60) 740°C; (67) 850°C; (71) 950°C e; (74) 1000°C. Nota-se que quanto maior a temperatura de encharque, mais *dimples* serão formados provavelmente por difusão, característica de fratura dúctil, além de aumentar o refino de grão.

## 6 DISCUSSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

O tratamento térmico de normalização a ar forçado é muito utilizado nas indústrias em casos especiais, para a obtenção de um melhor refino de grão. Além disso, a presença de *dimples* auxilia na melhora de algumas propriedades em que o material será aplicado.

Algumas propostas para a execução de outros trabalhos acadêmicos, sugere-se a realização de ensaio em tratamento térmico de normalização a ar forçado com maior velocidade de resfriamento, para comprovar com mais eficácia o que foi executado neste trabalho.

Além deste, uma outra sugestão adicional é analisar fraturas em aços ligados com outros tipos de tratamentos térmicos, diferentemente de aço médio carbono, incluindo a localização, identificação e procedência de compostos intermetálicos presentes.

## 7 CONCLUSÕES

Podemos concluir que a normalização a ar forçado é muito utilizada em casos especiais para que o refino de grão torne-se mais efetivo, além de ter uma dureza levemente maior quando comparado ao tratamento a ar calmo.

Além disso, o tratamento de normalização a ar calmo ocasiona fraturas frágeis, e fraturas dúcteis a ar forçado. Isto acontece porque nas fraturas dúcteis há a formação de "*dimples*", que só podem ser visíveis com microscopia eletrônica, sendo impossível visualizar em microscópio óptico.

Na mesma microscopia eletrônica também ficou visível a presença de inclusões intermetálicas, provavelmente proveniente do processo de fundição.

No caso da energia absorvida, conforme a temperatura de encharque foi aumentando, a energia foi diminuindo, mas na última medição, tal energia sofreu um acréscimo, motivado pela quantidade de corpos de prova ser insuficiente.

Os *dimples* apresentaram uma maior quantidade quando a temperatura de encharque foi sendo elevada, facilitando o refino de grão.

A respeito das medições em dureza Rockwell C tornaram-se pouco confiáveis porque a maioria das medidas estavam no limite de aceitação dessa escala. Isto aconteceu pelo motivo de usar um peso de 150kg, ocasionando numa deformação exacerbada na penetração do material, fato corrigido com a substituição de escala para Rockwell A que usa um peso de 60kg.

Para ambos os tratamentos térmicos a ar calmo e ar forçado, não foi possível a localização de grãos ultrafinos. Este problema é resolvido com a utilização de um microscópio eletrônico de transmissão (MET), ou também, trocando o aço SAE 1045 por um aço ARBL (aço de Alta Resistência e Baixa Liga), localizados tais grãos ultrafinos na literatura pesquisada.

## REFERÊNCIAS

NAVARRO, R. F. **A evolução dos Materiais. Parte 1: da Pré-história ao início da Era Moderna.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, Campina Grande - PB, v.1, 1 (2006) 01-11

VISACRO, A. **Guerra Irregular: Terrorismo, Guerrilha e Movimentos de Resistência ao Longo da História.** Contexto, São Paulo, p. 8.

CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 8ª Edição, LTC, Rio de Janeiro, RJ, 2012

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**, ABM, 7ªed., São Paulo – SP, 2005

de ASSIS, C. L. F.; MONTANARI, L.; RODRIGUES, A. R.; GALLEGOS, J.; SILVA NETO, O. V. **Refino de grão em aços baixo carbono: Uma revisão crítica.** ABCM. Caxias do Sul - RS, 2011

NARAYANA MURTY, S. V. S.; TORIZUKA, S. **Microstructure-mechanical properties correlation in ultrafine grained steels processed by large strain warm deformation**, ISIJ International, Vol. 48, No. 8, pp. 1088 -1095, 2008.

HURLEY, P. J.; HODGSON, P. D., **Formation of ultra-fine ferrite in hot rolled strip: potential mechanisms for grain refinement**, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 302, No. 2, pp. 206-214, 2001.

WENG, Y. **Ultra-fine grained steels**, Beijing: Metallurgical Industry Press; New York: Springer Berlin Heidelberg, 569 pág., 2009.

MILITZER, M.; BRECHET, Y. **Phenomenological model for deformation-induced ferrite transformation**, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 40, No. 10, págs. 2273-2282, 2009.

HAN, B. Q.; YUE, S. **Processing of ultrafine ferrite steels**, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 136, No. 1-3, pág. 100-104, 2003

BAYER, P. S. **Tratamentos Térmicos e Termoquímicos [S.I.]** Virtual Books, 2013. Disponível em: <<http://www.joinville.ifsc.edu.br/~paulosergio/Tratamentos%20T%C3%A9rmicos%20e%20Termoqu%C3%ADmicos/Apostila%20TTT.pdf>>. Acesso em 13.jun.2015, 10:32:13

PINTO, Tales. **Guerra Franco-Prussiana e a unificação alemã** [S.l.] Virtual Books, 2014. Disponível em: <<http://guerras.brasilecola.com/seculo-xvi-xix/guerra-francoprussiana.html>>. Acesso em 12.set.2014, 22:46:07

TSUJI, N. **Ultrafine grained steels managing both high strength and ductility**, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 165, Não paginado, 2009.

NARAYAMA MURTY, S. V. S. e TORIZUKA, S., 2008, **Microstructure-mechanical properties correlation in ultrafinegrained steels processed by large strain warm deformation**, ISIJ International, Vol. 48, No. 8, pp. 1088-1095.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; DOS SANTOS, C. A. **Ensaio de Materiais**, 2ª edição, LTC, Rio de Janeiro - RJ, 2012

SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**. s.l. : Blucher, 2011.