

Artigo

# Influência do tempo e temperatura de recozimento sobre a tenacidade ao impacto de um aço carbono

Matheus Odilon da Silva Pereira <sup>[1]</sup>, Francisco Edson Nogueira Fraga <sup>[2]</sup>

<sup>[1]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido; matheus.odilon@gmail.com

<sup>[2]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-Árido; nfraga@ufersa.edu.br

Recebido: 30/09/2022;

Aceito: 21/12/2022;

Publicado: 23/12/2022.

**Resumo:** Este trabalho buscou relacionar as alterações de tenacidade ao impacto sofridas por uma barra chata encruada de aço ABNT SAE 1020 com os tempos e temperaturas de um tratamento térmico de recozimento pleno, responsável por modificar a microestrutura do aço. Os tratamentos foram realizados em duas temperaturas, 890°C e 970°C com tempos de uma, duas e três horas. Posteriormente, as amostras foram cortadas e levadas para a fresadora para confeccionar 35 corpos de prova tipo A, para o ensaio de Charpy. Foi realizado o ensaio com pêndulo de 300 J com corpos de prova em apoio simples. Em seguida, foi separado um corpo de cada condição para preparação metalográfica. Foi realizado o preparo metalográfico nas amostras para serem levadas ao microscópio óptico. A partir dos resultados obtidos, foi observado um aumento de tenacidade ao impacto nas amostras submetidas a temperaturas de 890°, enquanto nas amostras submetidas a temperatura de 970° ocorreu perda de tenacidade ao impacto.

**Palavras-chave:** Recozimento; tenacidade ao impacto; crescimento de grão; microestrutura; recristalização.

**Abstract:** This work sought to relate the impact toughness changes suffered by a hardened flat bar made of ABNT SAE 1020 steel with the times and temperatures of a full annealing heat treatment, responsible for modifying the steel microstructure. The treatments were carried out at two temperatures, 890°C and 970°C with times of one, two and three hours. Subsequently, the samples were cut and taken to the milling machine to make 35 type A specimens for the Charpy test. The test was carried out with a 300 J pendulum with specimens in simple support. Then, a body of each condition was separated for metallographic preparation. The metallographic preparation was carried out in the samples to be taken to the optical microscope. From the results obtained, an increase in impact toughness was observed in the experimental samples at temperatures of 890°, while in the experimental samples at a temperature of 970°C there was a loss of impact toughness.

**Key-words:** Annealing; impact toughness; grain growth; microstructure; recrystallization.

## 1. INTRODUÇÃO

Aços submetidos a processos de conformação, como barras chatas que foram deformadas plasticamente durante o processo de laminação, sofrem com alterações microestruturais e cristalográficas, normalmente envolvendo algum tipo de transformação de fase. Sofrem também com o aumento de defeitos puntiformes e discordâncias. A microestrutura se altera, os grãos adquirem uma orientação preferencial cristalográfica de acordo com a direção da conformação e se tornam alongados [1,2].

A deformação gera tensões internas provocando o aumento de dureza, proveniente da presença de discordâncias e seus deslizamentos. Uma vez que se inicia o processo de deformação plástica, a tensão necessária para gerar deformação é relativamente pequena, mas à medida que o processo continua, multiplica-se as discordâncias, aumentando sua densidade por unidade de volume no cristal, aumentando o intercruzamento das direções de movimentação, dificultando cada vez mais a movimentação, dessa forma tornando-se necessário maiores níveis de tensões para provocar deformação [1-5].

Este fenômeno, denominado encruamento, é caracterizado pelo aumento da tensão necessária para deformar plasticamente, ou seja, dureza mais elevada e menor ductilidade. Na indústria, algumas situações necessitam que o material sofra grande deformação antes da ruptura. Em razão disso, se utiliza de tratamento térmico para aumento de ductilidade e diminuição de dureza, como o tratamento de recozimento [2,5].

No recozimento, o material passa por três processos distintos, o primeiro é a recuperação, em que as

propriedades mecânicas modificadas pela laminação retornam a seus valores iniciais, havendo também diminuição significativa na energia interna e tensões internas pelo encontro de discordâncias de sinais opostos. O segundo é a recristalização, em que ocorre a formação de um novo conjunto de grãos livres de deformação, em razão de alterações microestruturais, pois são nucleados novos cristais, sem deformação, que absorvem os deformados. A energia interna acumulada é aliviada e a textura de grão alongado é eliminada. O crescimento de grão, última etapa, consiste na continuação da recristalização e aumento do tamanho de grão em função dos grãos vizinhos já cristalizados [2,5].

Algumas alterações mecânicas sofridas por aços carbono que passam por recozimento são: aumento de ductilidade, tenacidade ao impacto e diminuição da dureza. Espera-se que a resistência ao impacto das amostras tratadas termicamente seja superior aos laminados, resultado da formação austenítica durante o tratamento térmico de recozimento, formando ferrita primária e perlita no resfriamento. Logo o material terá grande capacidade de absorção de impacto antes de partir, esse tipo é denominado de fratura dúctil. O que se quer evitar é a fratura frágil, aquela que não necessita de grande quantidade de energia para propagar trincas, quando ocorre o rompimento sem nenhum alerta.

Este trabalho tem como objetivo avaliar as alterações provenientes do tratamento térmico como função do tempo e temperatura no aço ABNT SAE 1020, laminado, e relacionar alterações sofridas durante o tratamento e o efeito da mudança sofrida na microestrutura, tamanho de grão e rede cristalográfica com as propriedades mecânicas, entre elas a tenacidade ao impacto.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Aço carbono

O aço tem um percentual de carbono em sua estrutura cristalina que varia de 0,008 a 2,11%. Em condições normais, aços hipoeutetoides possuem sua microestrutura composta por ferrita proeutetoide e perlita. No entanto, é possível alterar a morfologia destas fases através de tratamentos térmicos. O limite inferior de 0,008% representa a máxima solubilidade de carbono no ferro em temperatura ambiente, já o limite superior de 2,11% representa a quantidade máxima de carbono que se dissolve no ferro, em sua temperatura de 1148 °C [6].

Aços carbono podem ser divididos baseando no seu percentual de carbono, em baixo teor, inferior a 0,25%, médio teor entre 0,25 e 0,6%, e alto teor de carbono acima de 0,6% [7].

O carbono também funciona como mecanismo de aumento de dureza por solução sólida intersticial, uma vez que o átomo de carbono ocupa posições intersticiais na rede cristalina do Fe<sub>3</sub>, produzindo uma liga mais resistente que o ferro puro. Há estudos que mostram que a distribuição de soluto não é aleatória, os átomos se agrupam preferencialmente nas discordâncias, falhas de empilhamento, contorno de baixo ângulo, e contornos de grão. Contribuindo assim para o aumento da curva tensão-deformação, em razão do preenchimento dos interstícios com átomos de carbono [8]. Abaixo segue a Tabela 1 com a composição do aço SAE 1020.

TABELA 1. Dados da composição química do aço SAE-1020 [9].

Elemento	Concentração
Carbono (C)	De 0,18 a 0,23%
Manganês (Mn)	De 0,3 a 0,6%
Fósforo (P)	<= 0,030%
Enxofre (S)	<= 0,05%
Silício (Si)	<= 0,20%

Nota: Concentração de cada elemento presente no aço SAE 1020.

De acordo com a Tabela 1, o carbono possui concentração entre 0,18 e 0,23% presente no aço SAE 1020, com percentual de 0,2%. O manganês tem uma concentração entre 0,3 e 0,6%. O fósforo e enxofre apresentam concentração abaixo de 0,04% e 0,05%, respectivamente.

Na Tabela 2 as propriedades mecânicas do aço SAE 1020 na condição laminado e recozido.

TABELA 2. Dados com as propriedades mecânicas do aço SAE 1020 [10].

AISI	Condição	Resistencia a Tração (Mpa)	Limite de Escoamento (Mpa)	Alongamento (%)	Redução de Area (%)	Dureza (HB)	Impacto (HB)
1020	Laminado	450	330	36	59	143	87
1020	Recozido	395	295	36,5	66	111	123

Nota: Propriedades mecânicas do aço SAE 1020.

## 2.2. Encruamento

Durante o processo de laminação, em que o material sofre deformação plástica, ocorrem algumas alterações permanentes no cristal, como deslizamento de planos cristalográficos por movimentação de discordâncias, maclação, difusão e transformações de fases com grande variação de volume. No processo, o poli cristal sofrerá mudança na morfologia de grão, em sua orientação de direção preferencial, aumento da área de contornos de grão por unidade de volume, de defeitos puntiformes e discordâncias por unidade de volume. Todos esses fatores contribuem para o aumento do encruamento e, consecutivamente do limite de escoamento e o limite de resistência do material [1,5].

A maior parte da energia introduzida durante o processo é perdida via dissipação de calor. Nos aços de baixo carbono, durante a laminação para altas reduções, pode-se atingir uma temperatura de até 100 °C. Parte dessa energia gasta no processo, de 2 a 10%, fica armazenada como defeitos cristalinos. O defeito cristalino que mais contribui para o aumento da energia interna é a movimentação de discordâncias. Materiais trabalhados a frio devem sofrer deformação acima de 5% para ocorrer a recristalização de acordo com a Figura 1 [1,5].

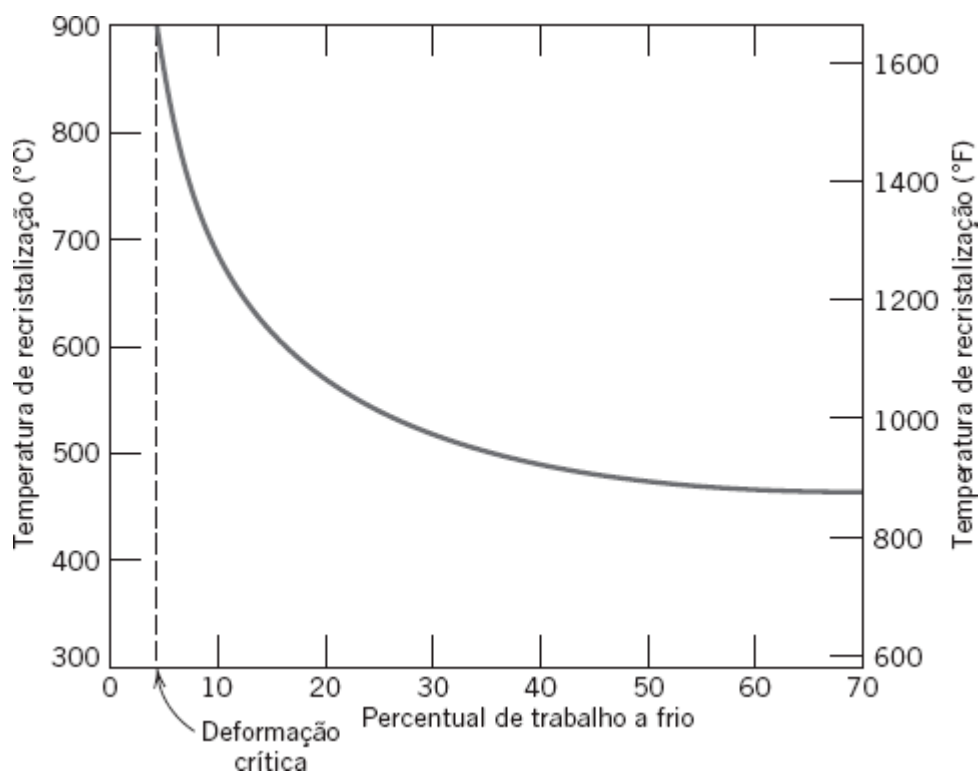


FIGURA 1. Variação da temperatura de recristalização em função do trabalho a frio para ferro [1].

O tamanho de grão inicial tem grande influência na quantidade de discordâncias por unidade de volume. Estudos mostram que matérias que sofreram mesmo grau de conformação mecânica têm diferentes densidades de discordâncias. Materiais que possuem tamanho de grão menor, apresentam maior número de densidade de discordâncias. Existe uma relação entre deformação ( $\epsilon$ ), tamanho do grão ( $d$ ), e densidade de discordâncias ( $f$ ) para ferro puro, onde ( $k_1$ ) e ( $n$ ) são constantes dependentes do modo de deformação e ( $b$ ) é o módulo de Burgers.[5] conforme a Equação 1:

$$f = \frac{\epsilon}{k_1 * b} * \frac{1}{d^n} \quad (1)$$

## 2.3. Tratamento térmico de recozimento

A realização do recozimento tem como fim alcançar alguns objetivos, como remover tensões internas a frio ou a quente devido a deformação plástica, diminuição de dureza para melhor usinabilidade, alterar propriedades mecânicas como resistência e ductilidade. Ocorrem ajustes na microestrutura, como tamanho de grão, regularização da textura, remoção de gases, e produção de uma microestrutura homogênea eliminando defeitos sofridos por tratamento térmico ou mecânico anteriormente [1,11].

Há cinco tipos de recozimento:

1. Recozimento Pleno: Consiste no aquecimento de Fe<sub>3</sub>C 50 °C acima da zona crítica A<sub>3</sub> para um aço hipoeutetóide, durante tempo suficiente para se ter solução de carbono, seguido de um resfriamento muito lento,

realizado via controle de velocidade ou até mesmo desligando o forno e deixando resfriar conforme o forno dissipa calor. Os constituintes do recozimento são perlita e ferrita para aços hipoeutetóides. A perlita é a estrutura ideal para melhorar a usinabilidade [7,11].

2. **Recozimento Cíclico:** Consiste no aquecimento do aço na mesma forma que o pleno, seguido de um resfriamento rápido até uma temperatura dentro da faixa de transformação isotérmica, onde é mantido até completa transformação e logo em seguida resfriado até temperatura ambiente. Os resultados são também perlitas e ferritas [7,11].

3. **Recozimento Para Alívio de Tensões:** O aço é aquecido até o limite inferior da zona crítica  $A_3$ . O objetivo é aliviar tensões provenientes de solidificação ou de trabalho mecânico a frio, como estampagem, ou corte por chama, soldagem ou usinagem. As tensões começam a ser aliviadas já próximo à temperatura ambiente, mas o ideal é aquecimento lento até 500 °C [7,11].

4. **Recozimento em Caixa:** Esse tratamento é feito com objetivo de proteção de grandes números de peças de aço, para impedir e proteger a superfície do aço pela oxidação ou outro tipo de tratamento. Geralmente se faz aquecimento lento até temperatura abaixo da zona crítica, de 600 °C a 700 °C [7,11].

5. **Esferoidização:** É o aquecimento, seguido de resfriamento com objetivo de produzir forma globular ou esferoidal de cementita na matriz de ferrita. Uma das formas de produzir é aquecer logo acima da linha inferior de transformação, seguido de resfriamento lento. É recomendado para melhorar a usinabilidade de aços de alto carbono [7,11].

O diagrama ferro carbono com as suas fases pode ser observado pela Figura 2 [12].

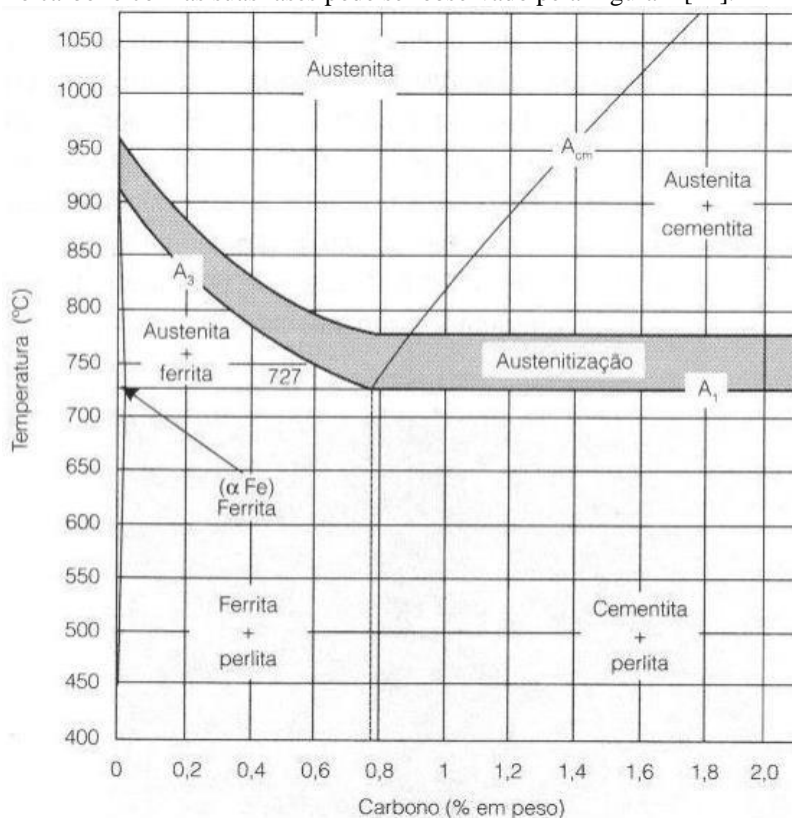


FIGURA 2. Diagrama de fase do sistema Fe-Fe<sub>3</sub>C [12].

#### 2.4. Recuperação, Recristalização (nucleação e crescimento de grão) e Crescimento de grão acentuado

Em geral, ocorre a recuperação e logo em seguida o processo de recristalização que pode ser subdividido em três etapas: Nucleação, Recristalização propriamente dita e crescimento de grão. Durante a recuperação, ocorrem mudanças microestruturais que levam a uma restauração das propriedades. Em temperaturas maiores que 0,2  $T_f$  ( $T_f$  = fusão absoluta), ocorre a migração de defeitos puntiformes para contornos de grão e discordâncias, há também a eliminação de interstícios e lacunas [1,5].

As discordâncias do interior vão para as paredes, aniquiladas, deixam os subgrãos mais nítidos e maiores, surgindo assim contornos de grão com grandes ângulos, e tornando os subgrãos núcleos para o crescimento de novos grãos recristalizados. A recristalização é a próxima etapa, pois a recuperação ocorre em temperaturas mais baixas [1,5,13].

Mesmo após a recuperação, os grãos ainda apresentam um estado de energia de deformação elevada. Agora na recristalização, que se trata principalmente de um processo de mudança de fase, através de nucleação e crescimento de grão. É formado um novo conjunto de grãos livres de deformação e equiaxiais, com baixas

discordâncias, com características parecidas das que existiam antes da deformação. Durante o recozimento, a taxa de recristalização decresce devido a eliminação de discordâncias, como também redução de área deformada, substituídas por novas. As soluções sólidas têm efeito de retardar a migração dos contornos, já a nucleação e crescimento que são ativadas pela temperatura, são aceleradas conforme o aumento da temperatura [1,5,13].

A nucleação é o início do processo de recristalização, onde é formado uma região livre de defeitos associada a um contorno de alto ângulo, baixa densidade de discordâncias, e com alta mobilidade, sendo capaz de migrar rapidamente sobre a matriz encruada. Os núcleos que originam os novos grãos recristalizados são formados durante o recozimento, mas passam a existir na deformação. Envolve a migração de um contorno de grão pré-existente para o interior de um mais deformado. A condição para o processo é o balanço energético favorável, através da eliminação de defeitos e aumento total da superfície do grão, pelo “embarrigamento” [1,5,13].

O crescimento de grão, a última etapa do processo, ocorre depois que os grãos estão livres de deformação e se o material for deixado em temperatura elevada. O mecanismo fundamental, é a migração de contornos de alto ângulo. O crescimento está associado com contornos de grão de maneira que à medida que os grãos aumentam, a área de contorno diminui bem com a energia associada. O crescimento ocorre pela migração dos contornos. Os grãos maiores crescem em função da absorção dos grãos menores, que encolhem. À medida que a temperatura aumenta, o crescimento ocorre mais rapidamente. A manutenção da temperatura é etapa fundamental para o crescimento, o que é explicado pelo aumento da taxa de difusão em função da temperatura [1,5,13].

### 2.5. Tenacidade ao impacto

Tenacidade ao impacto, mede a resistência de um material à propagação de uma trinca pré-existente. As trincas atuam como concentradores de tensão, e fazem com que o material se rompa com carga menor que a tensão de escoamento. A tenacidade pode ser mensurada através da quantidade de energia absorvida em um ensaio de impacto. [14]

A fratura consiste na separação do corpo em duas partes quando está sob ação de esforço mecânico. Existem dois tipos de fratura: dúctil e a frágil.

O principal fator para uma fratura ser definida como dúctil é a ocorrência prévia de deformação plástica em detrimento da propagação de trincas. O que ocorre é uma lenta propagação de trincas, enquanto o material se deforma plasticamente. Visualmente é caracterizada por uma superfície deformada e opaca. Os modos típicos mais comuns de se observar fratura dúctil, são: [15]

- a) Afilamento gradativo da região tensionada até que ocorra a separação do corpo.
- b) Formação de uma superfície deformada, com vários pontos de clivagem.

Já a fratura frágil, o principal fator para ser definida como tal, é a ocorrência prévia de trincas em relação a deformação plástica. Ocorre uma rápida formação de trincas, levando a ruptura do material sem nenhuma deformação plástica previamente. Visualmente é caracterizada pela fratura ser perpendicular à força aplicada, com aspecto brilhoso [15].

Pode ocorrer a fratura de duas formas, a primeira transgranular, caracterizada pela separação de planos atômicos, fato que faz com que essa cisão passe por dentro do grão que forma o material, revelando uma textura superficial facetada. A segunda, intergranular, caracterizado pela separação dos grãos e as trincas se propagando nos contornos do grão [15].

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado neste trabalho foi uma barra chata laminada de aço ABNT SAE 1020 adquirida no comércio local, com dimensões de 1/2” x 2 1/2”. Esta barra foi cortada, e dividida em sete amostras de 100 mm x 12,7mm cada, das quais uma foi mantida sem tratamento térmico, como referência, e seis foram levadas ao forno para recozimento em tempos e temperaturas diferentes, como segue: três amostras à 890°C, em tempos de uma hora, duas horas, e três horas, com a última sendo resfriada ao forno até temperatura ambiente. As outras três amostras foram levadas ao forno a 970°C, em tempos de uma hora, duas horas, e três horas, com a última também sendo resfriada ao forno. Para todos os tratamentos de recozimento, as amostras foram colocadas dentro do forno somente quando o forno já se encontrava na temperatura do tratamento planejado.

Após recozimento, todas as amostras, inclusive a amostra de referência (sem recozimento), foram cortadas transversalmente e usinados, corpos de prova do tipo A para ensaio de impacto Charpy, com dimensões de 10mm x 10mm x 55mm e entalhe em V com 2mm de profundidade e 45°, em conformidade com a norma ASTM E23-02 [16]. Foram confeccionados cinco corpos de prova Charpy para cada condição [17].

Os ensaios foram feitos em uma máquina de ensaio Charpy do fabricante Time Group INC® modelo JB-W300 A com pêndulo de 300 J.

Finalizados os ensaios de impacto, avaliou-se o aspecto das fraturas e presença (ou não) de deformação plástica de todos os corpos de prova.

Posteriormente, foi escolhida uma amostra de cada condição e foram preparadas para metalografia. Foi realizado o corte através da cortadora metalográfica e posteriormente lixadas com refrigeração d'água com granulometria de 400, 600, 800 e 1200. Em seguida as amostras foram polidas com sílica coloidal e feito o ataque químico com imersão da peça em nital a 2% com tempo entre 10 e 15 segundos.

As amostras foram analisadas em um microscópio óptico, com lentes do fabricante Olympus Corporation®, modelo GX51. Foram feitas imagens da secção transversal, em aproximação de 200x, totalizando 7 imagens.

#### 4. RESULTADOS

Neste tópico são apresentados os resultados de micrografia para amostra encruada e recozidas em uma, duas e três horas à 890°C e 970°C para relacionar com os dados de energia ao impacto.

##### 4.1. Microestrutura

Através das imagens de microestrutura abaixo foram feitas análises qualitativas dos constituintes. Foi observada e digitalizada todas as amostras recozidas em diferentes tempos e temperaturas com aumento de 200x, com objetivo de observar tamanho de grão, orientação e contorno de grão. É possível observar os constituintes nas Figura 3 e Figura 4.

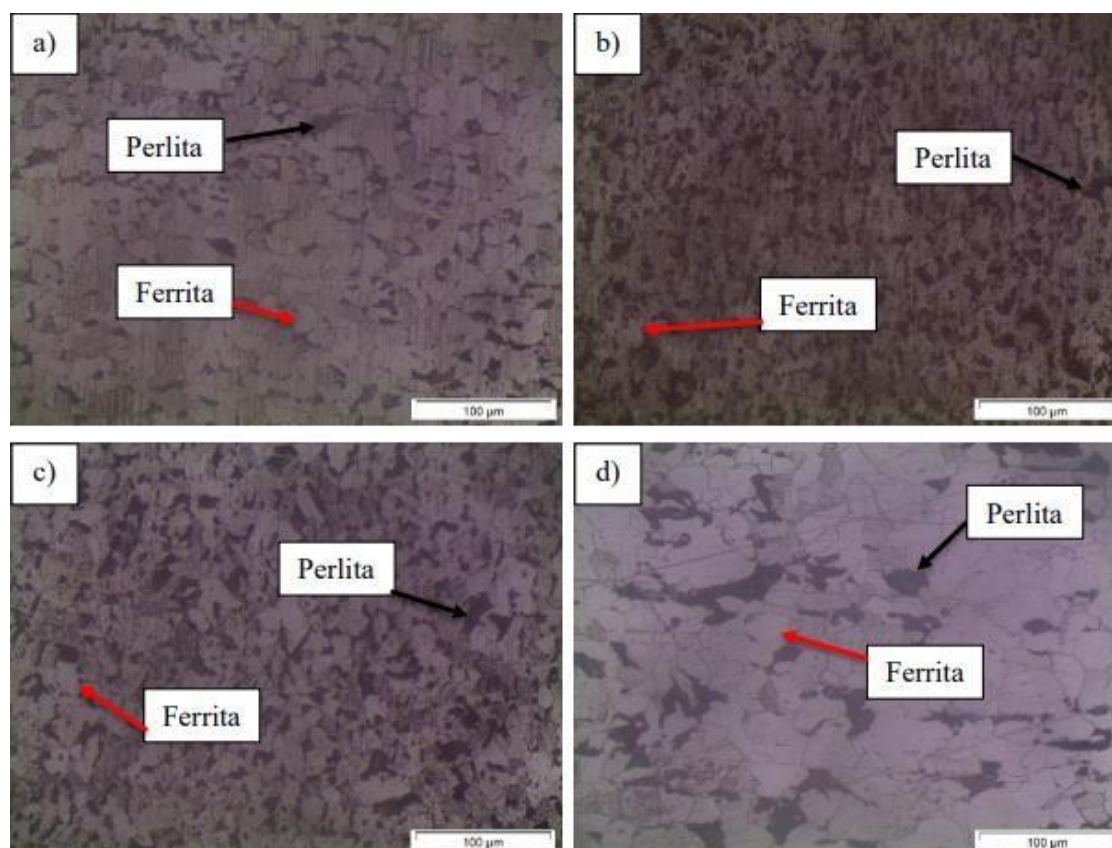


FIGURA 3. Micrografia, com aumento de 200x, a) encruada, b), c) e d) recozidas à 890°C por 1h, 2h e 3h respectivamente. Todas imagens transversais (Autoria Própria).

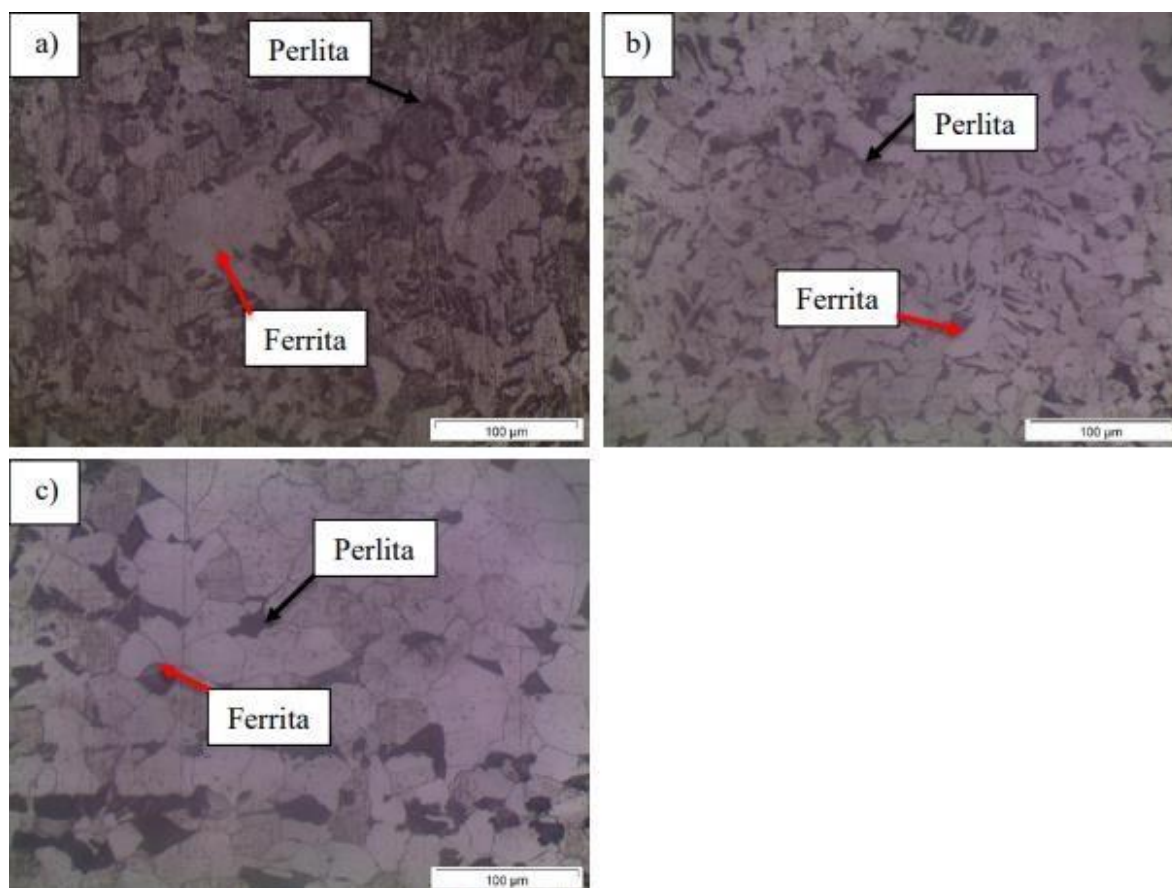


FIGURA 4. Micrografia com aumento de 200x a), b) e c) recozidas à 970°C por 1h, 2h e 3h. Todas imagens transversais (Autoria Própria).

Na Figura 3a a amostra encruada foi constatado um grão menor em relação às amostras as que passaram por tratamento térmico.

Na Figura 3b é possível visualizar que se iniciou o processo de recristalização, de modo que se deu o início da formação de um novo conjunto de grãos que tendem a serem equiaxiais, com a ferrita ligeiramente maior.

Na Figura 3c, na segunda hora o aço começou a sofrer o processo de crescimento de grãos, no qual os grãos de perlita crescem mais rapidamente. Já na Figura 3d, na terceira hora o processo de crescimento de grão continua formando um novo conjunto de grãos, com uma granulação grosseira, em virtude do demasiado tempo ao forno.

Já nas amostras que passaram pelo tratamento em 970°C, o processo foi o mesmo. Visivelmente pode-se observar na Figura 4c, grãos de perlita muito maior do que na Figura 4a e 4b, com tratamento de uma hora e duas, respectivamente.

#### 4.2. Ensaio de Impacto Charpy

A Tabela 3, mostra os valores das médias e desvio padrão de tenacidade ao impacto obtidas através do ensaio Charpy.

TABELA 3. Dados de energia de impacto e tamanho de grão do aço SAE 1020 (Autoria Própria).

Amostra	Energia de Impacto (J)
Encruado	44 ± 4,70
Recozido 1h – 890°C	58 ± 3,30
Recozido 2h – 890°C	60 ± 10,2
Recozido 3h – 890°C	77 ± 14,3
Recozido 1h – 970°C	73 ± 4,80
Recozido 2h – 970°C	67 ± 4,60
Recozido 3h – 970°C	52 ± 11,2

Observa-se, para situação de recozimento a 890°C por 1 (uma) hora, que ocorreu um aumento de tenacidade ao impacto em relação a amostra encruada. Quanto mais acima da temperatura de austenitização e

mais tempo no tratamento, maior o tamanho de grão e alterações nas propriedades mecânicas.

Nas amostras de 970°C fica claro o decréscimo de tenacidade sofrido pela amostra, proveniente do grão muito crescido, conseqüentemente com menor número de contornos de grão que agem como barreiras para propagação da trinca, tornando o material mais suscetível a trincas intergranular que se propagam por contornos de grão.

Na Figura 4, tem-se o gráfico de tenacidade ao impacto em barra para cada condição. O gráfico de barra foi construído com os valores de energia ao impacto de cada condição. Cada barra do gráfico apresenta os valores máximos e mínimos e os quartis um, dois e três.

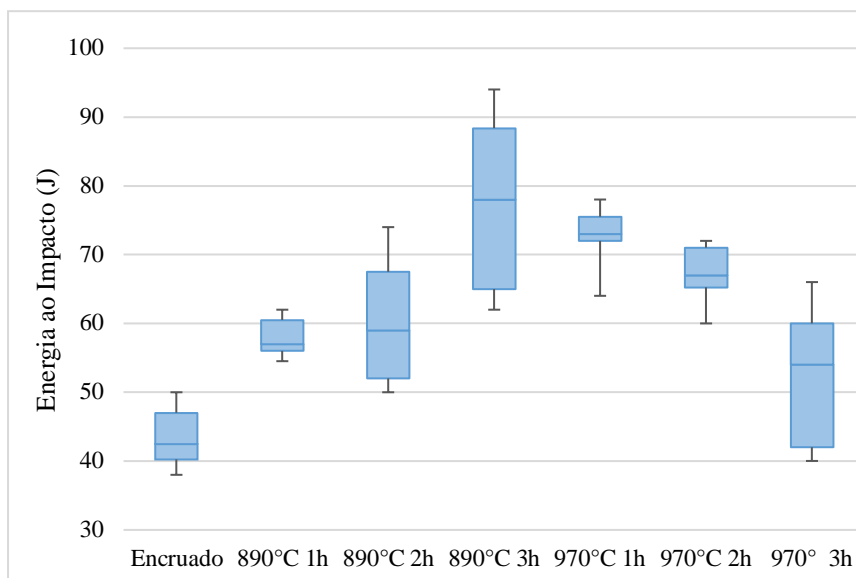


FIGURA 5. Gráfico com quartis 1, 2 e 3 com valores máximos e mínimos da tenacidade ao impacto das amostras: encruada e recozidas a 890°C e 970°C em tempos de uma, duas e três horas (Autoria Própria).

Foi realizado o teste t de student unicaudal para um p-valor de 0,05 entre todas as amostras. É possível afirmar que existe uma diferença entre a amostra encruada em relação a recozida 1h a 890°C. A amostra recozida 1h à 890°C em relação a recozida 2h a 890°C apresentou igualdade entre os dois grupos. A amostra recozida 2h à 890°C em relação a 3h 890°C apresentou diferença entre os grupos. Para a amostra recozida por 3h a 890°C em relação às amostras recozidas por 1h e 2h à 970°C o teste revelou uma igualdade entre os dois grupos. Já para recozida em 1h à 970°C em relação às amostras de 2h e 3h à 970°C é possível dizer com 95% de confiança que os dados são diferentes.

Pode ser observada o modo da fratura pelas Figura 5 e Figura 6.

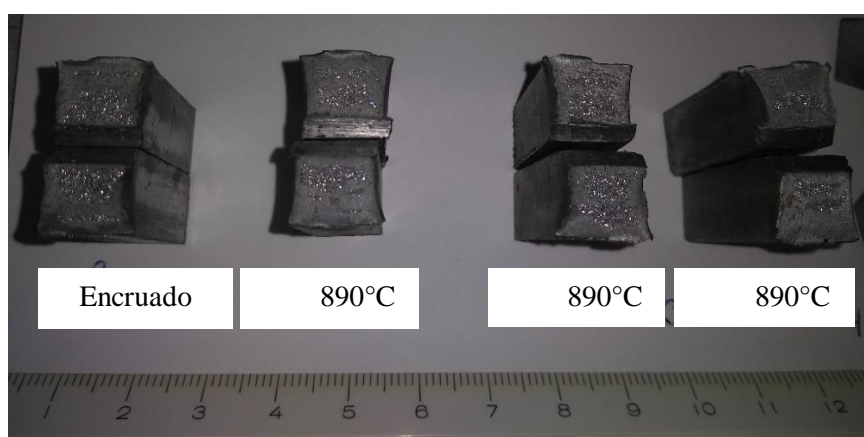


FIGURA 6. Seções fraturadas dos corpos de prova para cada condição (Autoria Própria).



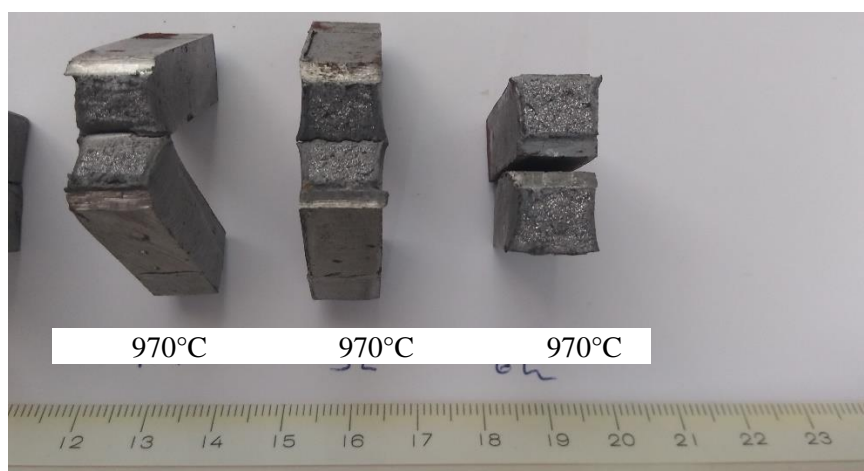


FIGURA 7. Seções fraturadas dos corpos de prova para cada condição (Autoria Própria).

Na Figura 5 e 6 é possível avaliar as seções fraturadas de cada condição ensaiada. A amostra encruada apresenta uma superfície lisa e brilhante, características de uma fratura frágil. As recozidas a 890°C 1h começam a apresentar algumas deformações na borda da superfície, juntamente com superfície mais opaca nas bordas. Já as recozidas 890°C 2h ainda apresentam uma superfície brilhante característica de fratura frágil com deformações na borda. As recozidas 890°C 3h resfriadas ao forno, apresentam uma predominância de superfície opaca, característica de uma fratura dúctil. [18]

Nas amostras recozidas a 970°C 1h e 2h, muitas delas não chegaram a romper completamente, e apresentam uma superfície brilhosa ao centro e opaca nas bordas, caracterizando uma fratura dúctil-frágil. Já a amostra, recozida à 970°C 3h e resfriada ao forno, tem predominância de superfície brilhosa, característica de fratura frágil. [15]

Os resultados se mostram de acordo com a literatura para a primeira condição, provavelmente ocorreu a recristalização e em seguida o crescimento de grão, que não foi suficiente para comprometer a tenacidade ao impacto. Já na segunda condição, a temperatura mais elevada ocasionou um grão muito crescido que foi suficiente para comprometer a tenacidade ao impacto. [1]

As amostras da primeira condição se comportaram de maneira semelhante ao estudo [19], de forma que ocorreu aumento de tenacidade ao impacto com o aumento do tempo. Já as amostras da segunda condição se comportaram de maneira semelhante à observada em outro estudo [7], a tenacidade ao impacto se apresentou menor em função do grão muito crescido.

## 5. CONCLUSÃO

A amostra encruada na figura 3, é a que apresenta menor capacidade de absorver impacto, apresentando uma fratura frágil, caracterizada por ser reta e brilhante. A amostra encruada apresentou uma absorção de energia de 44J em média.

Os tratamentos térmicos de recozimento à 890°C durante uma, duas e três horas realizados nas amostras promoveram o crescimento do tamanho de grão, promovendo uma maior ductilidade para o material, ou seja, maior capacidade de sofrer deformação antes da ruptura. As amostras apresentaram uma absorção de energia de 58J, 60J e 77J em média, respectivamente.

As amostras recozidas a 890°C em uma e duas horas e três horas, apresentaram um aumento da ductilidade em relação a encruada. Pode-se observar uma pequena mudança na superfície da fratura, apresentando mais opacidade próxima às bordas.

A amostra recozida a 970°C em uma hora foi a que apresentou maior ductilidade entre todas nessa temperatura, pois provavelmente só passou pelo processo de recristalização e um leve crescimento de grão. Ao contrário das recozidas a 970°C em duas e três horas, que sofreram recristalização, mas sofreram com um crescimento de grão muito mais acentuado. Que foi responsável pela perda de tenacidade, proveniente do invólucro contínuo e frágil de carboneto. A absorção de energia ao impacto foi de 73J, 67J e 52J em média respectivamente.

Apesar das últimas amostras terem comprometido a tenacidade em relação a recozida a 970°C 1 hora, ainda assim, apresenta uma fratura muito mais dúctil em relação às outras. Fica claro a fratura dúctil, pois muitas amostras não sofreram a ruptura completa, e apresentam bastante deformação, juntamente com uma superfície mais opaca.

## REFERÊNCIAS

- [1] Callister Jr., William D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 8rd ed; LTC Editora, Brasil, 2012. 809 p.
- [2] BRUNA, Roberto Gerardo. *Effects of hot and warm rolling on microstructure, texture and properties of low carbon steel*. Metallurgy and materials, Minas, Ouro Preto, 2011.
- [3] N.K., Tewary. *Influence of cold rolling on microstructure, texture and mechanical properties of low carbon high Mn TWIP steel*. Materials Science & Engineering A, India, 2 ago. 2014.
- [4] RAHMAN, S.M. Mahbobur. *Effect of Heat Treatment on Low Carbon Steel: An Experimental Investigation*. Trans Tech Publications, Ltd, [s. l.], 2016.
- [5] PADILHA, Angelo F.; SILICIANO JR, Fulvio. *Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura*. 3rd ed. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Brasil, 2005.
- [6] FAILURE *Analysis and Prevention*. ASM - Metals Handbook, Ohio, v. 9, 1986.
- [7] PANDOLFO, DIOGO. *Estudo Da Tenacidade Ao Impacto De Um Aço Sae 1020 Submetido A Tratamentos Térmicos*. 2009. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, [S. l.], 2009.
- [8] DIETER, George E. et al. *Metalurgia Mecânica*. 2rd ed. Guanabara Koogan, Brasil, 2012.
- [9] ARCELORMITTAL. *Guia do Aço: Aços Longos*. [S. l.: s. n.], 2020. 136 p.
- [10] *Propriedades Mecânicas Dos Aços*. [S. l.], [2015]. Disponível em: <http://lgsteel.com.br/propriedades-mecanicas-do-carbono.htm>. Acesso em: 20 jun. 2022.
- [11] CHIAVERINI, Vicente. *Aços e Ferros fundidos*. 7rd ed. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Brasil, 1996.
- [12] SHACKELFORD, James F. *Ciência dos materiais*. 6rd ed. Pearson Education do Brasil, Brasil, 2008. 556 p.
- [13] BUTTON, Sergio. *Recozimento de Materiais Metálicos*. In: APOSTILA Button Unicamp. [S. l.: s. n.], [2010].
- [14] SILVA, André Luiz V. da Costa E.; MEI, Paulo R. *Aços e ligas especiais*. 4rd ed. Editora Blucher, Brasil 2021.
- [15] G A DA SILVA, Hugo; A R NETO, Eféisio; DI B ESTEVES, Paulo. *Caracterização de fraturas frágil e dúctil em microscopia eletrônica de varredura (MEV)*. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2017.
- [16] ASTM E23-02, *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002.
- [17] A.T., Koike; R.C, Tokimatsu; F.C., Nogueira; S. I., Irikura. *A INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA NA TENACIDADE À FRATURA DINÂMICA APARENTE DO AÇO ABNT 4340*. CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, 2006.
- [18] LOPES FERNANDES DE SOUZA, Thaís. *Análise comparativa da resistência à fratura dos aços SAE 1020 e SAE 4140*. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, [S. l.], 2017.
- [19] ALVES DE OLIVEIRA, Dyana; EDSON NOGUEIRA FRAGA, Francisco. *Influência Do Tempo De Recozimento Sobre A Recristalização E Tenacidade Ao Impacto De Um Aço Baixo Carbono*. Projeto de Graduação – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN, 2019.