

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

DANIELE BASTOS DE CASTRO

**ANÁLISE DO TAMANHO DE GRÃO PRÉVIO E DA DEFORMAÇÃO POR  
COMPRESSÃO NA RECRISTALIZAÇÃO DE UM AÇO DE BAIXO TEOR DE  
CARBONO**

BELO HORIZONTE

2015

DANIELE BASTOS DE CASTRO

**ANÁLISE DO TAMANHO DE GRÃO PRÉVIO E DA DEFORMAÇÃO POR  
COMPRESSÃO NA RECRISTALIZAÇÃO DE UM AÇO DE BAIXO TEOR DE  
CARBONO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Coorientador: Prof. Dr. Wellington Lopes

BELO HORIZONTE

2015

DANIELE BASTOS DE CASTRO

**ANÁLISE DO TAMANHO DE GRÃO PRÉVIO E DA DEFORMAÇÃO POR  
COMPRESSÃO NA RECRISTALIZAÇÃO DE UM AÇO DE BAIXO TEOR DE  
CARBONO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

---

Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa – Orientadora – CEFETMG

---

Prof. Dr. Wellington Lopes – Coorientador – CEFETMG

---

Profa. Ma. Aline Silva Magalhães – CEFETMG

---

Profa. Ma. Suzanny Cristina Soares Martins – Faculdade Pitágoras

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais, pelo incansável apoio e carinho.

Aos meus familiares, pelo incentivo.

Aos meus professores, pelos ensinamentos.

Aos meus colegas e amigos pelo apoio.

E a todos que me ajudaram até aqui na realização deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

A DEUS, por me tornar capaz de concretizar este trabalho.

Aos meus amados pais, pela infinita paciência, amor, compreensão e dedicação.

Aos meus professores, pelos ensinamentos valiosos.

À minha querida orientadora, professora e amiga, Dra. Elaine Carballo, pela paciência, carinho e atenção.

À todos os meus amigos e colegas, pelo incentivo e ajuda.

## **EPÍGRAFE**

“Os ideais que iluminaram o meu caminho são a bondade, a beleza e a verdade.”

Albert Einstein

## RESUMO

Nos projetos de engenharia, é de extrema importância a compreensão das características, propriedades e comportamento dos materiais sob determinadas condições de esforços. Os metais têm se tornado cada vez mais importantes na tecnologia moderna devido à facilidade com que podem ser conformados em diversas formas. As propriedades mecânicas dos materiais influenciam o emprego de técnicas de processamento, pois dependem de alguns fatores como o controle do encruamento, da temperatura, da taxa de deformação entre outras variáveis. Nesse contexto, os tratamentos térmicos são empregados para adequar as propriedades mecânicas de uma liga metálica deformada, à sua aplicação. Considerando esses aspectos, este trabalho investigou a influência do tamanho de grão e da realização de deformação plástica nos fenômenos de recristalização e crescimento de grão, que ocorrem em determinados tratamentos térmicos, no aço de baixo teor de carbono AISI 1020, o presente trabalho investigou tais parâmetros por meio de testes de microdureza Vickers, microscopia óptica e ensaio de compressão. Observou-se que, as diferentes magnitudes de deformação empregadas não influenciaram significativamente o tamanho de grão, mas esse tamanho foi maior quanto mais lento foi o resfriamento e/ou quanto maior foi o tempo de tratamento térmico, bem como a dureza reduziu.

**PALAVRAS CHAVE:** encruamento, dureza, tamanho de grão, tratamentos térmicos, aço de baixo teor de carbono.

## **ABSTRACT**

In engineering, it is extremely important to understand the characteristics, properties and behavior of materials under certain conditions efforts. Metals have become increasingly important in modern technology because of the ease with which they can be shaped in various ways. The mechanical properties of materials influence the use of processing techniques, because they depend on such factors as control of hardening, temperature, strain rate and other variables. In this context, the heat treatments are used to tailor the mechanical properties of a deformed metal alloy, to its application. In order to evaluate the influence of grain size and performing plastic deformation in recrystallization phenomena and grain growth occurring in certain thermal treatments at low AISI 1020 carbon steel, the present study investigated these parameters by means of Vickers hardness test, optical microscopy and compression testing. It was observed that the different magnitudes employed strain did not influence the grain size, but that size was greater the slower the cooling and / or the higher the heat treatment time and reduced hardness.

**KEYWORDS:** hardening, hardness, grain size, heat treatment, low carbon steel.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 - Efeito da deformação plástica na trefilação em um passe de barras de aço com baixo teor de carbono.</b> .....	16
<b>Figura 2 - Variação das propriedades mecânicas dos metais com a deformação a frio.</b> .....	16
<b>Figura 3 - Influência do trabalho a frio sobre o comportamento à tração de um aço com baixo teor de carbono.</b> .....	18
<b>Figura 4 - Exemplos de grão em dois aços de baixo teor de carbono.</b> .....	19
<b>Figura 5 - Exemplo da relação entre o diâmetro médio do grão e o limite de escoamento.</b> .....	20
<b>Figura 6 - Energia armazenada no encruamento e fração da energia total de deformação em função da deformação (tração) para o cobre puro.</b> .....	22
<b>Figura 7 - Recuperação, recristalização e crescimento de grão.</b> .....	23
<b>Figura 8 - Sequência do processo de recristalização nos grãos de um metal previamente encruamento.</b> .....	24
<b>Figura 9 - Efeito do recozimento sobre a estrutura do metal encruado.</b> .....	26
<b>Figura 10 - Desenho esquemático de como uma carga de compressão produz uma redução na altura e uma deformação linear negativa.</b> .....	29
<b>Figura 11 - Falha em material dúctil e em material frágil sob compressão.</b> .....	30
<b>Figura 12 - Flambagem devido ao desalinhamento das placas do equipamento de compressão.</b> 31	
<b>Figura 13 - Metodologia adotada no trabalho.</b> .....	32
<b>Figura 14 - Espectrômetro marca Oxford Instruments modelo Foundry-Master Xpert.</b> .....	34
<b>Figura 15 - Equipamentos empregados para os corte das amostras.</b> .....	34
<b>Figura 16 - Corpos de prova utilizados no trabalho.</b> .....	34
<b>Figura 17 - Forno elétrico marca Magnus utilizado nos tratamentos térmicos.</b> .....	36
<b>Figura 18 - áquina utilizada no ensaio de compressão.</b> .....	37
<b>Figura 19 - Sequência de experimentos relacionada aos corpos de prova comprimidos.</b> .....	38
<b>Figura 20 - Microscópio óptico marca Fortel utilizado para análise da microestrutura.</b> .....	38
<b>Figura 21 - Microdurômetro Vickers marca Shimadzu modelo HVM-2T.</b> .....	39
<b>Figura 22 - Microestrutura do aço AISI 1020 no estado inicial.</b> .....	41
<b>Figura 23 - Fotomicrografias do aço AISI 1020 após a realização do tratamento térmico - T = 920°C, t = 10 min, resfriamento ao ar.</b> .....	41
<b>Figura 24 - Fotomicrografias (MO) do aço AISI 1020 após a realização do tratamento térmico - T = 920°C, t = 30 min, resfriamento no forno.</b> .....	42
<b>Figura 25 - Fotomicrografias (MO) do aço AISI 1020 após a realização do tratamento térmico - T = 920°C, t = 2 h, resfriamento no forno.</b> .....	42
<b>Figura 26 - Fotomicrografias (MO) do aço AISI 1020 após a realização do tratamento térmico - T = 920°C, t = 4h, resfriamento no forno.</b> .....	43

<b>Figura 27 – Gráfico dos Valores de Dureza Vickers (HV) - tratamento inicial 10 min, resfriamento ar / compressão</b> .....	45
<b>Figura 28 - Gráfico dos Valores de Dureza Vickers (HV) - tratamento inicial 4 h, resfriamento forno / compressão.</b> .....	46
<b>Figura 29 - Gráfico com os valores de Dureza Vickers (HV) - tratamento inicial 10 min, resfriamento ar / compressão.</b> .....	47
<b>Figura 30 - Gráfico com os valores de Dureza Vickers (HV) - tratamento inicial 4 h, resfriamento forno / compressão.</b> .....	48
<b>Figura 31 - Tratamento inicial 10 min, resfriamento ar / compressão / tratamento após compressão 2 min, resfriamento ar.</b> .....	49
<b>Figura 32 - Tratamento inicial 10 min, resfriamento ar / compressão / tratamento após compressão 5 min, resfriamento ar.</b> .....	50
<b>Figura 33 - Tratamento inicial 10 min, resfriamento ar / compressão / tratamento após compressão 10 min, resfriamento ar.</b> .....	51
<b>Figura 34 - Tratamento inicial 10 min, resfriamento ar / compressão / tratamento após compressão 30 min, resfriamento ar.</b> .....	52
<b>Figura 35 - Tratamento inicial 4 h, resfriamento forno / compressão / tratamento após compressão 2 min, resfriamento ar.</b> .....	53
<b>Figura 36 - Tratamento inicial 4 h, resfriamento forno / compressão / tratamento após compressão 5 min, resfriamento ar.</b> .....	54
<b>Figura 37 - Tratamento inicial 4 h, resfriamento forno / compressão / tratamento após compressão 10 min, resfriamento ar.</b> .....	55
<b>Figura 38 - Tratamento inicial 4 h, resfriamento forno / compressão / tratamento após compressão 30 min, resfriamento ar.</b> .....	56

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 - Condições informadas nas referências bibliográficas sobre o aço AISI 1020.....</b>	<b>33</b>
<b>Tabela 2 - Condições dos tratamentos térmicos consideradas no trabalho .....</b>	<b>35</b>
<b>Tabela 3 - Condições dos tratamentos térmicos empregadas para análise dos fenômenos de recristalização e crescimento.....</b>	<b>36</b>
<b>Tabela 4 - Análise química do material.....</b>	<b>40</b>
<b>Tabela 5 - Dureza do aço AISI 1020 no estado inicial.....</b>	<b>40</b>
<b>Tabela 6 - Tamanho de grão obtidos após tratamentos térmicos .....</b>	<b>44</b>
<b>Tabela 7 - Resultados microdureza Vickers .....</b>	<b>44</b>
<b>Tabela 8 - Valores de Dureza Vickers (HV) - tratamento inicial 10 min, resfriamento ar / compressão.....</b>	<b>45</b>
<b>Tabela 9 - Valores de Dureza Vickers (HV) - tratamento inicial 4 h, resfriamento forno / compressão.....</b>	<b>46</b>
<b>Tabela 10 Valores de Dureza Vickers (HV) - tratamento inicial 10 min, resfriamento ar / compressão.....</b>	<b>47</b>
<b>Tabela 11 - Valores de Dureza Vickers (HV) - tratamento inicial 4 h, resfriamento forno / compressão.....</b>	<b>48</b>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	14
	<b>2.1</b> Objetivo Geral .....	14
	<b>2.2</b> Objetivos Específicos.....	14
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
	<b>3.1</b> Encruamento de Materiais Metálicos.....	15
	<b>3.2.</b> Recristalização e Crescimento de Grão.....	22
	<b>3.3</b> Ensaio de Compressão .....	27
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	32
	<b>4.1</b> Descrição do Trabalho.....	32
	<b>4.2</b> Material.....	33
	<b>4.3</b> Corpos de Prova .....	33
	<b>4.3</b> Tratamentos Térmicos.....	35
	<b>4.4</b> Ensaio de Compressão .....	36
	<b>4.5</b> Análise da Microestrutura.....	37
	<b>4.6</b> Microdureza.....	39
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	40
	<b>5.1</b> Caracterização do Material no Estado Inicial.....	40
	<b>5.2</b> Efeito do Tratamento Térmico na Microestrutura e na Microdureza .....	41
	<b>5.3</b> Efeito do Deformação por Compressão na Dureza do Material.....	45
	<b>5.4</b> Efeito da Deformação na Recristalização e no Crescimento de Grão .....	46
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	58
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	59

## 1 INTRODUÇÃO

A análise das propriedades finais dos metais submetidos a processos diversos e o conhecimento de suas características é uma área importante da indústria pois facilita o desenvolvimento em geral e permite a compreensão mais detalhada dos princípios que governam o comportamento dos materiais. No entanto, a aplicação de um material metálico requer processamentos específicos. É comum o uso de mecanismos de deformação plástica seguidos de tratamentos térmicos para adequar as propriedades de uma liga à sua aplicação. (DIETER, 1981).

Em qualquer projeto de engenharia, é de fundamental importância a compreensão das características, propriedades e comportamento dos materiais sob determinadas condições de esforços. Conhecer as propriedades mecânicas e entender o que elas representam é bastante relevante para que os engenheiros escolham corretamente o material a ser utilizado nos projetos, de modo que a deformação e falhas sejam aceitáveis caso ocorram, e também para evitar o encarecimento do produto devido à um superdimensionamento de componentes (SOUZA, 1982).

Em princípio, um material cristalino pode deformar-se plasticamente por quatro mecanismos: deslizamento de planos cristalinos causado pela movimentação de discordâncias, maclação mecânica, difusão e por transformações de fase. Dentre estes quatro mecanismos, o deslizamento ou escorregamento de planos cristalinos é muito mais significativo que os três outros mencionados. Sendo assim, a deformação é um dos mecanismos mais utilizados para o endurecimento dos aços (PADILHA, 1997).

O aço é uma liga ferrosa com diferentes composições químicas e propriedades, sendo sua alta capacidade de deformação plástica uma de suas principais características. Contém basicamente ferro, carbono até aproximadamente 2% e outros elementos. Combinando a diversidade das ligas às excelentes propriedades exibidas por esse material e à sua facilidade de manipulação através de operações diversas, é possível obter aços com alto grau de desempenho. Logo, esses materiais encontram grande aplicação na indústria, desde a construção civil e até a indústria automobilística (SILVA, MEI, 2010).

Os aços de baixo teor de carbono constituem cerca de 90% da produção total desse material e contêm até cerca de 0,25% de carbono. Em geral não são tratados termicamente, sendo assim, o aumento da resistência mecânica é obtido através de processamentos mecânicos (COUTINHO, 1992). Um dos aços de baixo carbono mais comum é o aço 1020. Sua

composição contém entre 0,18% a 0,23% de carbono e 0,30% a 0,60% de manganês. São considerados macios e maleáveis e o processamento é considerado facilitado em relação aos aços com altos teores de elementos de liga (COLPAERT, 2008).

A importância dos metais na tecnologia moderna deve-se à facilidade com que podem ser conformados em diversas formas, e as propriedades mecânicas dos materiais influenciam na utilidade dessas técnicas. Essas propriedades dependem do controle do encruamento, temperatura, taxa de deformação entre outras variáveis durante o processamento. Dessa forma, os tratamentos térmicos são utilizados para adequar as propriedades mecânicas de uma liga metálica, previamente deformada, à sua aplicação (CHIAVERINI, 2012).

Nesse contexto, no presente trabalho foi avaliada a influência do tamanho de grão e da realização de deformação plástica nos fenômenos de recristalização e crescimento de grão, que ocorrem em determinados tratamentos térmicos, no aço de baixo teor de carbono AISI 1020.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Analisar os efeitos do tamanho de grão e da realização de deformação plástica nos fenômenos de recristalização e crescimento de grão do aço de baixo teor de carbono AISI 1020.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos do trabalho são listados a seguir.

- a) Caracterizar a microestrutura e a dureza do material no estado inicial.
- b) Avaliar o efeito dos parâmetros de tratamentos térmicos no tamanho de grão e na dureza do aço AISI 1020.
- c) Verificar o efeito da magnitude da deformação plástica conduzida por meio de ensaios de compressão na dureza do material com tamanho de grão distintos.
- d) Analisar os fenômenos de recristalização e crescimento de grão após compressão em amostras com tamanhos de grão prévios distintos.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Encruamento de Materiais Metálicos

O estudo do comportamento mecânico dos metais em geral compreende a análise da deformação elástica, deformação plástica e fratura. Dessa forma, é importante conhecer os aspectos físicos que caracterizam o material antes e durante as operações de conformação mecânica para relacionar com a resposta dada por esse material aos esforços aplicados (DIETER, 1981).

A deformação plástica, tema de interesse no presente estudo, pode ocorrer por meio de distintos mecanismos, como maclação, deslizamento de planos atômicos e escorregamento em contornos de grão. Dentre esses mecanismos, destaca-se o deslizamento de planos atômicos, na verdade movimentação de discordâncias por deslizamento de planos atômicos, apontado como o principal modo de deformação permanente nos materiais metálicos (DIETER, 1981).

Associado ao conceito anterior, aparece o chamado encruamento, que pode ser definido de maneira simplificada como o aumento da resistência mecânica do material metálico com a realização da deformação plástica. Essa elevação na resistência mecânica é usualmente explicada pela diminuição da capacidade de movimentação das discordâncias, que se multiplicam e interagem entre si ou com outras barreiras, imperfeições e campos de tensões internos. Essas interações são obstáculos ao movimento, levando à uma redução na mobilidade desses defeitos bidimensionais. Sendo assim, é necessária uma tensão maior para provocar maior deformação plástica, isto é, para realizar o movimento da discordância (SOUZA, 1982; MEYERS; CHAWLA, 1982). Na Figura 1 é mostrado um exemplo do efeito da deformação plástica a frio por trefilação em um passe de barras de aço de baixo teor de carbono, por meio da comparação da distribuição das discordâncias no material não deformado e após a deformação (AGUILAR et al., 2006).

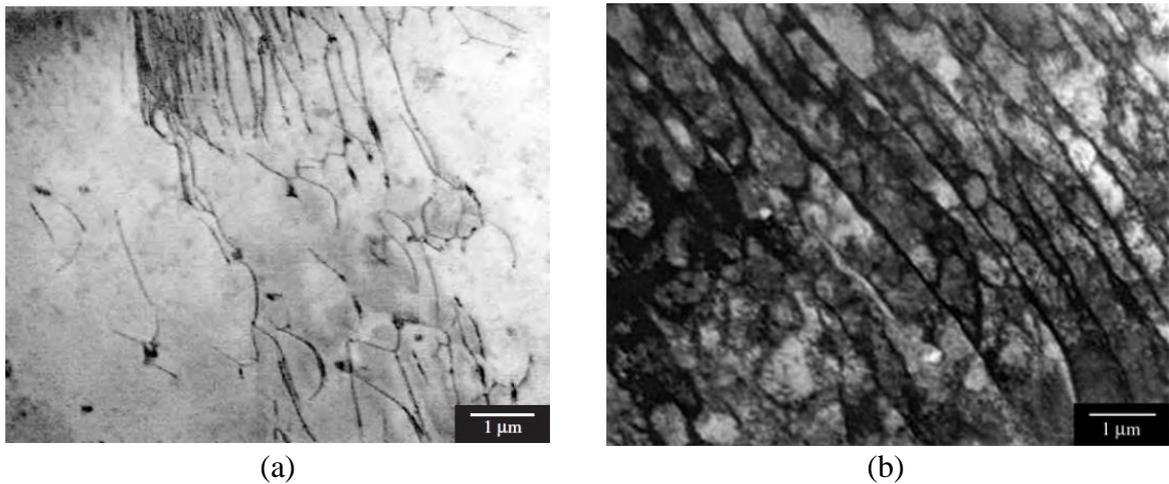
As alterações produzidas pela deformação plástica/encruamento se referem principalmente às propriedades mecânicas do material. A Figura 2 apresenta a variação das propriedades mecânicas dos metais com a deformação a frio (SILVA; MEI, 2010).

O fenômeno do encruamento para um metal é influenciado por diversos fatores como, por exemplo (BRESCIANI et al., 2011):

- estrutura cristalina do metal
- pureza do metal

- natureza química do metal
- orientação do cristal metálico
- forma e dimensão do cristal
- temperatura no processo de deformação
- condições superficiais do cristal metálico (BRESCIANI *et al.*, 2011).

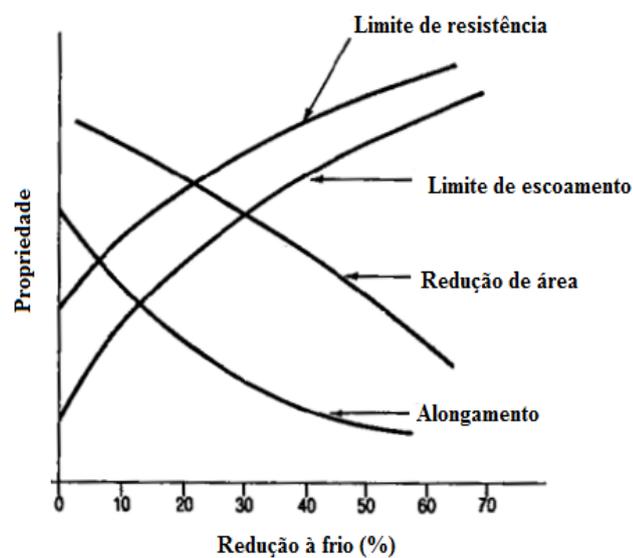
**Figura 1 - Efeito da deformação plástica na trefilação em um passe de barras de aço com baixo teor de carbono.**



(a) material não deformado e (b) material trefilado em um passe.

Fonte: AGUILAR *et al.*, 2006.

**Figura 2 - Variação das propriedades mecânicas dos metais com a deformação a frio.**



Fonte: SILVA, MEI, 2010.

A deformação plástica dos metais pode levar a alterações significativas em suas propriedades, sendo de grande importância a compreensão dos aspectos que caracterizam esse material para assimilar e justificar sua utilização em determinados processos e aplicações. As propriedades mecânicas são as principais características do material alteradas pelo trabalho a frio. Considerando um ensaio de tração, por exemplo, verifica-se que um metal mais encruado apresenta maiores limites de escoamento e de resistência e menor alongamento e estricção, ou seja, a medida que o material é deformado, sua resistência mecânica aumenta e sua ductilidade é reduzida (SILVA; MEI, 2010). As propriedades físicas, como a densidade e a condutibilidade elétrica, também podem sofrer alterações com o encruamento, diminuindo a medida que o este aumenta. (SILVA; MEI, 2010). A resistência à corrosão do metal deformado plasticamente a frio também é alterada e a energia interna acumulada pelo encruamento do metal reduz sua resistência à corrosão (BRESCIANI et al., 2011). Por fim, além de ser uma consequência da deformação plástica, o encruamento é ainda empregado como um processo industrial importante e muito utilizado para endurecer ligas metálicas, especialmente aqueles que ou não são sensíveis à realização de tratamentos térmicos ou seus efeitos não são tão significativos (DIETER, 1981).

Em determinadas situações, ao invés de expressar como deformação, o grau de deformação plástica é dado em porcentagem do trabalho a frio, que mostra a dependência em relação as áreas das seções transversais original e deformada. A fórmula é representada na Equação 1 a seguir (CALLISTER, 2008):

$$\% TF = \left( \frac{A_o - A_d}{A_o} \right) \times 100 \quad 1$$

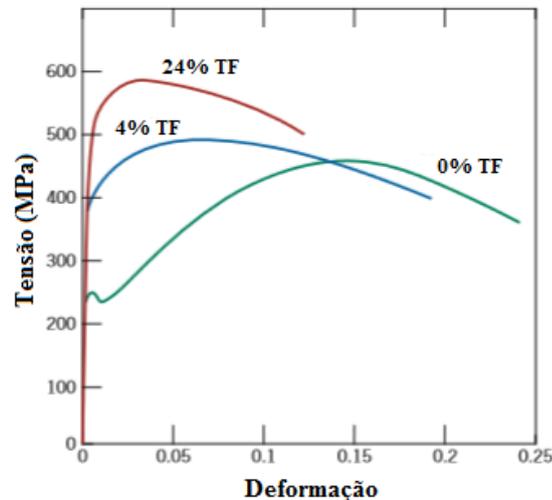
Onde:  $A_o$  é a área inicial da seção transversal sob deformação e  $A_d$  é a área após a deformação.

Na Figura 3 pode ser observada a influência do % de trabalho a frio sobre o comportamento à tração de um aço com baixo teor de carbono (CALLISTER, 2008). Verifica-se que tanto com a realização da deformação plástica a frio como com o aumento da quantidade, os níveis de resistência mecânica são elevados e a ductilidade do material é reduzida.

Considerando ainda a análise do comportamento de um material metálico por meio de curvas tensão-deformação obtidas em ensaios de tração, uma das maneiras para avaliar a habilidade desse material de elevar a sua resistência mecânica com a deformação é por meio da chamada taxa de encruamento. A taxa de encruamento é definida como a inclinação da curva

tensão-deformação na região correspondente à deformação uniforme, sendo uma característica que permite indicar o quanto o material aumenta sua resistência por meio da deformação plástica (GAMA, 2003).

**Figura 3 - Influência do trabalho a frio sobre o comportamento à tração de um aço com baixo teor de carbono.**



Fonte: CALLISTER, 2008.

O grau de encruamento de um metal determina a forma da zona plástica na curva tensão-deformação. Enquanto na zona elástica cada igual acréscimo de tensão produz um aumento igual na deformação, na zona plástica isso não ocorre. Nesta região, para um mesmo aumento de deformação, são necessários aumentos diferentes de tensão (SOUZA, 1982).

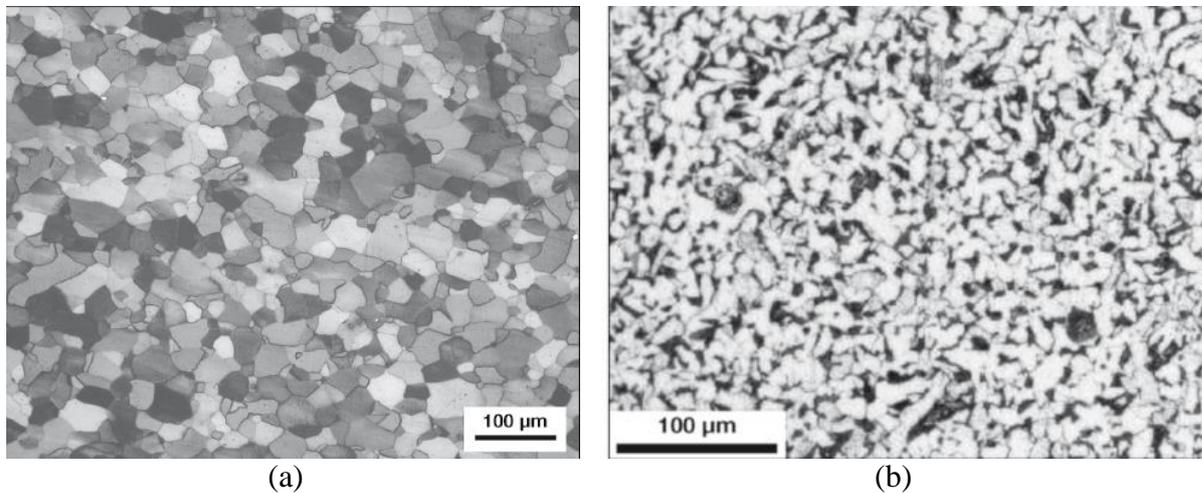
Em relação aos aspectos internos associados ao encruamento, sabe-se que um metal não deformado plasticamente possui de  $10^6$  a  $10^8$  discordâncias por centímetro quadrado, enquanto um material com um nível de deformação plástica considerado elevado contém cerca de  $10^{12}$  discordâncias na mesma área. Como o encruamento em geral pode ser explicado pela interação das discordâncias com outras discordâncias e outras barreiras, nota-se que a interferência das discordâncias ocorre muitas vezes em função de sua maior quantidade e de um número maior de planos de escorregamento atuando, portanto o processo requer mais energia para que elas vençam as barreiras e possam se movimentar com maior liberdade (REED HILL, 1982).

Determinar como a densidade e a distribuição das discordâncias variam com a deformação plástica é um desafio em relação ao fenômeno do encruamento. A tensão é uma função de ponto enquanto a deformação é uma função de caminho da posição da discordância, portanto a presença ou ausência de discordâncias e suas distribuições não podem servir de

referência sobre a quantidade de deformação acumulada no cristal. A densidade e a distribuição das discordâncias são sensíveis à estrutura do cristal, à temperatura e à taxa de deformação. Dessa forma, diversos modelos e teorias foram construídos para tentar compreender os aspectos que envolvem o encruamento (MEYERS; CHAWLA, 1982).

Além da densidade e distribuição das discordâncias, outro parâmetro muito importante em relação ao comportamento mecânico do material metálico e, portanto, ao encruamento, é o tamanho de grão. Grão pode ser definido como uma porção uniforme do material que cresceu a partir de um determinado núcleo segundo uma orientação cristalográfica específica. Na Figura 4 são mostrados exemplos de microestrutura com grãos e contornos de grão de dois aços de baixo teor de carbono (COLPAERT, 2008). A presença de grão no material metálico (umas das suas principais características é ser policristalino) irá afetar significativamente suas propriedades. Em geral, considera-se que quanto mais fina for a granulação de um material (menor tamanho de grão), maiores serão a resistência mecânica e a tenacidade e menor a ductilidade (REED-HILL, 1982; CALLISTER, 2008).

**Figura 4 - Exemplos de grão em dois aços de baixo teor de carbono.**



(a) aço livre de intersticiais e (b) aço AISI 1010.

Fonte: COLPAERT, 2008.

Diversas análises e abordagens foram propostas para avaliar os efeitos dos grãos (e contornos de grão) nos materiais metálicos, sendo a mais proeminente a clássica equação de Hall-Petch, que associa o tamanho médio do grão, colocando como parâmetro o diâmetro, ao limite de escoamento dos metais (MEYERS; CHAWLA, 1982; DIETER, 1981). Na Equação

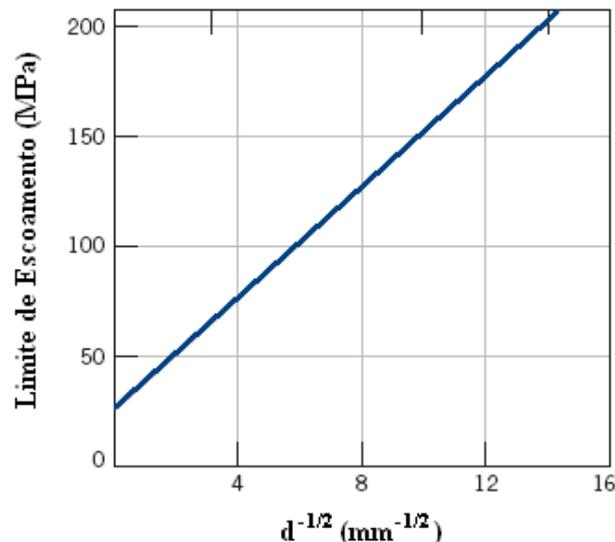
2 essa expressão é apresentada e na Figura 5 são mostrados exemplos dessa relação (CALLISTER, 2002).

Apesar da aparente simplicidade dessa relação, trata-se de uma aproximação e diversos fatores devem ser observados. Um deles, por exemplo, é que a presença dos grãos adjacentes em um determinado grão no metal causa restrições à deformação imposta pela questão da continuidade, fazendo com que as deformações entre as vizinhanças dos grãos e o interior sejam distintas e a dureza, por fim, seja mais elevada, uma vez que mais sistemas de deslizamento irão operar durante o processamento (DIETER, 1988; HOSFORD, 2005; MEYERS; CHAWLA, 1982). Outro aspecto a ser observado é se os contornos de grão atuam apenas como barreiras à movimentação das discordâncias, considerado o principal mecanismo de deformação plástica dos metais, ou ainda aparecem como fontes de multiplicação das discordâncias, promovendo um maior encruamento, ambos modelos associados ao estudo clássico do comportamento mecânico dos metais (PANDE et al., 2004).

$$T_e = T_o + K d^{-1/2} \quad 2$$

Onde:  $T_e$  é o limite de escoamento,  $d$  é o diâmetro médio do grão e  $T_o$  e  $K$  são constantes.

**Figura 5 - Exemplo da relação entre o diâmetro médio do grão e o limite de escoamento.**



Fonte: CALLISTER, 2008.

Dentro do âmbito de deformação plástica e encruamento, pode-se dizer que a microestrutura se altera com o trabalho a frio: os grãos se alongam e adquirem uma orientação cristalográfica preferencial de acordo com a direção do processo de deformação. Essa

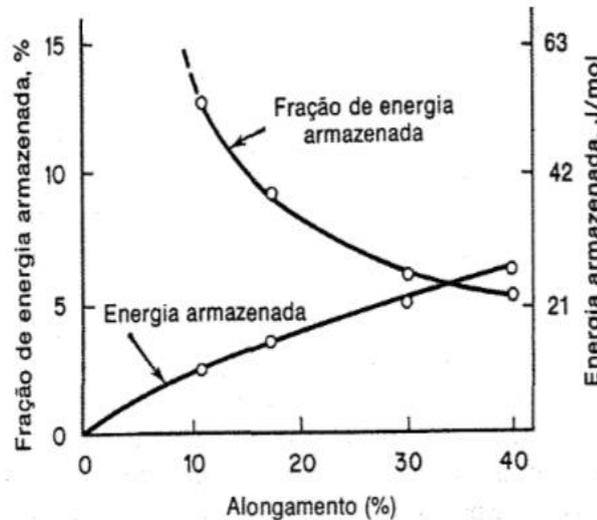
microestrutura é alterada pela deformação plástica, e pelos tratamentos térmicos posteriores (BRESCIANI et al., 2011). Além do alongamento, a deformação plástica promove no material o desenvolvimento de subestruturas internas aos contornos de grão antes inexistentes. Os metais tendem a desenvolver estruturas de discordâncias de baixa energia, que alternam regiões de alta densidade de discordâncias (parede das células de discordâncias) e regiões de baixa densidade de discordâncias (interior das células discordâncias e subgrãos). Contornos de grão também podem ser formados pelo movimento das discordâncias, que interagem entre si aleatoriamente, compartilhando os mesmos sistemas de deslizamento e formam um emaranhado (ESPOSITO, 2006).

Em um policristal, os cristais estão orientados em relação a força externa aplicada de maneiras diferentes dos grãos vizinhos adjacentes, os quais estão separados pelo contorno de grão. Assim, cada cristal apresentará diferentes direções, caracterizando a anisotropia. A influência dos cristais adjacentes em cada cristal depende do tipo de contorno de grão e da habilidade deles em barrar o movimento de discordâncias. A resistência de um contorno depende do seu ângulo de orientação e da densidade de discordâncias nos contornos. Entretanto, a deformação não cessa quando alcança um contorno de grão pois este é um local de intensa deformação. Em geral, grãos de tamanho maior apresentam maior gradiente de deformação e grãos de tamanho menor são deformados mais homoganeamente, de modo que apresentam gradiente de deformação menor. Dessa forma, materiais que apresentam uma granulometria mais fina, suportam deformação a frio mais intensa do que materiais de granulometria grosseira (LIMA, 2002).

Em adição às alterações na subestrutura e na microestrutura do material com a deformação plástica, observa-se outro fenômeno que irá afetar eventuais tratamentos térmicos subsequentes no material encruado. Em processos de conformação mecânica a frio, como a laminação e a trefilação, ocorre a geração de energia de maneira concomitante com a deformação. Essa energia está relacionada com o surgimento e interação de discordâncias, uma vez que o número destas aumenta com a elevação da intensidade de deformação plástica (REED-HILL, 1982). A maior parte da energia despendida é dissipada na forma calor, e a parte restante é armazenada no reticulado, contribuindo para a elevação do nível de energia interna. A energia armazenada pelo cristal deformado pode se dar na forma de lacunas, de maclas e de falhas de empilhamento e está associada aos defeitos cristalinos, dependendo de fatores tais como a estrutura cristalina, temperatura, quantidade, velocidade de deformação e pureza do metal (BRESCIANI et al., 2011). Na Figura 6 é apresentada, como exemplo, a fração de energia

armazenada em função da deformação (alongamento) na tração de amostras de cobre puro (REED-HILL, 1982).

**Figura 6 - Energia armazenada no encruamento e fração da energia total de deformação em função da deformação (tração) para o cobre puro**



Fonte: REED HILL, 1982.

### 3.2. Recristalização e Crescimento de Grão

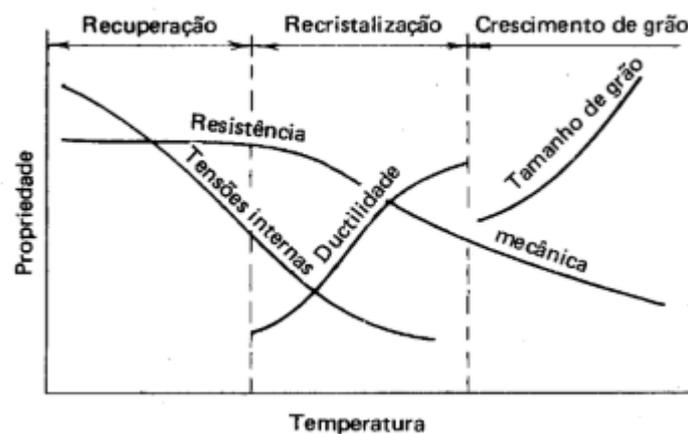
Apesar da estrutura de discordâncias do material trabalhado a frio ser mecanicamente estável, ela não é termodinamicamente estável, uma vez que com o aumento da temperatura, o estado trabalhado a frio torna-se cada vez mais instável. Eventualmente, o metal se recupera e reverte-se para uma condição livre de deformação, em um processo conhecido como recozimento, que restaura a ductilidade de um metal que tenha sido severamente encruado. Assim, através da realização de recozimento após grandes deformações, consegue-se obter novamente elevadas porcentagens de deformação para a maioria dos metais (DIETER, 1981).

Como comentado anteriormente, os cristais que sofrem a deformação plástica têm mais energia que os cristais não deformados, pois possuem muitas discordâncias e imperfeições. Portanto os átomos desses cristais tendem a se recomodar de forma a se obter um arranjo perfeito e não deformado. Tal fato ocorre quando o material é submetido a temperaturas elevadas, através do recozimento, que provoca mudanças microestruturais de maneira a reduzir a energia armazenada na deformação. Essa redução ocorre por mecanismos de rearranjo e eliminação de defeitos cristalinos (VAN VLACK, 1984). As principais mudanças microestruturais que ocorrem durante o recozimento são a diminuição dos defeitos puntiformes

devido à reação entre eles, eliminação de discordâncias de sinais opostos e redução da área total de contorno de grão (PADILHA, SICILIANO 1996).

Segundo Chiaverini (1986), as propriedades e estrutura do metal que sofrem alterações pelo trabalho a frio podem ser recuperadas ou devolvidas ao estado anterior ao encruamento mediante um tratamento que envolva recristalização e crescimento de grão, o que ocorre em um recozimento. A medida que se aumenta a temperatura, o estado encruado se torna mais instável, de modo que, a condição de elevada energia interna tende a desaparecer e o metal volta à condição de livre energia, resultando em uma queda de dureza (amaciamento) e isenção contínua de tensões internas. O processo de recozimento compreende três etapas principais: recuperação, recristalização e crescimento de grão. Na Figura 7 são representadas essas três etapas.

**Figura 7 - Recuperação, recristalização e crescimento de grão.**



Fonte: CHIAVERINI, 1986

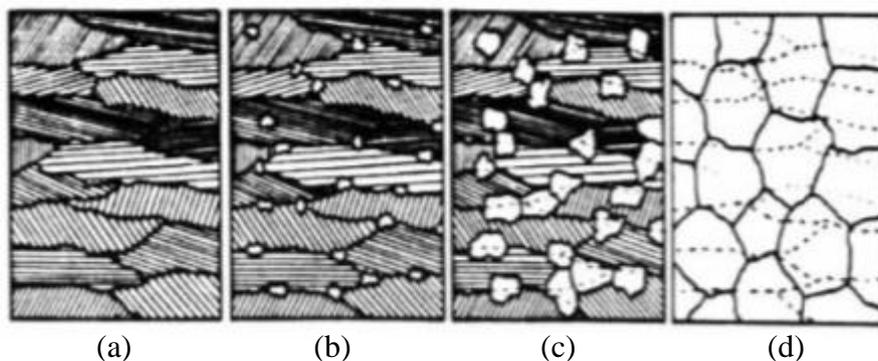
A recuperação é um fenômeno caracterizado pela reorganização das imperfeições bidimensionais, ou seja, das discordâncias em posições de menor energia por meio do processo de poligonização. Não leva à alterações significativas nas propriedades mecânicas do material metálicos porem promove a ocorrência de alívio de tensões. É o primeiro estágio e ocorre a temperaturas baixas (REED HILL, 1982).

A recristalização é uma etapa que ocorre imediatamente após a recuperação, a temperaturas mais elevadas e, por esse motivo, as variações na microestrutura do material e nas propriedades mecânicas como dureza e ductilidade são aparentes (GAMA, 2003). Na recuperação, não há uma mudança microestrutural acentuada, é possível notar apenas um

pequeno rearranjo nas discordâncias para configurações mais estáveis. Já na recristalização, a densidade de discordâncias decresce e a dureza e as propriedades relacionadas com a resistência mecânica caem rapidamente. Há uma eliminação de todas as tensões e a estrutura é reconstituída, ou seja, recristalizada (CHIAVERINI, 1986).

Após a recuperação, os grãos ainda se apresentam em um estado de energia de deformação considerado elevado. A recristalização é o processo de formação de um novo conjunto de grãos livres de deformação e que são equiaxiais. Essa nova estrutura é produzida pela diferença que existe entre as energias internas do material submetido a deformação e do material sem deformação. Os novos grãos se formam a partir de núcleos muito pequenos e crescem em um processo que envolve difusão em pequena escala, etapa conhecida como crescimento de grão (CALLISTER, 2008). O encruamento, o tamanho de grão e a pureza do metal influenciam de modo significativo essa etapa. Na figura 8 é mostrada a seqüência do processo de recristalização nos grãos de um metal previamente encruamento (PADILHA, SICILIANO, 1996).

**Figura 8 - Sequência do processo de recristalização nos grãos de um metal previamente encruamento.**



(a) material encruado, (b) nucleação, (c) e (d) crescimento de novos grãos

Fonte: Padilha, Siciliano (1996).

O fenômeno da recristalização é de grande interesse comercial por sua capacidade de restaurar as propriedades dos metais em muitas aplicações nos processos de fabricação por deformação plástica. O processo é termicamente ativado e dependente do tempo, e está associado ao movimento de discordâncias, de modo que ocorre a formação de uma região livre de defeitos. As altas temperaturas proporcionam às discordâncias mecanismos de rearranjo, de

modo que estas adquirem maior mobilidade e sejam capazes de migrar rapidamente sobre a matriz encruada, proporcionando uma região livre de deformação (GAMA, 2003).

Segundo Padilha e Siliciano (1996), o comportamento de uma liga metálica durante o processo de recristalização muitas vezes é determinado em termos da chamada “temperatura de recristalização”, que é a temperatura na qual há uma grande redução na dureza. Como a recristalização forma cristais mais macios, os valores de dureza podem ser considerados índices de medida da recristalização. Durante o processo de recristalização nos materiais, há um rearranjo ou difusão de átomos, portanto a temperatura que ocorre a recristalização depende das forças que mantêm os átomos unidos.

A recristalização ocorre em temperaturas mais elevadas e tempos mais longos do que no processo de recuperação, embora possa haver em determinadas condições a coexistência de ambos os processos. A recristalização é função do tempo e da temperatura, tornando-se mais intensa e mais rápida com o aumento dessas duas variáveis, embora possa sofrer interferência de outros fenômenos, como, por exemplo, a solubilização e a precipitação de fases secundárias (REED HILL, 1982).

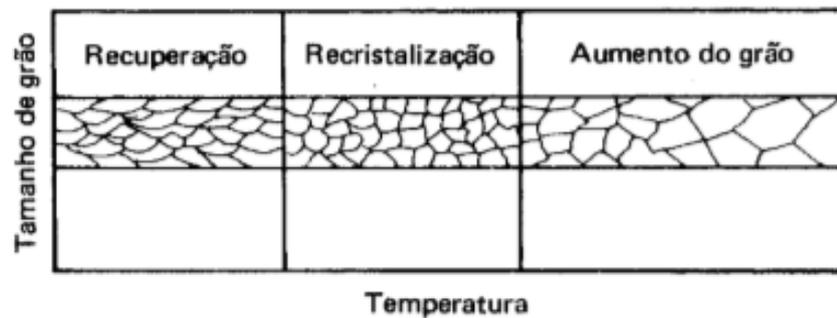
O nível de encruamento e a temperatura de trabalho mecânico também influem na recristalização. Em geral, um maior nível de encruamento reduz o tempo e a temperatura necessários para que ocorra recristalização. Também de um modo geral a redução da temperatura de trabalho mecânico favorece a recristalização subsequente. A composição química também influencia a recristalização: a adição de qualquer impureza (átomos de soluto) aumenta substancialmente a temperatura de recristalização (PADILHA, SICILIANO, 1996).

Outro fator importante para a recristalização e para o tamanho final dos novos grãos recristalizados (crescimento de grão) é a taxa de aquecimento até a temperatura de recozimento. Quanto mais lento o aquecimento, maior o tamanho de grão resultante. Quanto maior a temperatura de recozimento, maior o tamanho de grão resultante, porém menor o grau de encruamento necessário para que a recristalização aconteça. Entretanto a temperatura de recozimento não altera significativamente a relação entre o tamanho de grão e o grau de deformação ou a taxa de aquecimento (CHIAVERINI, 1986).

A recristalização prossegue modificando as propriedades do metal deformado e recuperado, o que continua até que a recristalização se complete. A recristalização completa restaura as propriedades originais do metal não deformado, com exceção dos efeitos do tamanho de grão e da orientação preferencial (textura) (CALLISTER, 2008).

Após a recristalização estar completa e a temperatura continuar aumentando, os grãos cristalinos, agora livre de tensões, tendem a continuar crescendo, fenômeno chamado de crescimento de grão. Um excessivo aumento de grão pode afetar as propriedades dos metais (REED HILL, 1982). A força que promove esse crescimento é a energia liberada à medida os átomos se movem através dos contornos de grão. Quando os grãos crescem em tamanho e decrescem em número, a área do contorno de grão diminui e a energia total de superfície decresce. A Figura 9 a seguir mostra o efeito do recozimento sobre a estrutura do metal encruado. (CHIAVERINI, 1986).

**Figura 9 - Efeito do recozimento sobre a estrutura do metal encruado.**



Fonte: CHIAVERINI, 1986

O crescimento de grão ocorre devido à redução da energia de superfície associada aos contornos de grão e se dá pela migração desses contornos, porém nem todos os grãos podem aumentar de tamanho. Os grãos maiores crescem devido ao encolhimento dos grãos menores, portanto há um aumento do tamanho médio do grão ao longo do tempo. O movimento dos contornos consiste na difusão dos átomos em pequena escala de um lado do contorno de um grão para o outro. As direções do movimento do contorno e do movimento atômico são opostas uma à outra (CALLISTER, 2008).

Por fim, o tamanho de grão também é muito afetado pela composição química. Em geral elementos de liga comuns e impurezas como cobre, ferro, magnésio e manganês favorecem a redução do tamanho de grão (CALLISTER, 2008).

### 3.3 Ensaio de Compressão

Os metais são submetidos frequentemente a variações de tensões, ou seja, quando em serviço são submetidos a forças ou cargas que podem causar danos e até mesmo fratura se as propriedades mecânicas do material não forem bem conhecidas. Os ensaios mecânicos permitem a determinação de propriedades mecânicas que se referem ao comportamento do material quando submetido à esforços, ou seja, demonstram a relação existente entre a sua resposta ou deformação a uma carga ou força aplicada (GARCIA et al., 2012). Essas propriedades são expressas em função de tensões e deformações e, dentre as principais propriedades dos materiais obtidas por ensaios mecânicos, podem ser citadas: a resistência mecânica, a rigidez, a ductilidade, a resiliência e a tenacidade.

Os esforços mecânicos são variados e, no caso da tração e da compressão, a aplicação da carga é lenta e gradual, portanto o esforço possui natureza estática. Na determinação das propriedades mecânicas, aplicam-se cargas que distribuem internamente as forças e suas componentes, de modo que altere a forma da peça submetida à essa carga. A tensão é a intensidade dessa força e pode ser de vários tipos, dentre eles tensão de tração, na qual há uma tendência do material se separar em duas partes em relação ao plano de fundo de tensão, e de compressão, que é o inverso da tração, pois as partes do material adjacentes ao plano de tensão tendem a comprimir-se umas contra as outras (CHIAVERINI, 2012).

A resistência à compressão é uma propriedade muitas vezes requerida em alguns projetos de engenharia. Para tais aplicações, o material deve assegurar boa precisão dimensional quando solicitado por esforços de compressão e não se deformar facilmente. O ensaio de compressão é usado para analisar o comportamento de um material submetido a deformações grandes e permanentes (isto é, plásticas), como ocorre em aplicações de fabricação, ou quando o material é frágil sob tração (CALLISTER, 2008).

Dentre as vantagens do ensaio de compressão, encontram-se a facilidade de aplicação, o custo relativamente baixo e a boa precisão na determinação de propriedades de materiais frágeis. Além disso, é um ensaio que permite estudos mais detalhados na região de deformação elástica. Dessa forma, o ensaio de compressão é usado para fornecer informações básicas sobre a resistência a compressão de materiais, visando suas aplicações em projetos de engenharia, como na construção civil, e em processos de laminação e forjamento, entre outros (GARCIA et al., 2012).

O ensaio de compressão é amplamente usado para a obtenção de informações básicas sobre a resistência mecânica dos materiais e como um teste de controle de especificações. Do mesmo modo que o ensaio de tração, o ensaio de compressão pode ser executado na máquina universal de ensaios, com a adaptação de duas placas lisas - uma fixa e outra móvel, denominados pratos. É entre elas que o corpo de prova é apoiado e mantido firme durante a compressão. As relações que valem para a tração valem também para a compressão. Isso significa que um corpo submetido a compressão também sofre uma deformação elástica e a seguir uma deformação plástica (SOUZA, 1982).

De modo geral, o ensaio de compressão consiste na aplicação de carga de compressão uniaxial crescente em um corpo de prova, que preferivelmente deve ter seção circular. A resposta desse ensaio é dada pela deformação linear, obtida pela medida da distância entre as placas que comprimem o corpo versus a carga de compressão. Por convenção, a força compressiva é considerada negativa, o que produz uma tensão negativa (SOUZA, 1982).

A carga aplicada sobre o corpo de prova se reflete na tensão à qual o corpo fica exposto e deve ser um parâmetro constante para o mesmo material em qualquer área da seção transversal utilizada. A tensão convencional,  $T$ , é definida pela relação expressa na Equação 3.

$$T = \frac{F}{A_o} \quad 3$$

Onde:  $F$  é a carga instantânea aplicada na amostra e  $A_o$  é a área da seção transversal original.

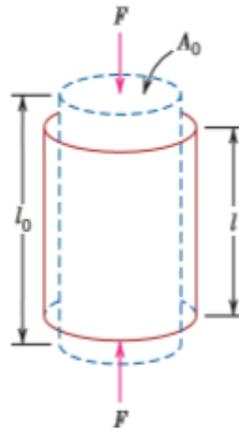
A deformação convencional, também conhecida como deformação nominal ou deformação de engenharia,  $e$ , é definida pela expressão dada na Equação 4 (GARCIA et al., 2012). A deformação é adimensional e geralmente é expressa em valores %, que é o valor da deformação multiplicada por 100.

$$e = \frac{l_i - l_o}{l_o} = \frac{\Delta l}{l_o} \quad 4$$

Onde:  $l_o$  é o comprimento original da amostra antes de se aplicar a carga,  $l_i$  é o comprimento instantâneo e  $\Delta l$  representa a deformação ou a variação no comprimento a um dado instante.

Na Figura 10 é mostrada uma representação esquemática de um corpo de prova no ensaio de compressão, no qual a carga ou força aplicada produz uma contração na altura da amostra e uma deformação linear negativa (CALLISTER, 2008).

**Figura 10 - Desenho esquemático de como uma carga de compressão produz uma redução na altura e uma deformação linear negativa.**



Fonte: CALLISTER, 2008

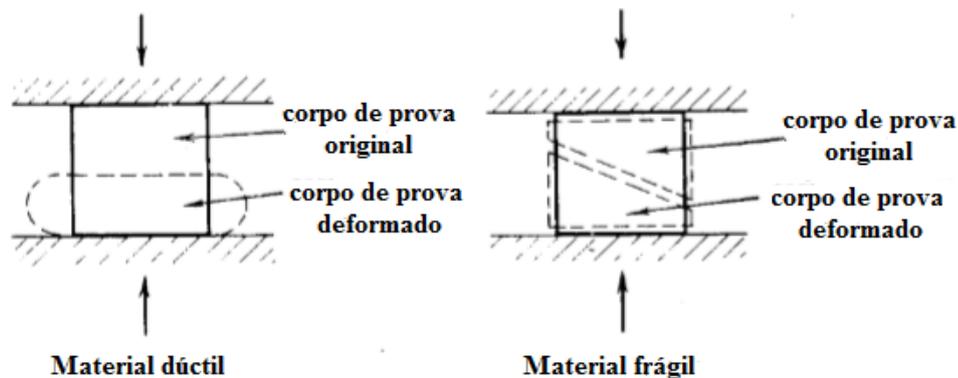
A partir dos valores de tensão e deformação é possível elaborar a curva tensão-deformação, por meio da qual podem ser obtidas diversas informações a respeito do material. Definindo tensão como a resistência interna de um corpo à uma força externa aplicada sobre ele, por unidade de área, e deformação como a variação de uma dimensão qualquer desse corpo, por unidade da mesma dimensão, quando esse corpo é submetido à um esforço qualquer, é possível fazer o levantamento da curva de tensão de tração pela deformação sofrida pelo corpo de prova. A forma e a magnitude da curva tensão-deformação dependem de diversos fatores, como: composição do metal, se foi feito algum tratamento térmico, da história anterior à deformação plástica, da taxa de deformação, da temperatura, do estado de tensões impostas durante o teste, do atrito entre os pratos superiores e inferiores de compressão, da relação entre a altura e a área da seção transversal do corpo de prova (CALLISTER, 2008).

Os materiais frágeis tendem a romper no ensaio de compressão, pois verifica-se que neles não ocorrem grandes deformações laterais, de modo que, com o aumento da carga, a tensão gerada provoca uma ruptura por cisalhamento e deslizamento ao longo de um plano inclinado. Na Figura 11 a seguir é mostrado como se dá a falha de um material dúctil e um material frágil sob compressão (CHIAVERINI, 1986).

Pode-se admitir que, para um metal dúctil, principalmente em aços baixo carbono, o comportamento elástico observado quando sujeito aos esforços de compressão, é semelhante aquele observado quando sujeito à tração. O material dúctil também obedece a lei de Hooke na fase elástica. Na fase plástica não é possível comparar com a tração, uma vez que, na compressão, à medida que a carga aumenta, a peça tende a ter sua seção transversal alargada.

No entanto, essa alteração geométrica não ocorre de maneira uniforme, sendo que a região central da amostra tende a exibir área de seção transversal superior às regiões próximas dos pratos de compressão. Este efeito é conhecido como embarrilhamento, e há um aumento das tensões nominais (MEYERS; CHAWLA, 1982). O fenômeno é relacionado às forças de atrito entre os pratos de compressão e o corpo de prova, que tendem a dificultar o escoamento ou deformação plástica nessas regiões (SOUZA, 1982).

**Figura 11 - Falha em material dúctil e em material frágil sob compressão.**



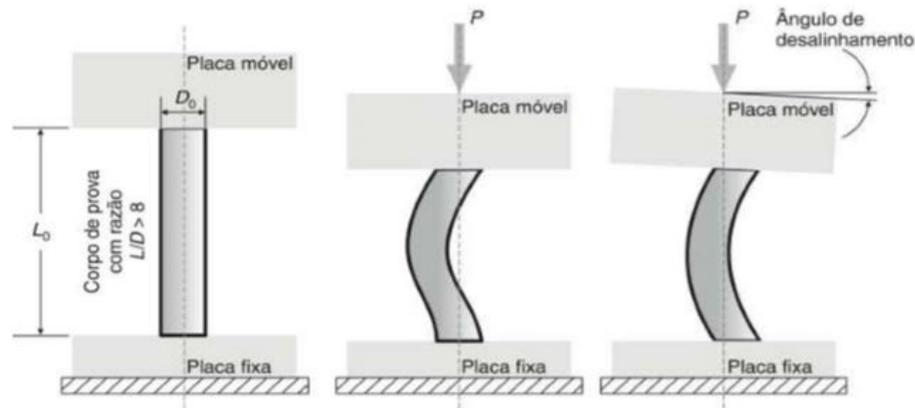
Fonte: CHIAVERINI, 1986

Ainda segundo Meyers; Chawla (1993), um outro fenômeno considerado negativo pode ser observado na compressão, a flambagem, que representa uma espécie de flexão no corpo de prova durante a aplicação dos esforços. A flambagem é uma função da uniformidade de aplicação da carga e das heterogeneidades do corpo de prova. O comprimento não deve ser muito pequeno para não aumentar o atrito entre as placas da máquina e a superfície do material ensaiado. O atrito entre a placa da máquina e a superfície comprimida do corpo de prova, provoca uma redução do escoamento do material. Considerando o comprimento constante, pode-se dizer que a flambagem é uma função igual ao módulo de elasticidade.

O ensaio de tração é mais amplamente usado pois, no ensaio de compressão, a determinação das propriedades mecânicas é dificultada pela existência de atrito entre o corpo de prova e as placas da máquina, pela possibilidade de flambagem, pela dificuldade de medida dos valores numéricos do ensaio e por alguns outros fatores que podem levar à erros. A fim de evitar o fenômeno da flambagem, alguns cuidados devem ser tomados na realização do ensaio, como por exemplo, o correto dimensionamento do corpo de prova, com a relação comprimento/seção transversal adequada, e também evitar a falta de paralelismo entre as

placas do equipamento. A Figura 12 mostra a flambagem devido ao desalinhamento das placas do equipamento de compressão (SOUZA, 1982).

**Figura 12 - Flambagem devido ao desalinhamento das placas do equipamento de compressão.**



Fonte: SOUZA, 1982

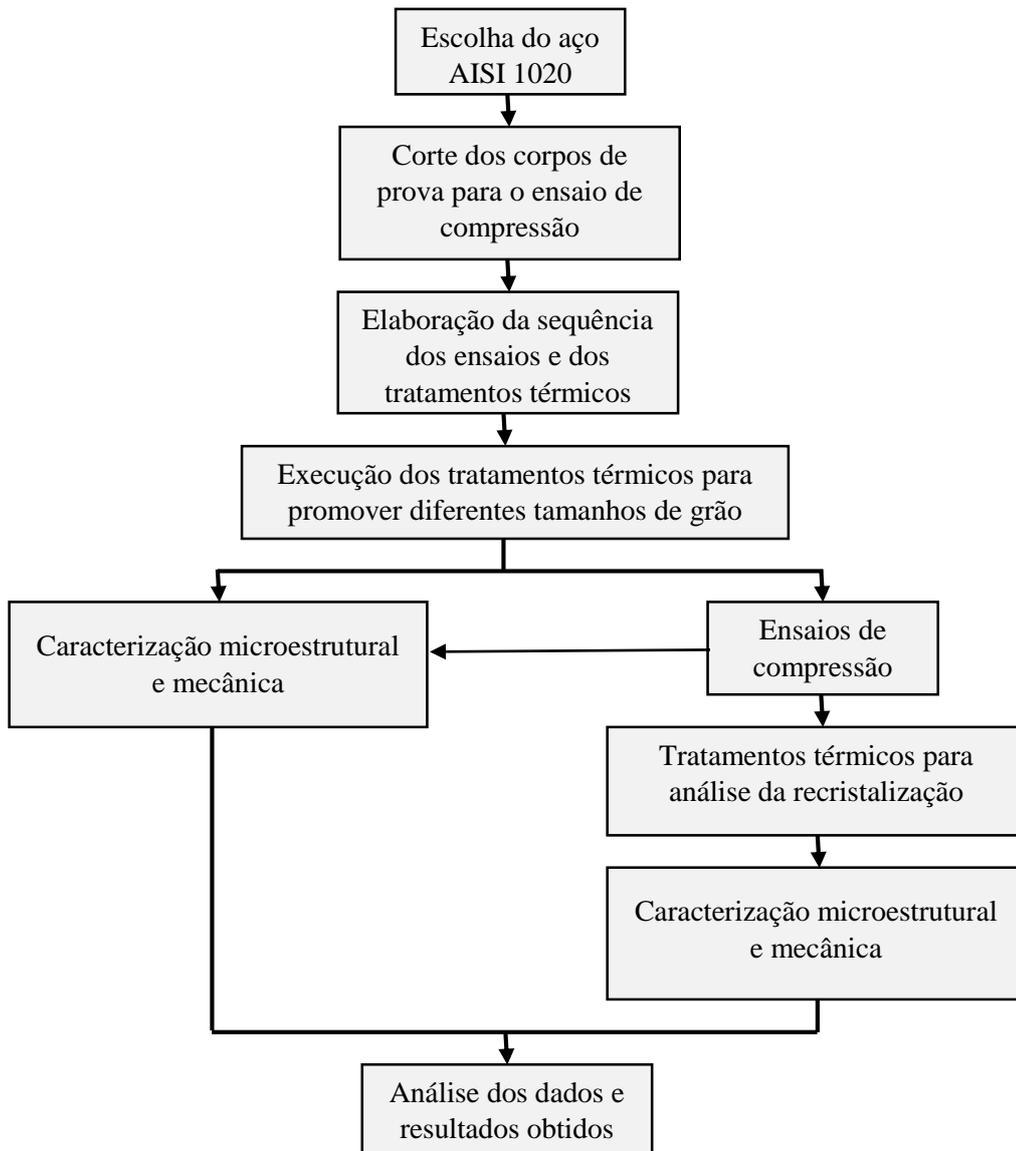
O comportamento elástico dos metais (materiais cristalinos em geral) é o mesmo em condições de tração e compressão. Embora a deformação elástica máxima nesses materiais seja pequena, a tensão requerida para produzir essa deformação é elevada pois essa tensão trabalha em oposição às forças de restauração das ligações primárias. É comum que o limite de escoamento na compressão seja mais elevado que na tração, mas pode-se considerar que a curva de tensão-deformação em compressão é uma extensão da curva de tração. Os materiais que apresentam respostas equivalentes para tração e compressão são ditos com comportamento elástico linear (GARCIA et al., 2012).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Descrição do Trabalho

O trabalho consistiu na análise dos efeitos do tamanho de grão e da realização de deformação plástica nos fenômenos de recristalização e crescimento de grão do aço de baixo teor de carbono AISI 1020. Na Figura 13 é mostrada uma representação esquemática do estudo realizado.

**Figura 13 - Metodologia adotada no trabalho.**



Fonte: Próprio autor.

## 4.2 Material

O aço AISI 1020 utilizado no trabalho foi obtido no Departamento de Engenharia de Materiais do CEFETMG, em forma de uma barra cilíndrica com comprimento de 2m e diâmetro de 1/2".

Dentre as características do aço AISI 1020, se encontram a baixa temperabilidade, excelente forjabilidade e soldabilidade, e boa plasticidade. É aplicado em produtos de formas variadas, como tubos soldados, na confecção de eixos, parafusos e componentes forjados e também na indústria automobilística (AÇOS PORTE, 2015).

As condições de tratamento térmico e a composição química encontrada comumente nas bibliografias são mostradas na Tabela 1 (GERDAU AÇOS FINOS PIRATINI, 2003).

**Tabela 1 - Condições informadas nas referências bibliográficas sobre o aço AISI 1020**

Composição química			
C (%)	Mn (%)	P máx. (%)	S máx. (%)
0,18 – 0,23	0,30 – 0,60	0,030	0,050
Tratamento térmico: Recozimento / Normalização			
Temperatura: 920°C			
Dureza: Recozido 110 HB / Normalizado 131 HB			
Alongamento: Recozido 36,5 % / Normalizado 35,8 %			

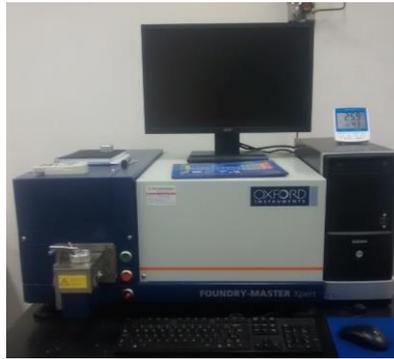
Fonte: GERDAU AÇOS FINOS PIRATINI, 2003

Para a verificação da composição química das amostras foi utilizada a técnica de espectroscopia de emissão ótica. O equipamento utilizado foi da marca Oxford Instruments modelo Foundry-Master Xpert, mostrado na Figura 14.

## 4.3 Corpos de Prova

A barra foi cortada inicialmente em uma máquina de corte da marca Struers modelo Telux, mostrada na Figura 15 (a) e os corpos de prova foram cortados na cortadora metalográfica da marca Arotec modelo COR 80/2, exibida na Figura 15 (b). Os corpos de prova consistiram em amostras com 19 mm de altura e diâmetro de 12,7 mm, conforme mostrado na Figura 16.

**Figura 14 - Espectrômetro marca Oxford Instruments modelo Foundry-Master Xpert.**



Fonte: Próprio autor.

**Figura 15 - Equipamentos empregados para os corte das amostras.**



(a)

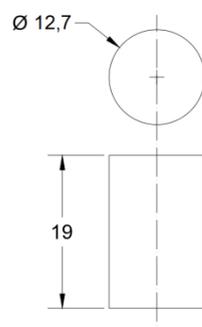


(b)

Equipamentos de corte: (a) marca Struers modelo Telux e (b) Arotec modelo COR 80/2

Fonte: Próprio autor.

**Figura 16 - Corpos de prova utilizados no trabalho.**



(a)



(b)

(a) Desenho esquemático e (b) corpos de prova confeccionados

Fonte: Próprio autor.

Foram cortadas um total de 35 peças, sendo que, duas delas foram utilizadas para a caracterização inicial e portanto não passaram por nenhum tratamento térmico, oito amostras foram tratadas termicamente nas condições que serão mencionadas na tabela 2 do item a seguir, uma amostra foi utilizada somente para a análise química e as outras 24 amostras foram cortadas para o ensaio de compressão.

### 4.3 Tratamentos Térmicos

Os tratamentos térmicos foram realizados em dois momentos distintos. Os tratamentos iniciais foram executados com o intuito de avaliar a influência do tempo de permanência no forno e da taxa de resfriamento no tamanho de grão e na dureza do material. Dessa forma, nesse caso, foram realizados tratamentos térmicos de recozimento pleno e normalização, ou seja, as peças foram aquecidas até a transformação completa em austenita e resfriadas dentro do forno e ao ar, respectivamente. As condições dos tratamentos térmicos estão representadas na Tabela 2. Nesta fase, foi feito o tratamento térmico em oito amostras.

**Tabela 2 - Condições dos tratamentos térmicos consideradas no trabalho**

Amostras	Temperatura do tratamento térmico	Tempo no forno	Meio de resfriamento	Tratamento térmico
<b>1 e 2</b>	920°C	10 min.	Ar	Normalização
<b>3 e 4</b>	920°C	30 min	Forno	Recozimento
<b>5 e 6</b>	920°C	2 horas	Forno	Recozimento
<b>7 e 8</b>	920°C	4 horas	Forno	Recozimento

Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados apresentados nas amostras tratadas com os parâmetros da Tabela 2 foram escolhidas duas condições de tratamento térmico para as etapas subsequentes do trabalho. Dessa forma, 24 corpos de prova foram tratados nas seguintes condições: temperatura de 920°C, tempo de encharque de 10 min e resfriamento ao ar (12 corpos de prova - mesmas condições de tratamento térmico das amostras 1 e 2) e tempo de encharque de 4 horas e resfriamento no forno (12 corpo de prova - mesmas condições de tratamento térmico das amostras 7 e 8).

Em seguida, essas amostras foram comprimidas em diferentes magnitudes (3 níveis de deformação, descritos em um item a seguir). Após a compressão, as peças foram cortadas ao meio e submetidas a novos tratamentos térmicos, dessa vez visando observar os fenômenos de recristalização e crescimento de grão. Os parâmetros desses novos tratamentos são mostrados na Tabela 3.

**Tabela 3 - Condições dos tratamentos térmicos empregadas para análise dos fenômenos de recristalização e crescimento**

Temperatura do tratamento térmico	Tempo no forno	Meio de resfriamento
920°C	2 min.	Ar
920°C	5 min	Ar
920°C	10 min.	Ar
920°C	30 min	Ar

Fonte: Próprio autor.

Todos os tratamentos foram realizados em um forno elétrico da marca Magnus com controlador digital, representado na Figura 17.

**Figura 17 - Forno elétrico marca Magnus utilizado nos tratamentos térmicos.**



Fonte: Próprio autor

#### 4.4 Ensaio de Compressão

Os ensaios de compressão foram executados em uma máquina de ensaios universal da marca Emic, modelo GR048, representada na Figura 18. Os ensaios de compressão foram

realizados nas 24 amostras respectivas utilizadas nos dois tratamentos térmicos pré-estabelecidos. Dos 12 corpos de prova de cada condição de tratamento térmico, 4 foram submetidos a um nível de 0,05 de deformação de engenharia, 4 submetidos a 0,1 de deformação e os outros 4 submetidos a 0,2 de deformação. A velocidade nos ensaios foi de 0,01 mm/s e não foi estabelecida pré-carga. A deformação foi mensurada inicialmente a partir do deslocamento da matriz superior e ao final de medições dos corpos de prova.

**Figura 18 - Máquina utilizada no ensaio de compressão.**



Fonte: Próprio autor.

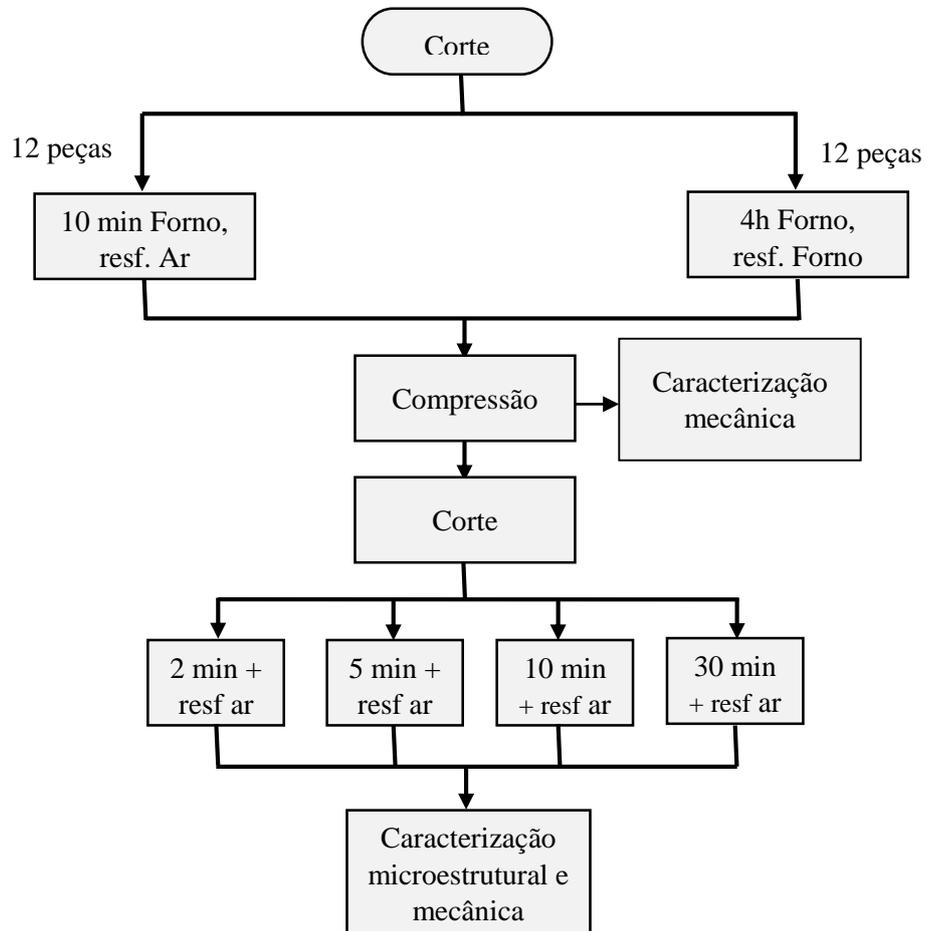
O fluxograma representado na Figura 19 mostra de forma mais clara a ordem geral dos experimentos antes e após a compressão. Verifica-se que após a compressão, as amostras foram cortadas ao meio, antes dos tratamentos empregados para a avaliação da recristalização e do crescimento de grão. Esse procedimento foi considerado para que as análises subsequentes fossem realizadas nas seções onde as deformações fossem realmente correspondentes aos valores mencionados (0,05, 0,1 e 0,2), uma vez que próximo às superfícies originais dos corpos de prova, devido ao atrito, o escoamento foi limitado.

#### **4.5 Análise da Microestrutura**

A caracterização microestrutural do aço AISI 1020 foi conduzida por ensaios metalográficos e medição do tamanho de grão (essa última apenas na primeira etapa). A preparação metalográfica foi executada por meio de: 1) embutimento a quente com baquelite; 2) lixamento; 3) polimento com pasta de diamante (9 $\mu$ m e 3 $\mu$ m); 4) ataque químico com o

regente Nital 3% para revelação dos microconstituintes e 5) observação e coleta de imagens no microscópio óptico.

**Figura 19 - Sequência de experimentos relacionada aos corpos de prova comprimidos.**



Fonte: Próprio autor.

**Figura 20 - Microscópio óptico marca Fortel utilizado para análise da microestrutura.**



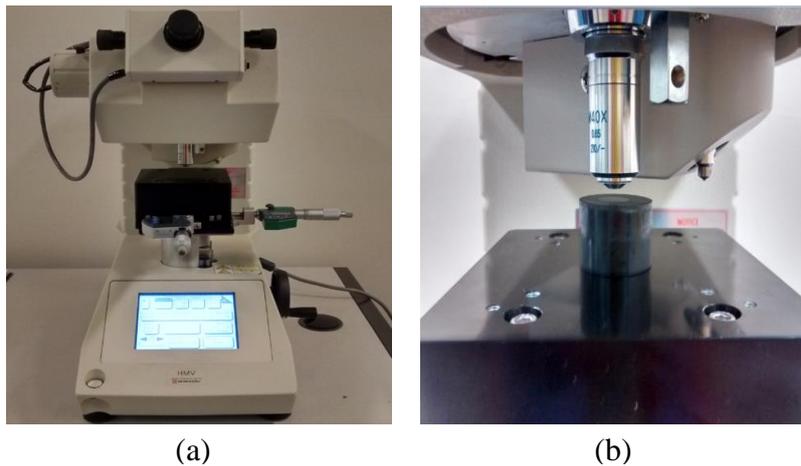
Fonte: Próprio autor.

As amostras foram analisadas por microscopia óptica, utilizando o microscópio da marca Fortel, ilustrado na Figura 20. O tamanho de grão foi medido com o programa Image Pro Plus, a partir da digitalização de 20 imagens de cada condição da Tabela 2. Nesse caso, foram determinadas as área dos grão e então o diâmetro médio.

#### 4.6 Microdureza

Os ensaios de microdureza Vickers foram executados nas amostras para analisar o comportamento mecânico do aço AISI 1020. A carga e o tempo empregados nas análises foram de 1 kg e de 15 s, respectivamente. O equipamento utilizado foi um microdurômetro da marca Shimadzu, modelo HMV 2T, com penetrador Vickers, e está representado na Figura 21.

**Figura 21 - Microdurômetro Vickers marca Shimadzu modelo HMV-2T.**



(a) vista geral e (b) detalhe

Fonte: Próprio autor

As medições foram realizadas tanto nas amostras preparadas somente para a caracterização microestrutural, quanto nas amostras após a compressão e compressão e tratamento. Para cada condição, foram feitas 8 medidas em uma amostra de cada condição e também foi feito a média e o desvio padrão.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização do Material no Estado Inicial

A composição química do aço usado no trabalho investigada por espectroscopia de emissão ótica está representada na Tabela 4. Nota-se que se trata de um aço AISI 1020 (ASM HANDBOOK VOLUME 1, 1990).

**Tabela 4 - Análise química do material**

Fe	<b>98,6%</b>
C	0,232%
Mn	0,712%
P	0,001%
S	0,0225%
Si	0,265%

Fonte: Próprio autor.

Em relação a microestrutura, segundo Colpaert (2008), o aço AISI 1020 é chamado de hipoeutetóide por se tratar de um aço de baixa liga com teores de carbono abaixo de 0,77%. Nas condições de resfriamento lento ou, no máximo, normalizados, há tempo de se obter uma redistribuição de soluto completa. Dessa forma, a austenita resfriada entra em um campo bifásico, onde se forma a ferrita, denominada pró-eutetóide e, após reduzir a temperatura para níveis abaixo de 727°C, é formada a perlita, chamado constituinte eutetóide. As fotomicrografias obtidas por meio de microscopia ótica do aço AISI 1020 no estado inicial do presente trabalho são mostradas na Figura 22 a seguir. É possível observar grãos de ferrita equiaxiais e colônias de perlita.

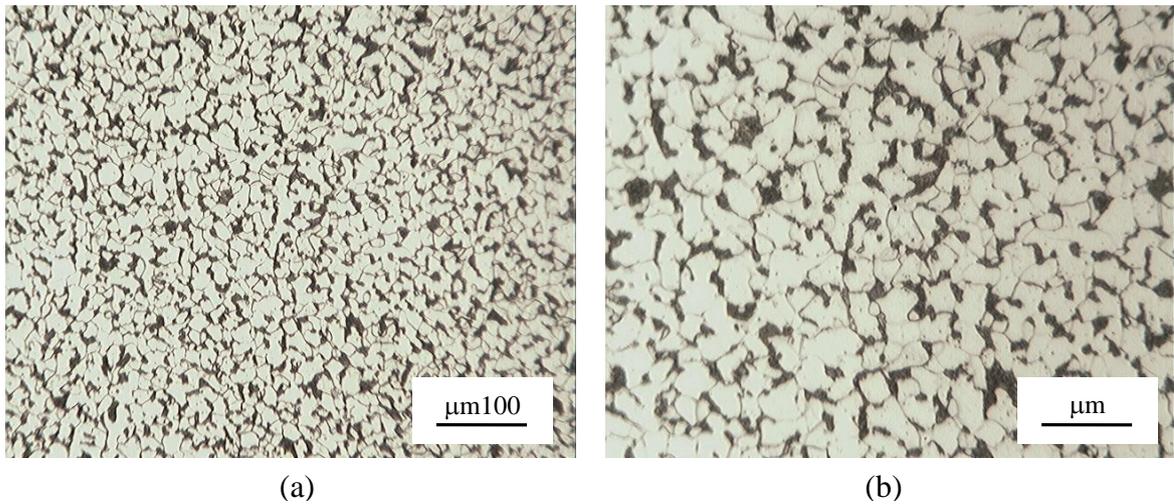
Na Tabela 5 é apresentado o resultado de dureza médio do material no estado inicial, bem como o desvio padrão.

**Tabela 5 - Dureza do aço AISI 1020 no estado inicial**

<b>Média (<math>\mu</math>)</b>	<b>220,6 HV1</b>
<b>Desvio Padrão (<math>\sigma</math>)</b>	<b>6,7</b>

Fonte: Próprio autor.

**Figura 22 - Microestrutura do aço AISI 1020 no estado inicial.**



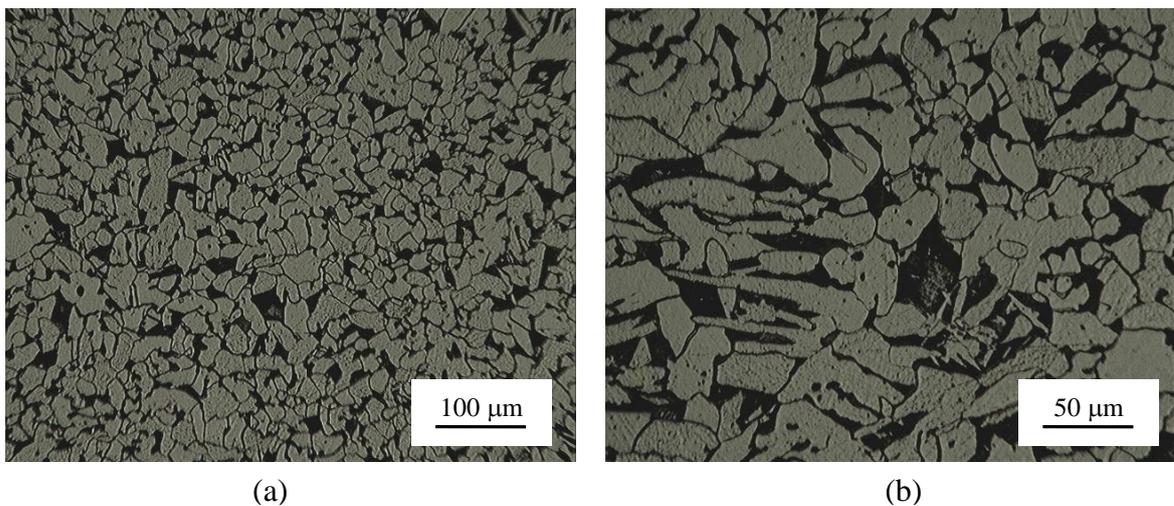
(a) e (b) ampliações distintas.

Fonte: Próprio autor.

## 5.2 Efeito do Tratamento Térmico na Microestrutura e na Microdureza

Nas Figuras 23 a 26 são mostradas fotomicrografias das amostras de aço AISI 1020 submetidas às quatro condições diferentes de tratamento térmico, sendo a primeira com 10 minutos de encharque e resfriamento ao ar e as demais com 30 minutos, 2 horas e 4 horas de encharque e resfriamento no forno.

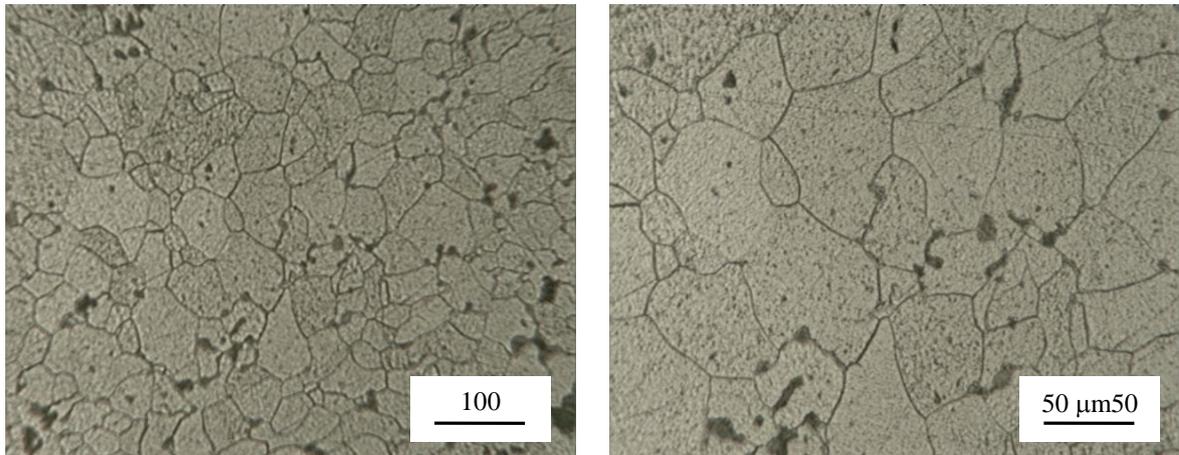
**Figura 23 - Fotomicrografias do aço AISI 1020 após a realização do tratamento térmico -  $T = 920^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ , resfriamento ao ar.**



(a) e (b) ampliações distintas

Fonte: Próprio autor.

**Figura 24 - Fotomicrografias (MO) do aço AISI 1020 após a realização do tratamento térmico -  $T = 920^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 30$  min, resfriamento no forno.**



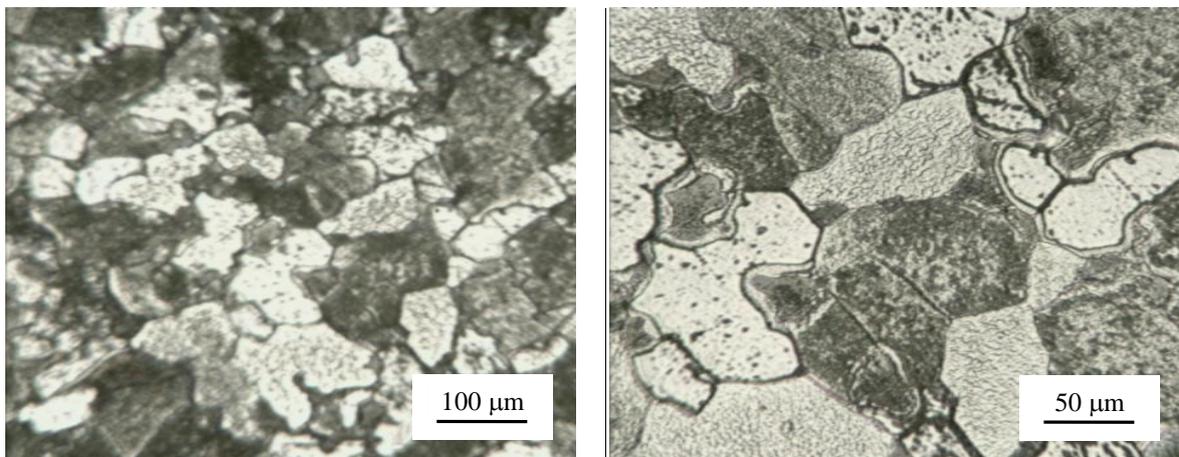
(a)

(b)

(a) e (b) ampliações distintas

Fonte: Próprio autor.

**Figura 25 - Fotomicrografias (MO) do aço AISI 1020 após a realização do tratamento térmico -  $T = 920^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 2$  h, resfriamento no forno.**



(a)

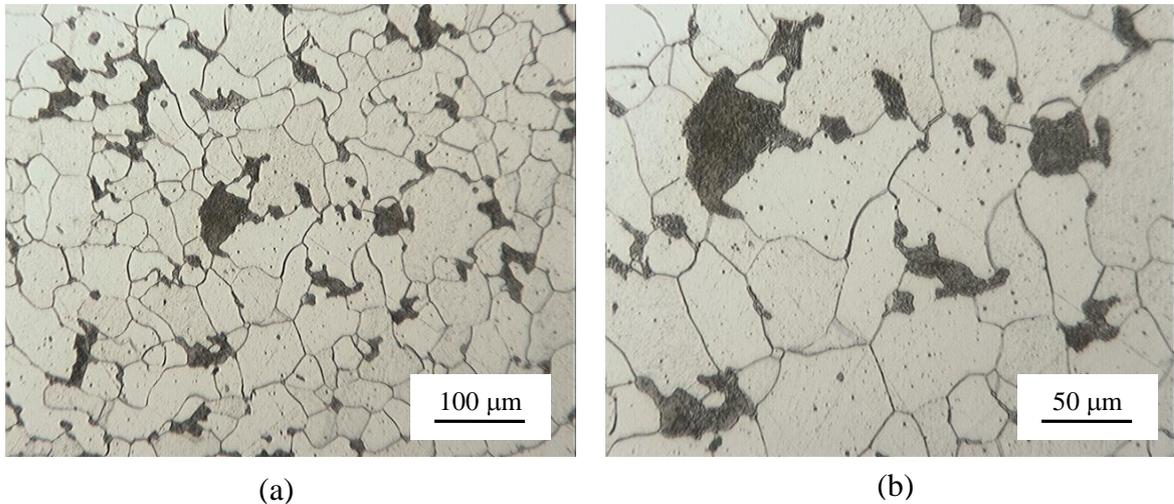
(b)

(a) e (b) ampliações distintas

Fonte: Próprio autor.

Verifica-se, qualitativamente, que em relação às demais amostras, aquela correspondente ao tempo de encharque de 10 minutos e resfriamento ao ar foi a que apresentou os menores tamanhos de grão. Considerando as três condições nas quais o resfriamento foi no forno, em geral, quanto maior o tempo, maior o tamanho de grão. A exceção para essa situação foi a amostra cujas imagens são mostradas na Figura 25.

**Figura 26 - Fotomicrografias (MO) do aço AISI 1020 após a realização do tratamento térmico -  $T = 920^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 4\text{h}$ , resfriamento no forno.**



(a) e (b) ampliações distintas

Fonte: Próprio autor.

Segundo Colpaert (2008), o aquecimento da ferrita em aços Fe-C leva à formação da fase austenita. A normalização é um tratamento térmico empregado com o objetivo de obter uma homogeneização microestrutural e refinar os grãos, isto é, para diminuir o tamanho médio do grão e produzir uma distribuição de tamanhos mais uniforme e desejável. O ciclo térmico consiste no aquecimento da austenita completa, seguido de resfriamento ao ar. Essa condição foi aquela conduzida para o material da Figura 23. No tratamento térmico de recozimento, um material é exposto a uma temperatura elevada por um período de tempo prolongado, sendo ele então resfriado lentamente (no caso deste trabalho, o resfriamento ocorreu dentro do forno). Normalmente, a normalização é realizada com os objetivos de refinar e/ou homogeneizar estruturas, aliviar tensões, restituir propriedades alteradas por tratamentos anteriores e produzir microestruturas específicas (COLPAERT, 2008).

Dessa forma, espera-se que, quanto mais lento for o resfriamento e/ou quanto maior o tempo de tratamento térmico, maior o tamanho de grão. Tal fato foi comprovado pelos resultados obtidos. Na tabela 6 são mostrados os valores médios de diâmetro de grão obtidos para o aço nas condições exemplificadas nas figuras anteriores. Ressalta-se que para essa análise, foram medidos cerca de 100 grãos para cada amostra. Como há duas amostras para cada condição de tratamento, obteve-se um total de 200 medidas para cada condição. Observa-se que, conforme as imagens apresentadas, uma elevação no tamanho médio de grão ocorreu

do material com tempo de encharque de 10min e resfriado ao ar para o material com tempo de 30 minutos e resfriados no forno e do material com tempo de 4 horas e resfriado no forno.

**Tabela 6 - Tamanho de grão obtidos após tratamentos térmicos**

	<b>Amostras 1 e 2</b>	<b>Amostras 3 e 4</b>	<b>Amostras 5 e 6</b>	<b>Amostras 7 e 8</b>
<b>diâmetro médio do grão (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	30,4	51,3	60,5	69,0

Fonte: Próprio autor.

Os resultados de dureza Vickers são mostrados na Tabela 6, com os valores médios e os desvios padrão. Verifica-se que os resultados estão de acordo com o que foi observado para o tamanho de grão: quanto maior o tamanho de grão, menor foi o valor de dureza verificado. Ressalta-se que a diferença mais significativa foi do material tratado termicamente com 10 minutos e resfriado ao ar em relação aos demais corpos de prova. Em geral os resultados estão de acordo com o que é previsto na literatura para a relação entre o tamanho de grão e a dureza (MEYERS; CHAWLA, 1993; DIETER, 1981; CALLISTER, 2008)

**Tabela 7 - Resultados microdureza Vickers**

<b>Valores de dureza Vickers (HV)</b>				
<b>Dureza</b>	<b>amostra 2 (10 min. forno, resfr. Ar)</b>	<b>amostra 4 (30 min forno, refr. Forno)</b>	<b>amostra 6 (2h forno, resfr. Forno)</b>	<b>amostra 8 (4h forno, refr. Forno)</b>
<b>Média</b>	133,8	111,8	108,7	102,4
<b>Desvio padrão</b>	1,8	3,5	3,6	3,8

Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados obtidos, optou-se por trabalhar com o aço AISI 1020 em duas condições de tratamento térmico nas etapas seguintes. As condições escolhidas foram as que geraram os tamanhos de grão e, conseqüentemente, durezas mais distintas: 10 minutos de encharque e resfriamento ao ar e 4 horas de encharque e resfriamento no forno. A partir desse momento, serão referidos como aço com menor e aço com maior tamanho de grão inicial.

### 5.3 Efeito da Deformação por Compressão na Dureza do Material

Na tabela 8 e na Figura 27 são mostrados os resultados de dureza obtidos para o aço AISI 1020 com o menor tamanho de grão previamente obtido comprimido com as três magnitudes de deformação convencional consideradas no trabalho. Na tabela 9 e na Figura 28 são apresentados os resultados para o aço com o maior tamanho de grão.

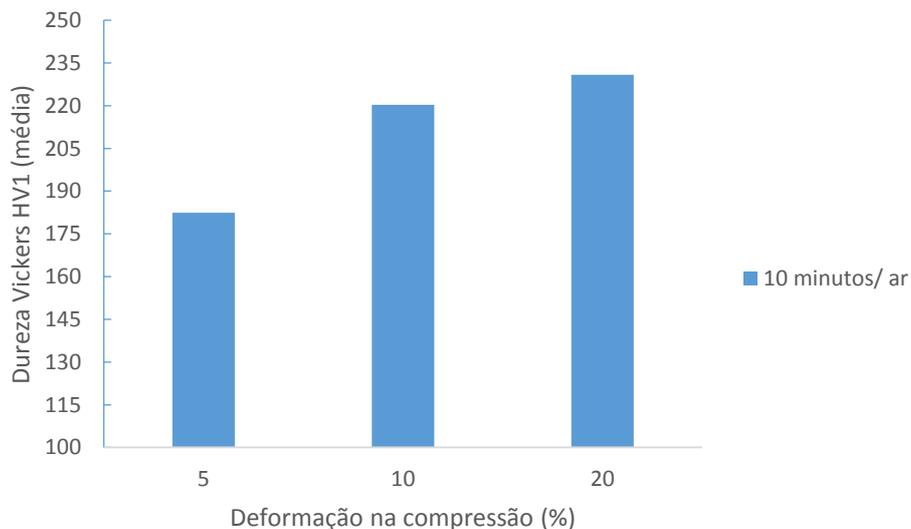
Verifica-se que o comportamento apresentado pelo material é similar nas duas situações: quanto maior a deformação por compressão aplicada, maiores foram os resultados de dureza. Esse comportamento está de acordo com o esperado para o encruamento do aço, uma vez que ao elevar a quantidade de deformação, a densidade das discordâncias também é aumentada, que interagem umas com as outras e com outras barreiras com maior intensidade (DIETER, 1981). Por fim, o material com tamanho de grão maior exibiu menor dureza mesmo após compressão.

**Tabela 8 - Valores de Dureza Vickers (HV) - tratamento inicial 10 min, resfriamento ar / compressão**

Deformação	5%	10%	20%
Média ( $\mu$ )	182,4	220,3	230,9
Desvio Padrão ( $\sigma$ )	3,7	5,8	7,8

Fonte: Próprio autor.

**Figura 27 – Gráfico dos Valores de Dureza Vickers (HV) - tratamento inicial 10 min, resfriamento ar / compressão .**



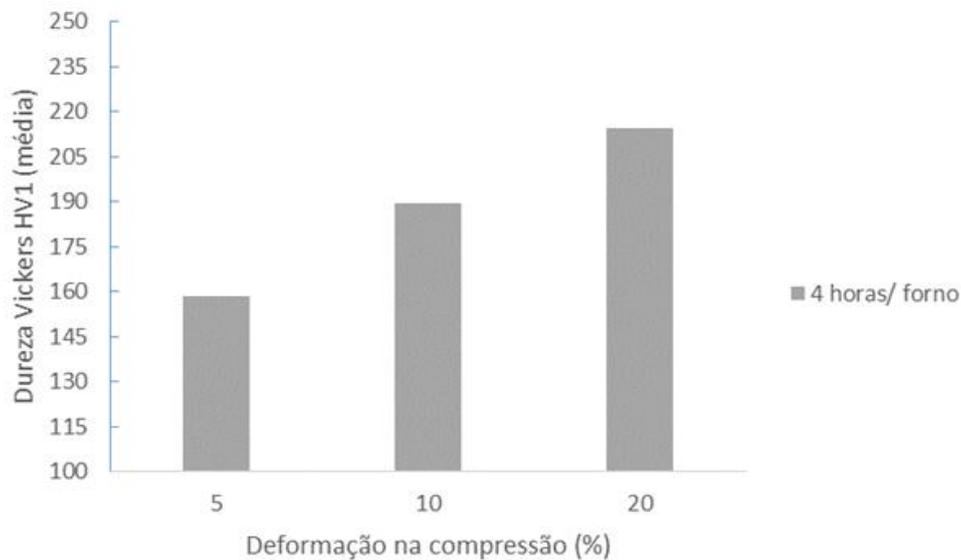
Fonte: Próprio autor.

**Tabela 9 - Valores de Dureza Vickers (HV) - tratamento inicial 4 h, resfriamento forno / compressão**

Deformação	5%	10%	20%
Média ( $\mu$ )	159,8	189,5	214,6
Desvio Padrão ( $\sigma$ )	5,7	12,5	8,5

Fonte: Próprio autor.

**Figura 28 - Gráfico dos Valores de Dureza Vickers (HV) - tratamento inicial 4 h, resfriamento forno / compressão.**



Fonte: Próprio autor.

#### 5.4 Efeito da Deformação na Recristalização e no Crescimento de Grão

Na tabela 10 são mostrados os resultados da deformação obtidos para o aço AISI 1020 com o menor tamanho de grão comprimido com as três magnitudes de deformação consideradas no trabalho e com as quatro condições de tratamento térmico posterior à compressão. Na Figura 29 são mostrados os resultados para essa mesma condição. Na tabela 11 e na Figura 30 são apresentados os resultados para o aço com o maior tamanho de grão.

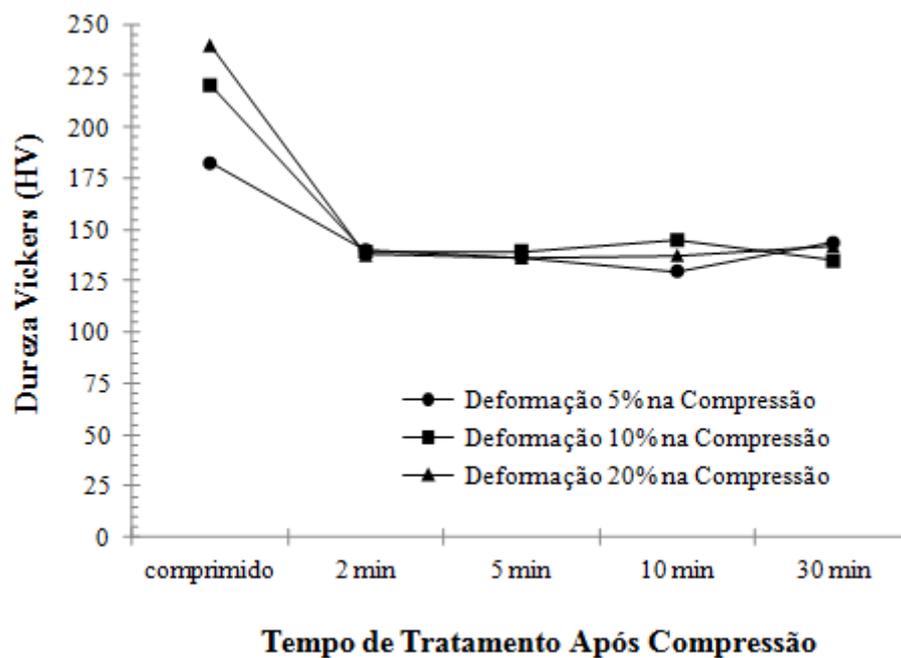
Nas Figuras 31 a 38 são mostradas fotomicrografias das amostras de aço AISI 1020 com o menor e o maior tamanho de grão que foram submetidas à quatro condições diferentes de tratamento térmico após compressão, sendo essas condições 2, 5, 10 e 30 minutos de encharque e resfriamento ao ar.

**Tabela 10 Valores de Dureza Vickers (HV) - tratamento inicial 10 min, resfriamento ar / compressão**

<b>2 minutos</b>			
<b>Deformação</b>	5%	10%	20%
<b>Média (<math>\mu</math>)</b>	140,1	139,3	137,5
<b>Desvio Padrão (<math>\sigma</math>)</b>	4,1	3,1	2,6
<b>5 minutos</b>			
<b>Deformação</b>	5%	10%	20%
<b>Média (<math>\mu</math>)</b>	136,3	139,5	136,4
<b>Desvio Padrão (<math>\sigma</math>)</b>	2,9	14,6	2,8
<b>10 minutos</b>			
<b>Deformação</b>	5%	10%	20%
<b>Média (<math>\mu</math>)</b>	129,8	144,9	137,6
<b>Desvio Padrão (<math>\sigma</math>)</b>	2,9	3,0	3,3
<b>30 minutos</b>			
<b>Deformação</b>	5%	10%	20%
<b>Média (<math>\mu</math>)</b>	143,6	134,8	141,9
<b>Desvio Padrão (<math>\sigma</math>)</b>	5,5	4,9	4,6

Fonte: Próprio autor.

**Figura 29 - Gráfico com os valores de Dureza Vickers (HV) - tratamento inicial 10 min, resfriamento ar / compressão.**



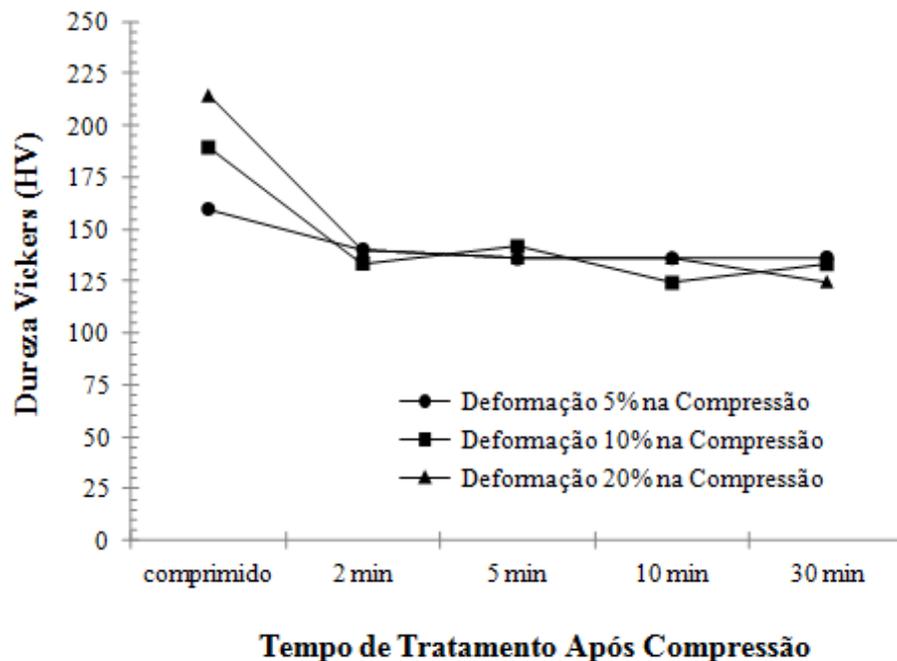
Fonte: Próprio autor.

**Tabela 11 - Valores de Dureza Vickers (HV) - tratamento inicial 4 h, resfriamento forno / compressão**

<b>2 minutos</b>			
<b>Deformação</b>	5%	10%	20%
<b>Média (<math>\mu</math>)</b>	140,4	133,4	139,9
<b>Desvio Padrão (<math>\sigma</math>)</b>	3,2	5,8	3,1
<b>5 minutos</b>			
<b>Deformação</b>	5%	10%	20%
<b>Média (<math>\mu</math>)</b>	135,8	141,8	136,4
<b>Desvio Padrão (<math>\sigma</math>)</b>	4,8	7,3	10,6
<b>10 minutos</b>			
<b>Deformação</b>	5%	10%	20%
<b>Média (<math>\mu</math>)</b>	136,1	124,2	136,5
<b>Desvio Padrão (<math>\sigma</math>)</b>	3,2	2,4	5,3
<b>30 minutos</b>			
<b>Deformação</b>	5%	10%	20%
<b>Média (<math>\mu</math>)</b>	136,5	133,1	124,9
<b>Desvio Padrão (<math>\sigma</math>)</b>	5,6	3,4	6,6

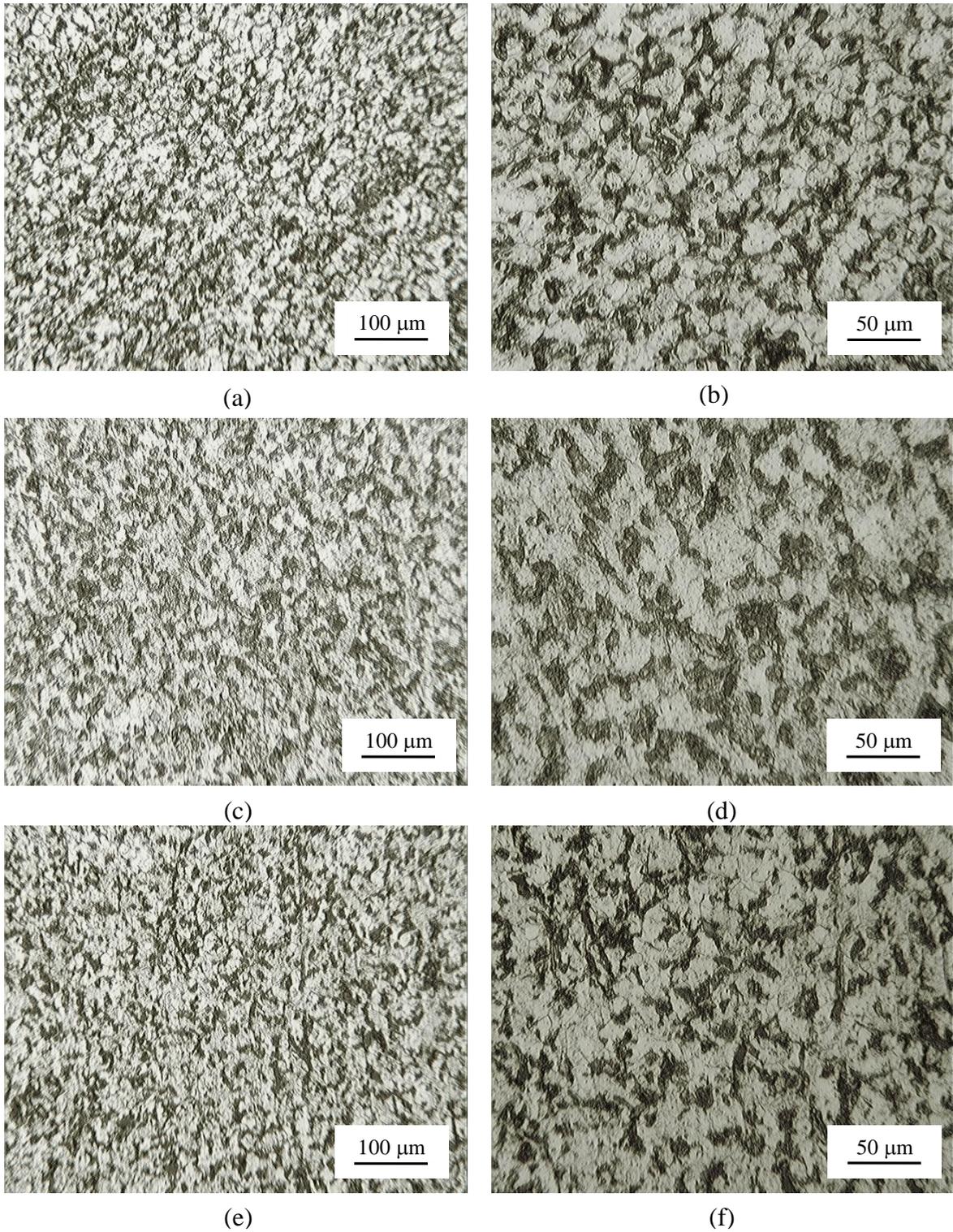
Fonte: Próprio autor.

**Figura 30 - Gráfico com os valores de Dureza Vickers (HV) - tratamento inicial 4 h, resfriamento forno / compressão.**



Fonte: Próprio autor.

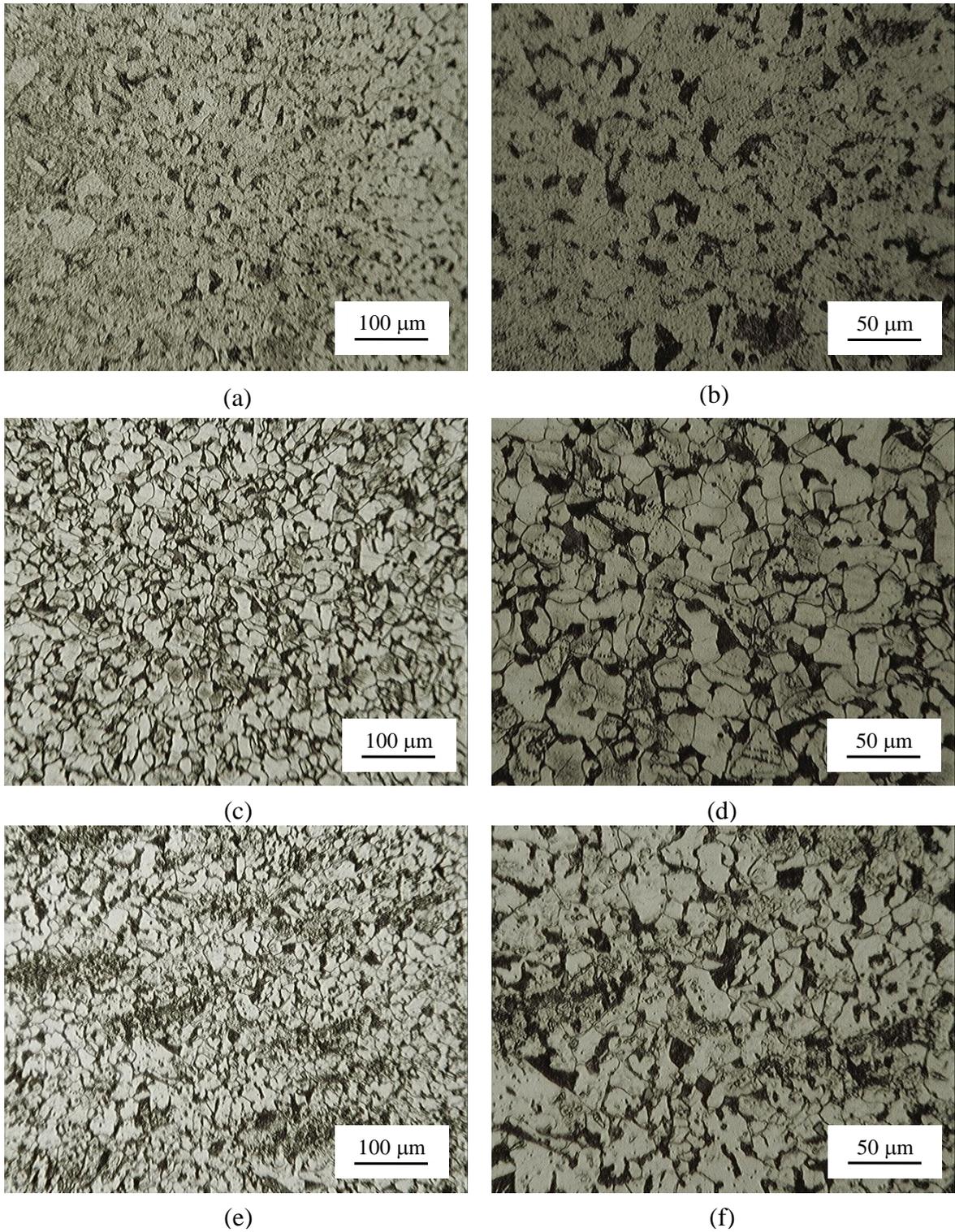
**Figura 31 - Tratamento inicial 10 min, resfriamento ar / compressão / tratamento após compressão 2 min, resfriamento ar.**



(a) e (b) deformação 5%; (c) e (d) deformação 10%; (e) e (f) deformação 20%

Fonte: Próprio autor.

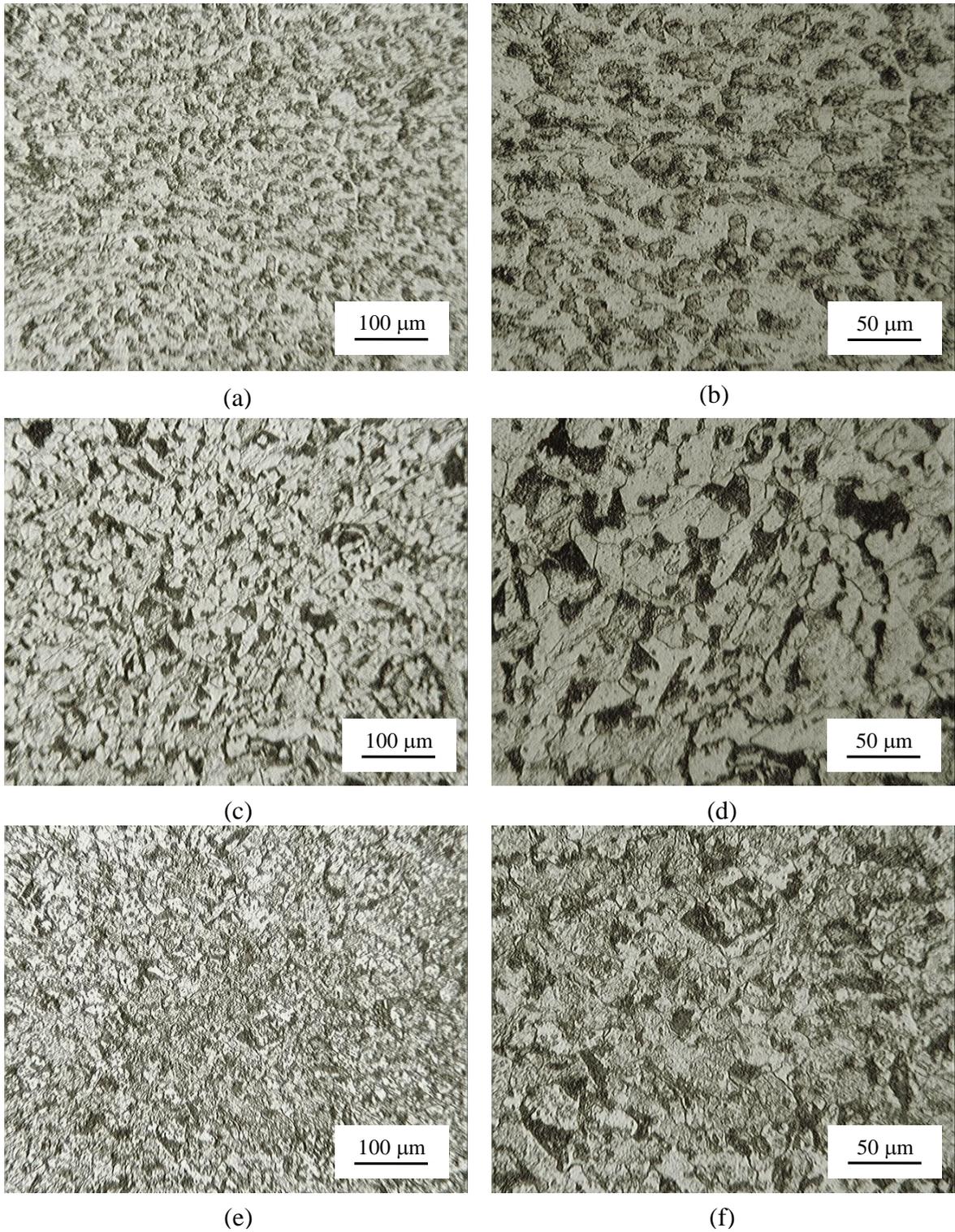
**Figura 32 - Tratamento inicial 10 min, resfriamento ar / compressão / tratamento após compressão 5 min, resfriamento ar.**



(a) e (b) deformação 5%; (c) e (d) deformação 10%; (e) e (f) deformação 20%

Fonte: Próprio autor.

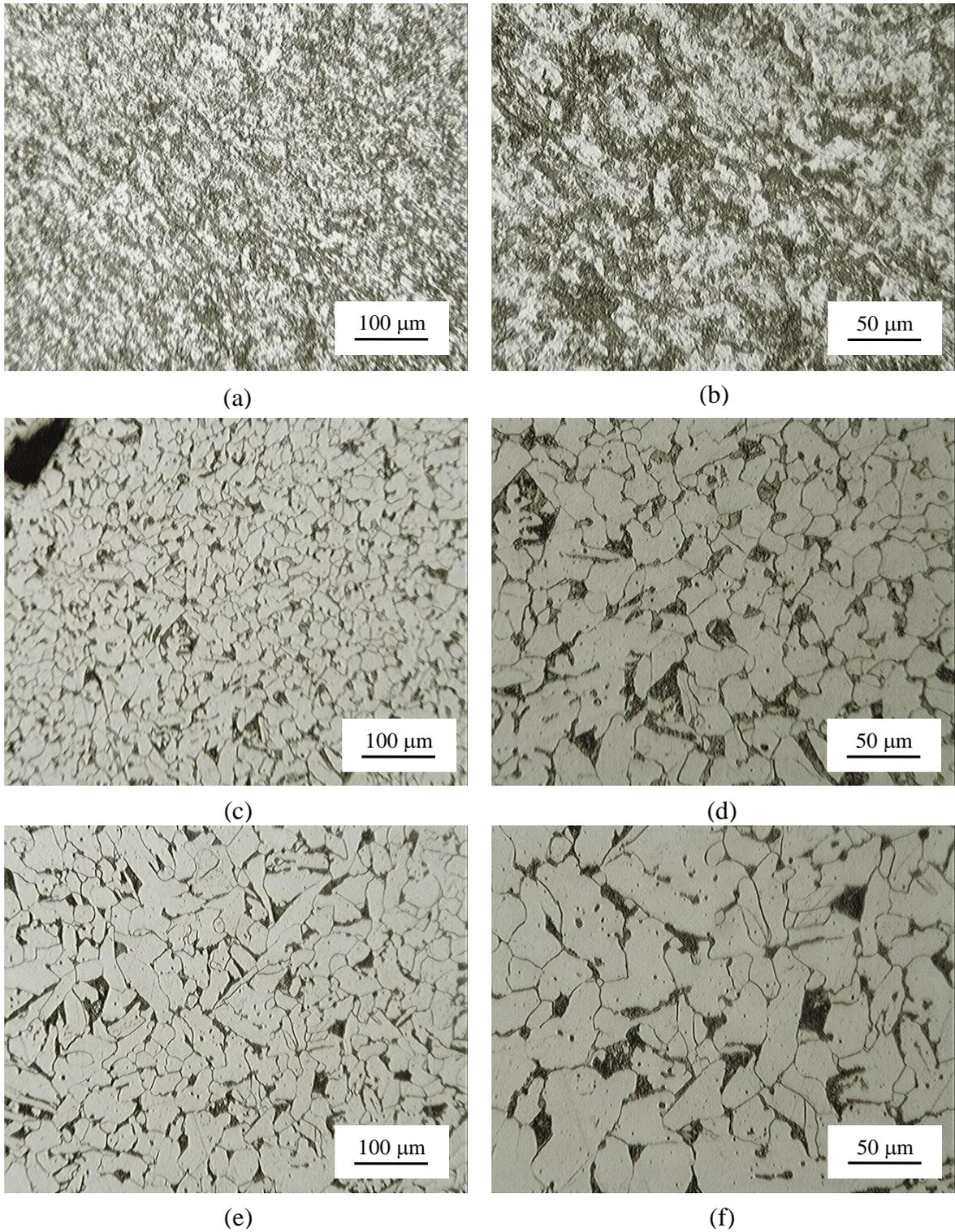
**Figura 33 - Tratamento inicial 10 min, resfriamento ar / compressão / tratamento após compressão 10 min, resfriamento ar.**



(a) e (b) deformação 5%; (c) e (d) deformação 10%; (e) e (f) deformação 20%

Fonte: Próprio autor.

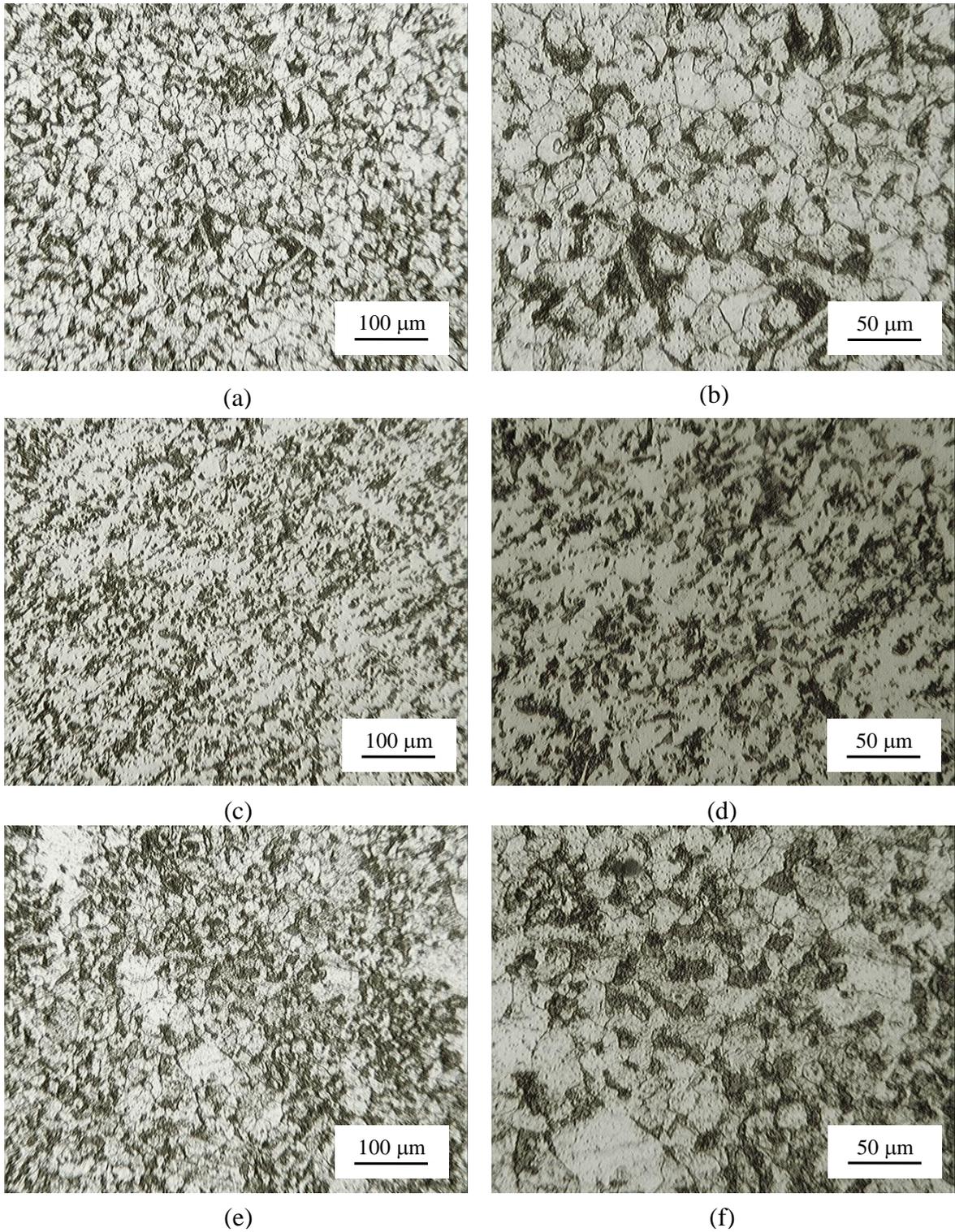
**Figura 34 - Tratamento inicial 10 min, resfriamento ar / compressão / tratamento após compressão 30 min, resfriamento ar.**



(a) e (b) deformação 5%; (c) e (d) deformação 10%; (e) e (f) deformação 20%

Fonte: Próprio autor.

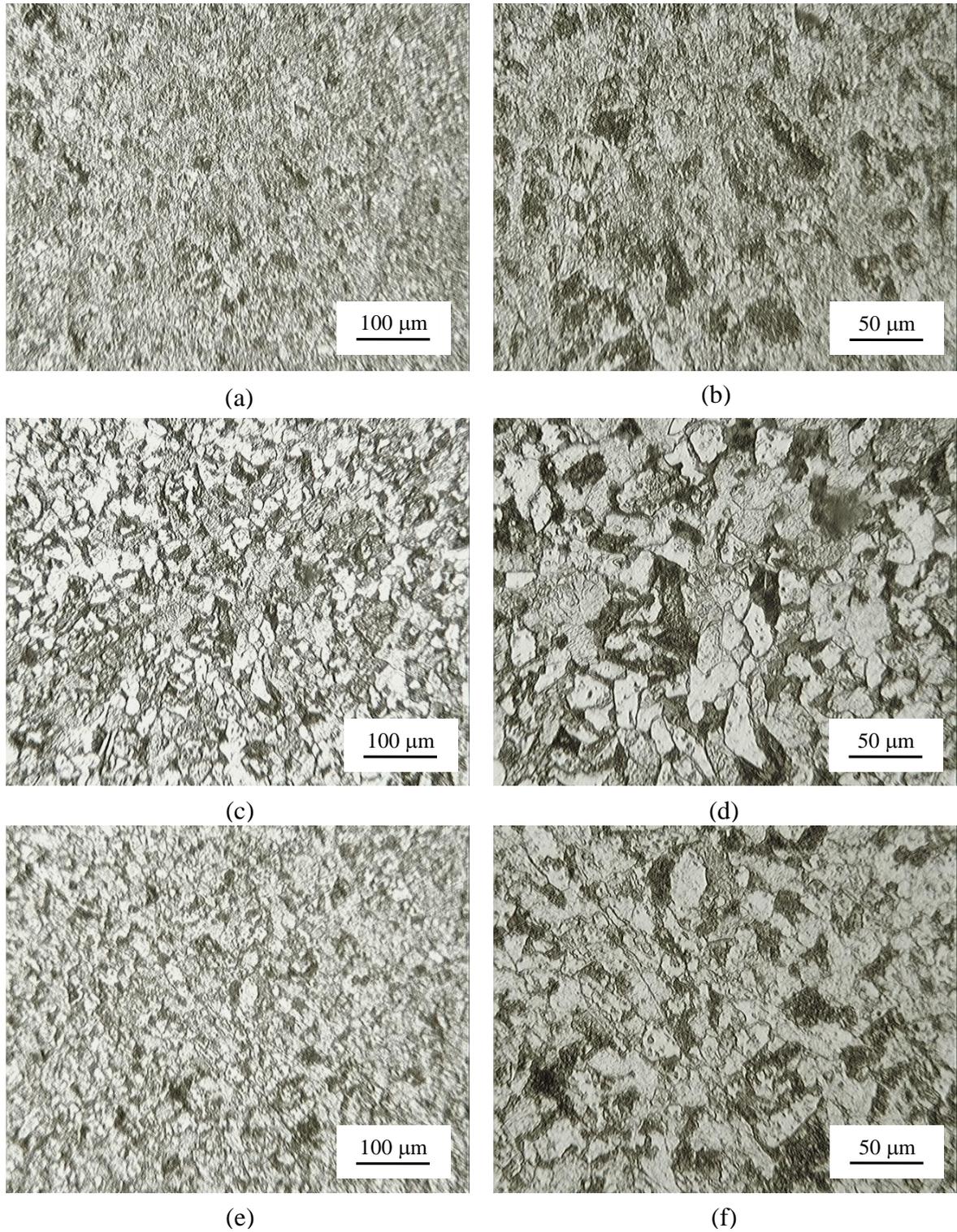
**Figura 35 - Tratamento inicial 4 h, resfriamento forno / compressão / tratamento após compressão 2 min, resfriamento ar.**



(a) e (b) deformação 5%; (c) e (d) deformação 10%; (e) e (f) deformação 20%

Fonte: Próprio autor.

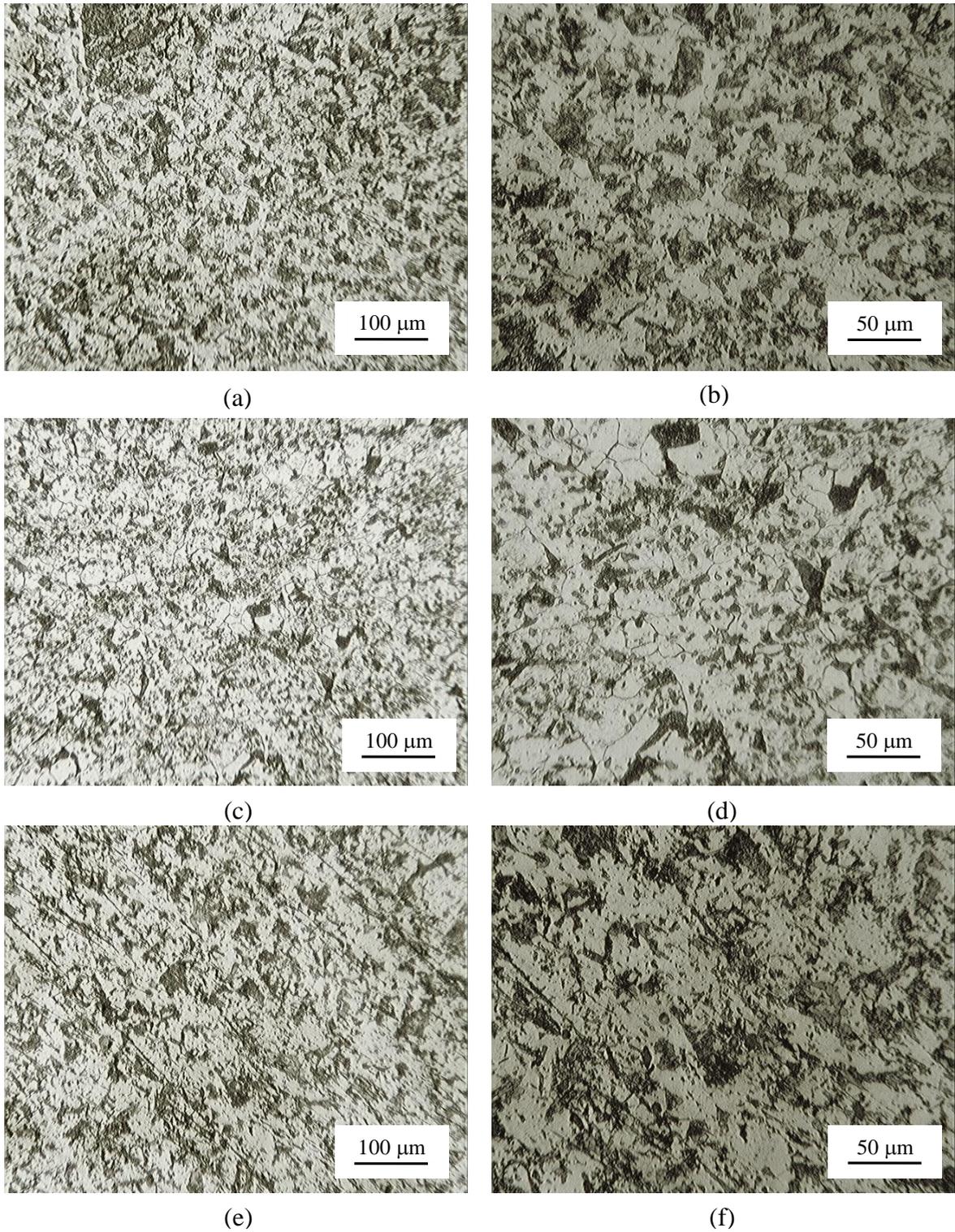
**Figura 36 - Tratamento inicial 4 h, resfriamento forno / compressão / tratamento após compressão 5 min, resfriamento ar.**



(a) e (b) deformação 5%; (c) e (d) deformação 10%; (e) e (f) deformação 20%

Fonte: Próprio autor.

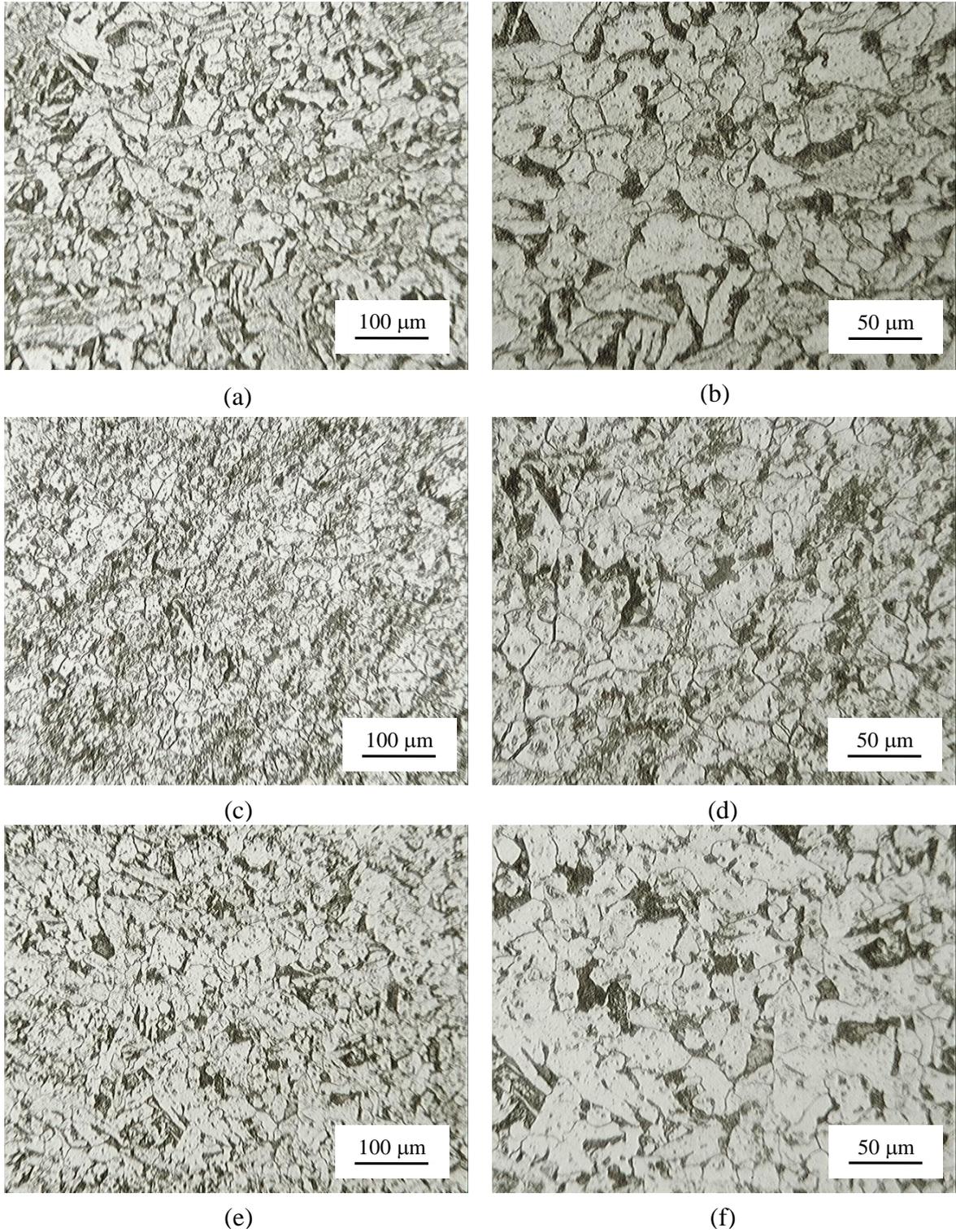
**Figura 37 - Tratamento inicial 4 h, resfriamento forno / compressão / tratamento após compressão 10 min, resfriamento ar.**



(a) e (b) deformação 5%; (c) e (d) deformação 10%; (e) e (f) deformação 20%

Fonte: Próprio autor.

**Figura 38 - Tratamento inicial 4 h, resfriamento forno / compressão / tratamento após compressão 30 min, resfriamento ar.**



(a) e (b) deformação 5%; (c) e (d) deformação 10%; (e) e (f) deformação 20%

Fonte: Próprio autor.

Verifica-se que o comportamento apresentado pelo material é similar nas duas situações: os valores de dureza diminuíram da condição somente comprimido para a condição com dois minutos de tratamento térmico após compressão. Além disso, não houve mudanças significativas na dureza após essa condição. Esperava-se que os valores de dureza reduzissem com o aumento da deformação, mas esse comportamento não está nítido. Apesar disso, essa pequena diferença de comportamento é aceitável e não deve ser considerada como um erro.

Observa-se que, tanto para a condição de menor tamanho de grão quanto para o maior tamanho, o material não apresentou grandes diferenças no tamanho de grão para as diferentes magnitudes de deformação convencional consideradas no trabalho. Esperava-se que o tamanho de grão aumentasse com o aumento da magnitude de deformação uma vez que a dureza deveria reduzir com o aumento dessa magnitude.

## 6 CONCLUSÃO

- As micrografias e a análise da composição química comprovaram que o aço utilizado realmente é o aço AISI 1020 pois apresentaram os elementos químicos e os constituintes característicos desse material.

- Considerando o modo de resfriamento e o tempo de encharque, comprovou-se que, quanto mais lento foi o resfriamento e/ou quanto maior foi o tempo de tratamento térmico, maior o tamanho de grão e menor o valor de dureza. Tal fato era esperado, uma vez que, os tratamentos térmicos utilizados no presente trabalho normalmente são empregados com o intuito de refinar e/ou homogeneizar estruturas, aliviar tensões e restituir propriedades anteriormente alteradas.

- Em relação as magnitudes de deformação, verificou-se que, quanto maior a deformação por compressão aplicada, maiores foram os resultados de dureza. Esse comportamento era esperado uma vez que, no encruamento do aço, ao aumentar a quantidade de deformação, a densidade das discordâncias também aumenta.

- Verificou-se que, os valores de dureza diminuíram da condição somente comprimido para a condição com dois minutos de tratamento térmico após compressão, e sofreram poucas mudanças após essa condição. Apesar de ser esperado uma queda na dureza, essas diferenças apresentadas são consideradas mínimas e portanto aceitáveis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÇOS PORT, 2015. Disponível em: <<http://www.acosporte.com.br/aco-sae-1020>>. Acesso em: 18 out. 2015.

AGUILAR, M.T.P.; CORRÊA, E.C.S.; MONTEIRO, W.A.; CETLIN, P.R. The effect of cyclic torsion on the dislocation structure of drawn mild steel. **Materials research**, v. 9, p. 345-348, 2006.

ASM HANDBOOK. **Properties and selection: irons, steels and high-performance alloys**. 10 ed. Volume 1. Ohio: ASM International, 1990. 1063p.

BRESCIANI FILHO, E.; SILVA, I. B.; BATALHA, G. F.; BUTTON, S. T. **Conformação plástica dos metais**. 6. ed (1 digital). Campinas: EPUSP, 2011. 258p.

CALLISTER JUNIOR, William D.. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2012. 600 p.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: estrutura e propriedades das ligas metálicas**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill Ltda., 1986. v 1. 266p.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008. 672 p. Edição revista e atualizada por André Luiz V. da Costa e Silva.

COUTINHO, C. Bottrel. **Materiais Metálicos para Engenharia**. Belo Horizonte: Qfco, 1992

DIETER, George E.. **Metalurgia Mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 660 p.

ESPÓSITO, M. A.; **Caracterização e Cinética de Recristalização da Liga de Alumínio 6063 Após Tratamentos Termomecânicos**. 2006. 82f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia Associada a Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006

GAMA, J. L. L. **Transformação de Fase em Ligas de Cobre com Memória de Forma**. 2003. 148f. Tese (Doutorado em Aplicação de Radioisótopos) – Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2003.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 365p.

- GERDAU AÇOS FINOS PIRATINI. **Manual de Aços**, 2003. Disponível em: <[http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo\\_acos\\_gerdau.pdf](http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo_acos_gerdau.pdf)>. Acesso em: 18 out. 2015.
- HOSFORD, W.F. **Mechanical behavior of materials**. New York: Cambridge University Press, 2005. 425p.
- LIMA, E. P. R. **Estudo da cinética de recristalização das ligas de alumínio AA 8011 na condição H18**. 2002. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2002
- MEYERS, M.A.; CHAWLA, K.K. **Princípios de metalurgia mecânica**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1982. 505p.
- PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia: Microestrutura e propriedades**. São Paulo: Hemus, 1997. 353 p.
- PADILHA, A. F.; F. SICILIANO JR., Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura. 2ª edição. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. São Paulo, 1996. 158 p
- PANDE, C.S., RATH, B.B, IMAM, M.A. Effect of annealing twins on Hall–Petch relation in polycrystalline materials. **Materials science and engineering A**, v. 367, p. 171-175, 2004.
- REED-HILL, Robert E.. **Princípios de Metalurgia Física**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982. 776 p.
- SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 664 p. Edição revista e ampliada.
- SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1982. 286p.
- VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. Rio de Janeiro: Campus, 1984. 568p.