

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

THIAGO CÂMARA RODRIGUES DE SOUZA

**EFEITO DA PRÉ-DEFORMAÇÃO NO TAMANHO DE GRÃO E NA DUREZA DO
AÇO AISI 1008 RECOZIDO**

BELO HORIZONTE

2014

THIAGO CÂMARA RODRIGUES DE SOUZA

**EFEITO DA PRÉ-DEFORMAÇÃO NO TAMANHO DE GRÃO E NA DUREZA DO
AÇO AISI 1008 RECOZIDO**

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 de título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Coorientador: Prof. Wanderlei Ferreira de Freitas

BELO HORIZONTE

2014

THIAGO CÂMARA RODRIGUES DE SOUZA

**EFEITO DA PRÉ-DEFORMAÇÃO NO TAMANHO DE GRÃO E NA DUREZA DO
AÇO AISI 1008 RECOZIDO**

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 de título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 24/02/2014

BANCA EXAMINADORA

Prof.a Elaine Carballo Siqueira Corrêa (orientadora)
Departamento de Engenharia de Materiais / CEFET-MG

Prof. Wanderlei Ferreira de Freitas (coorientador)
Departamento de Engenharia de Materiais / CEFET-MG

Prof. Wellington Lopes
Departamento de Engenharia de Materiais / CEFET-MG

Eng. Aline Silva Magalhães
CAPES / Pós-Graduação em Engenharia de Materiais / CEFET-MG

Dedico este trabalho a *La canhota de Dios*,
por provar que quem acredita sempre alcança!

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, que sempre me deu força e incentivo em busca da realização dos meus sonhos.

A minha querida orientadora Elaine, que sempre me cobrou ter “*força na peruca*” para a realização desse trabalho.

Ao professor Wellington, que além dos conhecimentos transmitidos em outras oportunidades contribuiu na realização de parte dos ensaios deste trabalho.

Ao meu amigo Marcelo, que em vários momentos durante a realização desse trabalho me deu apoio técnico e científico, além das risadas para descontrair durante os momentos de *stress*.

Por fim, como tinha que ter emoção aos 45 min do 2º tempo, agradeço ao meu primo Gugu e ao meu tio Marcelino por me emprestarem o computador antes da “cobrança daquele pênalti”.

RESUMO

Neste trabalho foi analisada a influencia da pré-deformação em tração no comportamento mecânico e na microestrutura do aço AISI 1008 recozido. Todas as amostras foram previamente normalizadas com a finalidade de apagar anteriores passagens termomecânicas, garantido-se a homogeneidade da microestrutura como ponto de partida para as posteriores análises. Diferentes condições foram avaliadas por meio de ensaios de dureza, microscopia óptica e determinação de tamanho médio de grão. Foram observados para tempos de encharque maiores, tamanhos médios de grão mais elevados, e, conseqüentemente, uma redução nos valores de dureza, independentemente de quão encruado se encontrava o material. Em relação a um mesmo tempo de encharque no recozimento pleno, foi verificado que os tamanhos médios de grão crescem à medida em que se têm encruamentos mais significativos.

Palavras-chave: Pré-deformação. Propriedades mecânicas e microestrutura. Tratamentos térmicos.

ABSTRACT

This work analyzed the pre - deformation influence on the mechanical behavior and microstructure of annealed AISI 1008. All samples were previously standardized in order to delete previous thermo-mechanical passages assuring the homogeneity of the microstructure as a starting point for further analysis. Different conditions were evaluated by hardness tests, optical microscopy and determination of average grain size. Were observed for larger soaking times, higher average grain sizes, and consequently a reduction in hardness values, regardless of how cold-hardened was found the material. In relation to the same soaking time in full annealing, it was found that the average grain sizes grow as far as there are more meaningful hardening.

Keywords: Pre -strain. Mechanical properties. Microstructure. Heat treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Limite de escoamento X (%) trabalho a frio.....	17
Figura 2– Limite de resistência a tração X (%) trabalho a frio	17
Figura 3– Ductilidade X (%) trabalho a frio.....	18
Figura 4 – Energia liberada durante a recuperação e recristalização X tempo.....	18
Figura 5 – Deformação (AL%) X taxas de nucleação e crescimento.....	19
Figura 6 – Deformação (AL%) X temperaturas de recristalização	20
Figura 7– Temperatura de recristalização X tempo de encharque	20
Figura 8 – Redução de área (%) X Temperatura X tempo de encharque	21
Figura 9– Redução de área (%) X energia de ativação (Qr).....	21
Figura 10 – Tempo de encharque X tamanho de grão.....	22
Figura 11 - Relação entre microestrutura, aquecimento, temperatura e propriedades	23
Figura 12 – Tamanho de grão X Dureza	23
Figura 13 - Diagrama Fe-C.....	26
Figura 14 – Estágios de transformação para aços austenitizados.....	27
Figura 15 – Diagrama esquemático de transformação para recozimento pleno.....	27
Figura 16 – Diagrama esquemático de transformação para recozimento isotérmico.....	28
Figura 17 – Constituintes do aço AISI 1008 normalizado	32
Figura 18 - Dureza X composição do aço (%C).....	32
Figura 19 – Resistência Mecânica X composição do aço (%C).....	33
Figura 20 – Ductilidade X composição do aço (%C).....	33
Figura 21–Fluxograma	35
Figura 22– Corpo de prova para caracterização (microestrutura e dureza) no estado inicial e após tratamentos térmicos	35
Figura 23– Modelo de corpo de prova para ensaio de tração	36
Figura 24– Corpo de prova para ensaio de tração	36
Figura 25 – Forno utilizado nos tratamentos térmicos	37

Figura 26 - Máquina de tração utilizada nas pré-deformações.....	38
Figura 27 - Microscópio utilizado nas caracterizações microestruturais	39
Figura 28 - Software utilizado para determinação do tamanho de grão	39
Figura 29 – Microdurômetro utilizado nos ensaios de dureza	41
Figura 30– Microestrutura do aço AISI 1008 no estado inicial	42
Figura 31– Microestrutura do aço AISI 1008 Normalizado.....	43
Figura 32– Microestrutura do aço AISI 1008 Recozido 10 min	45
Figura 33– Microestrutura do aço AISI 1008 Recozido 60 min	45
Figura 34– Microestrutura do aço AISI 1008 Recozido 300 min	45
Figura 35– Influência do tempo de encharque na Dureza e no Tamanho de Grão	46
Figura 36– Corpos de prova apenas normalizados, normalizados e pré-deformados de 10%, 20% e 30%	47
Figura 37– Microestrutura do aço AISI 1008 pré-deformado 10%	48
Figura 38 – Microestrutura do aço AISI 1008 pré-deformado 20%	48
Figura 39– Microestrutura do aço AISI 1008 pré-deformado 30%	48
Figura 40– Influência da pré-deformação na Dureza e no Tamanho de Grão	49
Figura 41 – Micrografia de diferentes pré-deformações no recozimento pleno 10 min	52
Figura 42– Micrografia de diferentes pré-deformações no recozimento pleno 60 min	52
Figura 43– Micrografia de diferentes pré-deformações no recozimento pleno 300 min	53
Figura 44– Dureza X tamanho de grão X % pré-deformação no recozimento 10 min	54
Figura 45– Dureza X tamanho de grão X % pré-deformação no recozimento 60 min	54
Figura 46– Dureza X tamanho de grão X % pré-deformação no recozimento 300 min	55
Figura 47– Micrografia de aço AISI 1008 10% pré-deformado para diferentes tempos de encharque.....	57
Figura 48– Micrografia de aço AISI 1008 20% pré-deformado para diferentes tempos de encharque.....	57
Figura 49– Micrografia de aço AISI 1008 30% pré-deformado para diferentes tempos de encharque.....	58

Figura 50– Dureza X Tamanho de Grão médio X tempo de encharque para amostras 10% pré-deformadas.....	59
Figura 51– Dureza X Tamanho de Grão médio X tempo de encharque para amostras 20% pré-deformadas.....	60
Figura 52– Dureza X Tamanho de Grão médio X tempo de encharque para amostras 30% pré-deformadas.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Velocidades de resfriamento referente a diversos meios.....	15
Tabela 2 – Efeito da agitação do meio sobre a velocidade de resfriamento.....	16
Tabela 3 – Tratamentos típicos de alívio de tensões em diversos tipos de aços	25
Tabela 4 – Principais grupos de aplicação dos aços	30
Tabela 5 – Classificação dos aços conforme ABNT	31
Tabela 6 – Análise Química do aço AISI 1008	34
Tabela 7 – Condições aplicadas dos tratamentos térmicos realizados	36
Tabela 8 - Exemplo da coleta de dados de áreas de contorno de grão para uma condição qualquer	40
Tabela 9 – Dureza (HV) no estado inicial	42
Tabela 10 – Dureza (HV) do aço SAE 1008 Normalizado	43
Tabela 11 – Dureza (HV) do aço AISI 1008 recozido	44
Tabela 12– Dureza (HV) do aço AISI 1008 pré-deformado	47
Tabela 13 – Dureza (HV) X % pré-deformação no recozimento pleno 10 min.....	50
Tabela 14– Dureza (HV) X % pré-deformação no recozimento pleno 60 min.....	50
Tabela 15– Dureza (HV) X % pré-deformação no recozimento pleno 300 min.....	51
Tabela 16 – Dureza (HV) X tempo de encharque na deformação de 10%	55
Tabela 17– Dureza (HV) X tempo de encharque na deformação de 20%	56
Tabela 18 – Dureza (HV) X tempo de encharque na deformação de 30%	56

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 Objetivos Gerais	13
2.2 Objetivos Específicos	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1 Fenômenos Observados no Aquecimento dos Materiais Metálicos	14
3.2 Tratamentos Térmicos	24
3.2.1 Recozimento	24
3.2.1.1 Recozimento para alívio de tensões.....	25
3.2.1.2 Recozimento de recristalização	25
3.2.1.3 Recozimento pleno ou supercrítico	26
3.2.1.4 Recozimento isotérmico	28
3.2.1.5 Recozimento de esferoidização	28
3.2.1.6 Recozimento em caixa.....	29
3.2.2 Normalização.....	29
3.3 Características Gerais do Aço	29
3.3.1 O Aço AISI 1008.....	30
4. MATERIAL E MÉTODOS	34
4.1 Material.....	34
4.2 Descrição Geral do Trabalho Desenvolvido.....	34
4.3 Corpos de prova.....	34
4.4 Tratamentos Térmicos	36
4.5 Deformação Plástica	37
4.6 Caracterização Microestrutural.....	38
4.7 Caracterização Mecânica.....	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1 Caracterização do Material no Estado Inicial	42
5.2 Caracterização do Material após Realização de Normalização	43
5.3 Caracterização do Material após Realização dos Recozimentos Plenos	44
5.4 Caracterização do Material Pré-deformado	46
5.5 Caracterização dos Materiais Pré-deformados Recozidos	50
6. CONCLUSÃO.....	62
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1. INTRODUÇÃO

Os aços são os materiais metálicos mais solicitados no ramo industrial, pois podem apresentar uma diversidade de propriedades e características de desempenho a custos relativamente baixos quando comparados com os metais não ferrosos e as outras classes de materiais. Alguns campos de aplicação são: aços baixo carbono para conformação mecânica, aços estruturais para caldeiras, vasos de pressão e tubulações, vergalhões para concreto, chapas e perfis estruturais, aços para construção mecânica, entre outros.

Tantas aplicações aliadas ao baixo custo de produção do aço são possíveis devido à disponibilidade da matéria prima, o minério de ferro, na crosta terrestre. (SILVA E MEI, 2010). Em adição a esse fator, menciona-se a possibilidade de realização de tratamentos térmicos diversos, proporcionando, em maior ou menor escala, a alteração da estrutura dos aços e, conseqüentemente, de suas propriedades. Os fatores que diferem um tratamento térmico de outro e influenciam as estruturas a serem formadas e suas respectivas propriedades são o aquecimento (taxa), o tempo de encharque, a atmosfera e o resfriamento (taxa e meio). (CHIAVERINI, 2008). Outra maneira de modificar as propriedades e a estrutura dos aços é através do trabalho frio, que tem por conseqüência o chamado encruamento. Esse fenômeno, por sua vez, consiste no aumento da resistência mecânica com a deformação plástica a frio, devido à diminuição da capacidade de movimentação das discordâncias, que aumentam em quantidade e interagem entre si e com outras barreiras estruturais (DIETER, 1986).

Dentro deste contexto, neste trabalho foram avaliados os efeitos da aplicação de deformação plástica a frio anterior ao tratamento térmico de recozimento pleno na microestrutura e na dureza de um aço de baixo teor de carbono.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral do trabalho foi analisar os efeitos da pré-deformação em tração no aço AISI 1008 recozido em diferentes condições.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar os efeitos do tempo de encharque no recozimento na microestrutura e na dureza do aço AISI 1008 previamente normalizado.
- Analisar os efeitos da pré-deformação em tração na microestrutura e na dureza do aço AISI 1008 previamente normalizado.
- Verificar a influência da pré-deformação em tração na microestrutura e na dureza do aço AISI 1008 previamente normalizado após recozimento com diferentes tempos de encharque (10 min, 60 min e 300 min).
- Observar os efeitos da magnitude da pré-deformação em tração nos resultados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fenômenos Observados no Aquecimento dos Materiais Metálicos

Define-se como tratamento térmico o aquecimento e/ou resfriamento controlado dos materiais visando, assim, monitorar, induzir e proporcionar as características, microestruturas e propriedades desejáveis ao produto pós-tratamento. Apenas em alguns tratamentos térmicos específicos são observadas mudanças microestruturais, exigindo-se, então, quando for o caso, uma solubilização parcial e/ou completa do material. Para os demais tratamentos térmicos são verificadas alterações somente nas propriedades finais, devido a mudanças na forma e na distribuição das fases e no tamanho de grão. Porém, é importante destacar que não há qualquer alteração na composição química do material que esteja envolvido em alguns dos diversos tratamentos termofísicos existentes (VAN VLACK, 2000).

Alguns dos objetivos mais comuns alcançados através dos diversos tratamentos térmicos são:

- remoção de tensões residuais,
- aumento ou diminuição da dureza,
- aumento de ductilidade,
- melhora de usinabilidade,
- melhora da resistência ao desgaste,
- melhora da resistência à corrosão,
- melhora da resistência ao calor,
- modificação das propriedades elétricas e magnéticas e
- refinamento dos grãos.

Para alcançar os objetivos citados anteriormente é de fundamental importância o conhecimento e o controle dos parâmetros de processo dos tratamentos térmicos, pois uma vez monitorados os parâmetros, têm-se, conseqüentemente, maior uniformidade das características do material, garantindo a qualidade do mesmo. Apresentam-se como parâmetros de processo dos tratamentos térmicos:

- taxa de aquecimento,
- tempo de manutenção da temperatura (tempo de encharque),
- atmosfera e
- taxa de resfriamento e/ou meio de resfriamento.

Dentre os parâmetros citados, a taxa de aquecimento se torna crítica nos casos em que há tensões internas e/ou residuais no material, de maneira que uma taxa de aquecimento elevada favorece o empenamento e o aparecimento de fissuras.

O tempo de encharque se refere ao tempo de manutenção na temperatura do tratamento realizado. No caso de excesso no tempo de tratamento pode ocorrer, além de uma completa dissolução de eventuais precipitados, um crescimento exagerado dos grãos, alterando as propriedades desejadas.

O controle da atmosfera do forno é de fundamental importância, buscando evitar a oxidação dos materiais e, no caso específico dos aços, também a descarbonetação da superfície dos mesmos, garantindo, assim, a não necessidade de limpeza e dureza suficiente para as aplicações necessárias.

O tipo de resfriamento e sua taxa se apresentam como o parâmetro de processo mais importante a ser controlado, pois o mesmo é quem determina quais as possíveis microestruturas a serem formadas, de acordo com o tipo de resfriamento e sua respectiva taxa. Os resfriamentos mais comuns ocorrem no próprio forno, no ar ou ainda em meios líquidos, tais como água, soluções aquosas e óleo, com ou sem agitação, essas últimas situações associadas ao tratamento térmico de tempera nos aços. A tabela 1 indica alguns meios de resfriamento para o tratamento térmico de aços e suas respectivas taxas, de acordo com o diâmetro das amostras. Já a tabela 2 evidencia a diferença da agitação nas taxas de resfriamento (CHIAVERINI, 2008).

Tabela 1– Velocidades de resfriamento referente a diversos meios

Meio de resfriamento	Velocidade Relativa de Resfriamento para Diâmetros de:		
	1"	2"	3"
O mais drástico (teórico)	1,23	0,30	0,14
Água em agitação	1,00	0,27	0,13
Óleo em agitação	0,40	0,18	0,093
Corrente de ar	0,032	0,0157	0,0102
Ar tranqüilo	0,0152	0,0075	0,0048

Fonte: adaptado de CHIAVERINI, 2008.

Existem alguns fenômenos característicos do aquecimento dos materiais, como a recuperação, a recristalização e o crescimento de grão. Um ou mais desses fenômenos podem integrar tratamentos térmicos diversos, conforme a finalidade de cada tratamento.

Tabela 2 – Efeito da agitação do meio sobre a velocidade de resfriamento

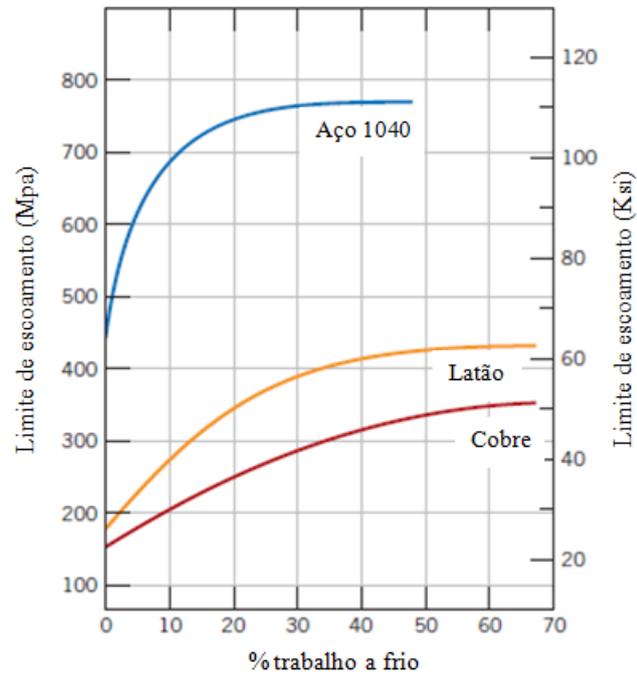
Estado do meio de resfriamento	Óleo a 60°C	Água a 20°C	Salmoura a 20°C
Nenhuma circulação do líquido ou agitação da peça	1,23	0,30	0,14
Circulação ou agitação moderada	1,00	0,27	0,13
Boa circulação	0,40	0,18	0,093
Circulação forte	0,032	0,0157	0,0102
Circulação violenta	0,0152	0,0075	0,0048

Fonte: Adaptado de CHIAVERINI, 2008.

O primeiro fenômeno que se observa é o da recuperação. Materiais deformados plasticamente a frio, ou seja, encruados, apresentam aumento em sua resistência mecânica (limites de escoamento e de resistência a tração), resistência elétrica e dureza, porém perdem ductilidade. As figuras 1, 2 e 3 mostram algumas dessas relações para 3 materiais: o aço 1040, o Latão e o Cobre. Sabe-se que materiais encruados possuem energia livre maior que materiais não deformados plasticamente a frio, energia essa proveniente das discordâncias que surgiram no momento do encruamento. O fenômeno de recuperação visa exatamente “devolver” ao material sua condição inicial de menor energia, por meio da reorganização dessas descontinuidades em linha em posições de menor energia, fenômeno denominado poligonização (REED-HILL, 1982).

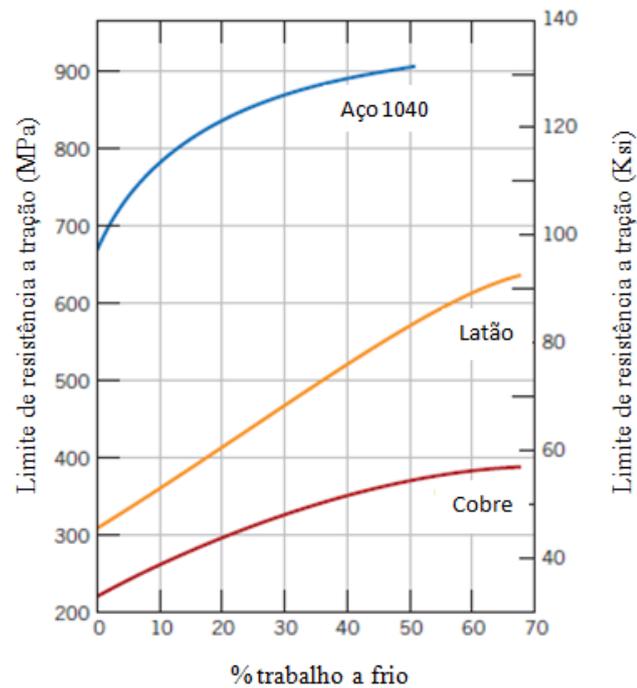
Outro fenômeno observado é o de recristalização, que ocorre em seqüência ao da recuperação. Na recristalização trabalha-se com faixas de temperaturas bem superiores, próximas à 50% da temperatura de fusão dos materiais. Define-se como temperatura de recristalização a temperatura na qual um material com determinada porcentagem de deformação a frio se recristalizará totalmente em um intervalo normalmente de 1 hora (REED-HILL, 1982). A cinética das etapas citadas anteriormente, recuperação e recristalização, são bem distintas, conforme podemos verificar na figura 4, que corresponde ao recozimento isotérmico de cobre de alta pureza.

Figura 1 – Limite de escoamento X (%) trabalho a frio



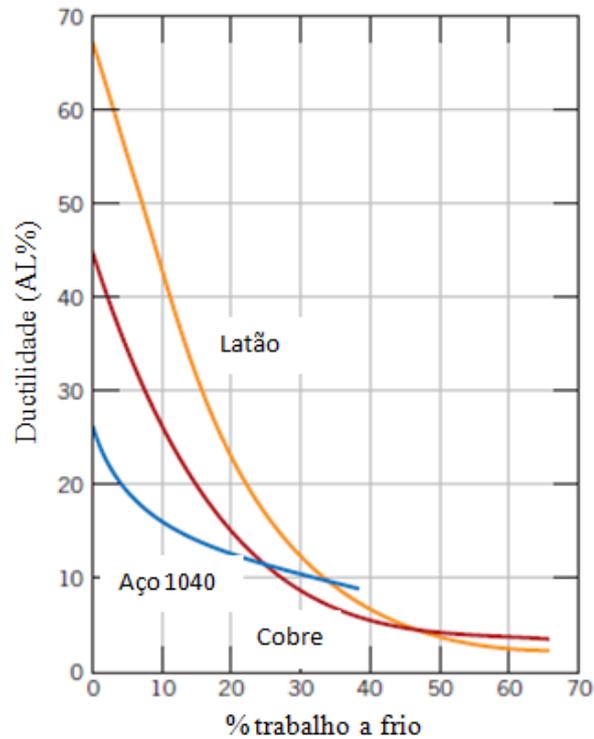
Fonte: adaptado de CALLISTER, 2002.

Figura 2– Limite de resistência a tração X (%) trabalho a frio



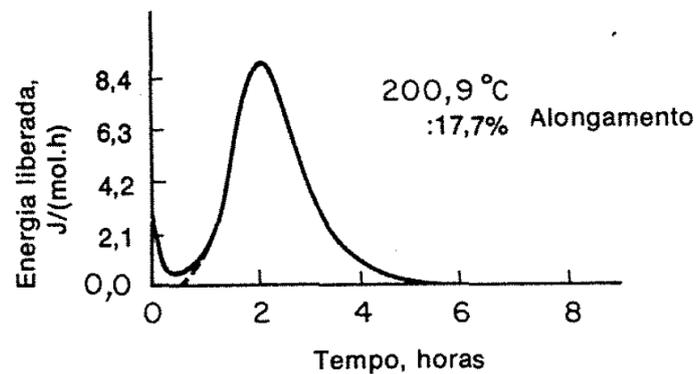
Fonte: adaptado de CALLISTER, 2002.

Figura 3– Ductilidade X (%) trabalho a frio



Fonte: adaptado de CALLISTER, 2002.

Figura 4 – Energia liberada durante a recuperação e recristalização X tempo



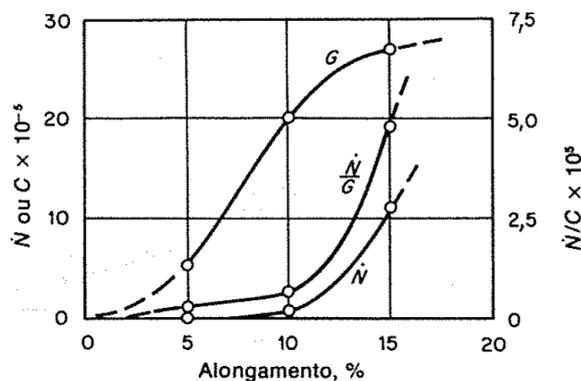
Fonte: REED-HILL, 1982.

Considerando ainda a figura 4, a energia envolvida no fenômeno de recuperação é a região que está a esquerda da linha tracejada, que refere-se ao início da recristalização, e abaixo da linha cheia. Verifica-se nessa região que a inclinação da curva é sempre negativa, ou seja, desde o início do aquecimento tem-se uma mobilidade das discordâncias contrária a

aquela presente durante o encruamento, que decresce ao longo do tempo. Já o processo de recristalização apresenta uma cinética bem diferente. Primeiramente ocorre o processo de nucleação, seguido de crescimento do(s) grão(s). Tem-se num primeiro momento baixas taxas de nucleação e crescimento, seguidas de um aumento considerável até chegar ao ápice, onde em seguida apresenta uma queda nas respectivas taxas. No gráfico, a energia de recristalização refere-se à região à direita da linha tracejada e abaixo da curva cheia.

Na figura 5 observa-se a relação da porcentagem de deformação com as taxas de nucleação (N) e crescimento (C) no fenômeno de recristalização.

Figura 5 – Deformação (AL%) X taxas de nucleação e crescimento



Fonte: REED-HILL, 1982.

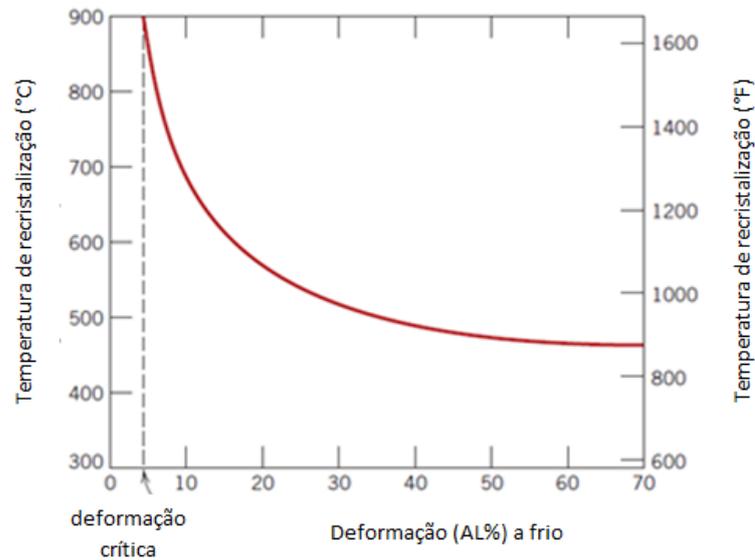
Verifica-se que para pequenas taxas de encruamento a velocidade de crescimento se sobrepõe à de nucleação, que é praticamente nula. No caso acima, a partir de um alongamento de 10%, percebe-se considerável velocidade de nucleação.

A nucleação está diretamente ligada não só à porcentagem de deformação, mas também ao tamanho de grão inicial. Quanto menor é o tamanho de grão inicial, maior é a área proporcional ao contorno de grão. Sendo o contorno de grão a região mais energética do grão devido às distorções sofridas pelo mesmo ao atuar no sentido contrário à movimentação da discordâncias, tem-se no contornos de grão pontos de maior concentração de energia, que favorecem assim a nucleação, caracterizando a chamada nucleação heterogênea (REED-HILL, 1982).

A figura 6 ilustra a influência do grau de deformação sofrido pelo material na temperatura necessária para que aconteça o fenômeno da recristalização do mesmo. Percebe-se a indicação de uma deformação crítica (mínima) necessária que favorece a realização do tratamento térmico de recristalização. Deformações inferiores à crítica inviabilizam o

tratamento. Quanto mais deformado o material se encontra, menor é a temperatura necessária para que aconteça a recristalização (CALLISTER, 2002).

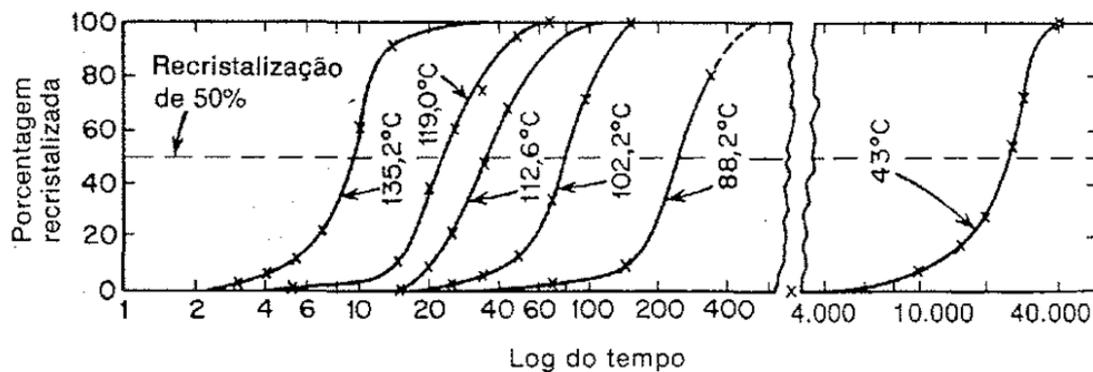
Figura 6 – Deformação (AL%) X temperaturas de recristalização



Fonte: adaptado de CALLISTER, 2002.

A figura 7 evidencia a influência da temperatura no processo de recristalização para o cobre puro (99,999%Cu) laminado a frio 98%. Temperaturas mais elevadas otimizam os processos de nucleação e crescimento, reduzindo-se o tempo de encharque.

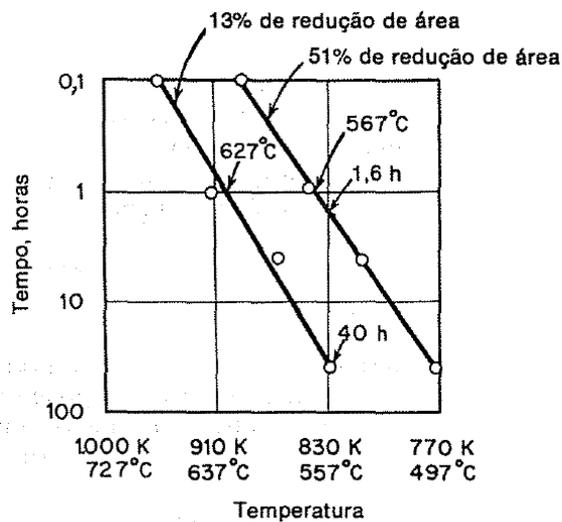
Figura 7– Temperatura de recristalização X tempo de encharque



Fonte: REED-HILL, 1982.

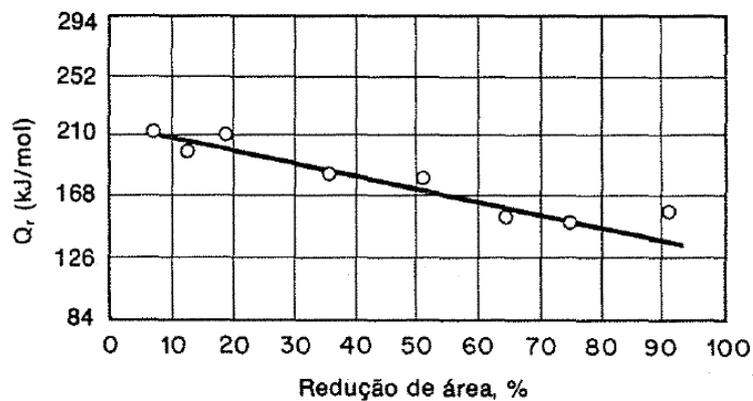
A figura 8 exemplifica o efeito do grau de deformação sofrido pelo material com a temperatura e/ou o tempo necessários para que aconteça o fenômeno da recristalização do mesmo. Neste caso são realizadas duas deformações a frio, 13% e 51%, para o zircônio. Percebe-se que para uma mesma temperatura o material que apresenta maior deformação prévia gasta um tempo menor para finalizar sua recristalização, ou seja, há uma relação entre a energia de ativação e o grau de deformação sofrido pelo material, conforme figura 9 (REDD-HILL, 1982).

Figura 8 – Redução de área (%) X Temperatura X tempo de encharque



Fonte: REED-HILL, 1982.

Figura 9– Redução de área (%) X energia de ativação (Q_r)

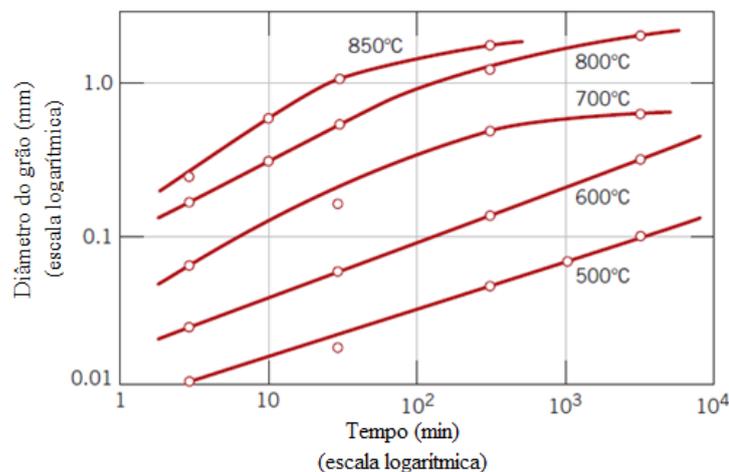


Fonte: REED-HILL, 1982.

O último fenômeno observado no aquecimento dos materiais metálicos é o crescimento de grão. Uma vez encerrado o fenômeno da recristalização, ou seja, a nucleação e o crescimento de grão característicos, ocorre com a manutenção da temperatura (encharque) o favorecimento do crescimento dos grãos já recristalizados, conseqüentemente, acarretando na diminuição do número de grãos totais, através do coalescimento dos contornos de grão. Esse coalescimento proporciona uma redução da área do contorno de grão em relação ao grão como um todo, e, com isso, a energia total de superfície decresce (REED-HILL, 1982).

A figura 10 retrata a influência da temperatura no tamanho de grão para um determinado tempo. Verifica-se que quanto maior a temperatura de trabalho, para um mesmo tempo, maior é o tamanho de grão alcançado, pois há uma maior mobilidade atômica por difusão e interação entre os contornos de grãos (CALLISTER, 2002).

Figura 10 – Tempo de encharque X tamanho de grão



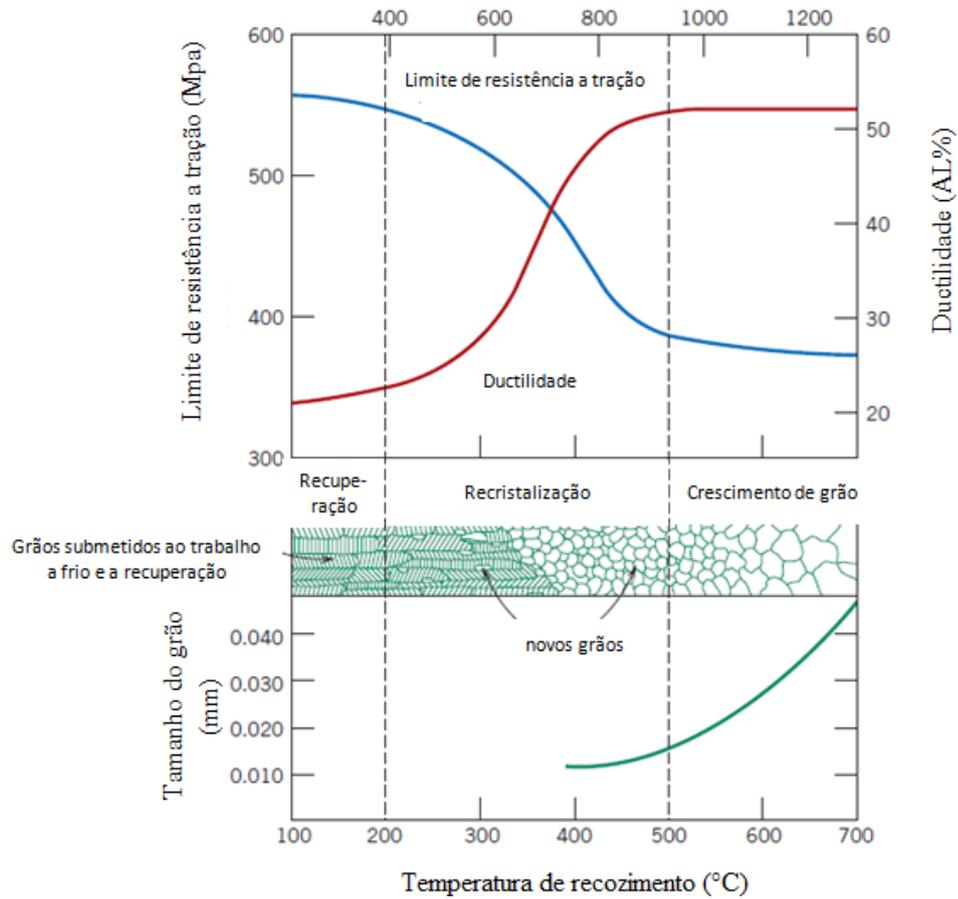
Fonte: adaptado de CALLISTER, 2002.

A figura 11 mostra uma representação esquemática da microestrutura de um material durante os fenômenos descritos que ocorrem durante o aquecimento (recuperação, recristalização e crescimento de grão), e a relação dessas estruturas (forma, tamanho) com algumas propriedades como limite de resistência a tração, ductilidade, tamanho de grão e parâmetros como a temperatura de recozimento.

Considerando como exemplo o aço, para uma mesma composição química, porém tempos de encharque diferentes, são obtidos tamanhos de grão diferentes, que conseqüentemente geram uma variação nas propriedades. A figura 12 evidencia a diferença na

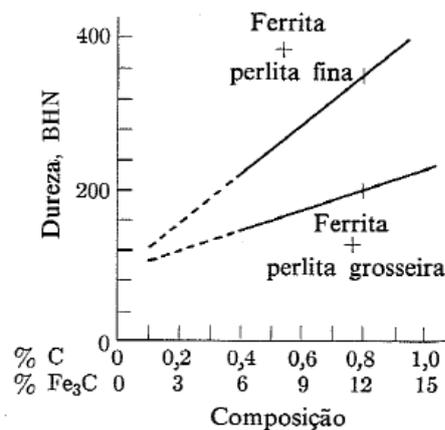
magnitude da dureza devido a tamanhos de grão distintos. A perlita mais fina e mais dura resulta de um resfriamento mais rápido ou de um tempo de encharque menor.

Figura 11 - Relação entre microestrutura, aquecimento, temperatura e propriedades



Fonte: adaptado de CALLISTER, 2002.

Figura 12 – Tamanho de grão X Dureza



Fonte: VAN VLACK, 2000.

3.2 Tratamentos Térmicos

Existem diversos tipos de tratamentos térmicos que trabalham com amplas faixas de temperatura, podendo ou não apresentar mudanças de fase, alívio de tensões, recristalização, aumento de tamanho de grão, diferentes tipos de resfriamento, além de variadas taxas de resfriamento, dependendo de sua finalidade. Os tratamentos podem ser aplicados a materiais metálicos diversos. No entanto, uma vez que o presente trabalho envolve um aço de baixo teor de carbono, o enfoque teórico será nos tratamentos de ligas Fe-C.

Os principais tratamentos térmicos utilizados são:

- recozimento,
- normalização,
- têmpera,
- revenimento.

No presente trabalho, dedica-se um tópico especial para o recozimento e um para a normalização, uma vez que os mesmos foram realizados no desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso.

3.2.1 Recozimento

O recozimento visa remover os efeitos de processamento mecânico e/ou térmico realizado anteriormente, obtendo-se, assim, maior ductilidade e menor dureza do material, melhorando ainda a usinabilidade do aço. Através desse tratamento o material está mais susceptível a deformações plásticas a frio (COLPAERT, 2008).

O procedimento consiste em aquecimento até determinada temperatura, dependendo do tipo de recozimento que for realizado, que pode ou não apresentar transformações de fase; tempo de encharque, no qual o material permanece na temperatura estabelecida para que as transformações aconteçam, e de resfriamento lento, no forno. A temperatura a ser utilizada depende não só do tipo de recozimento a ser realizado, mas também do tipo de metal e seu estado inicial. Em relação ao tempo de encharque devem-se levar em consideração as dimensões do material a ser tratado termicamente.

Têm-se como tipos de recozimento:

- recozimento para alívio de tensões,
- recozimento de recristalização,

- recozimento pleno ou supercrítico,
- recozimento isotérmico,
- recozimento de esferoidização e
- recozimento em caixa.

3.2.1.1 Recozimento para alívio de tensões

No recozimento para alívio de tensões trabalha-se com temperaturas na faixa de 500-800°C, de acordo com a composição do aço, no qual o objetivo é recuperar o material, ou seja, atenuar as tensões existentes de processos anteriores através de um rearranjo de sua subestrutura. O aquecimento é lento, ou seja, trabalha-se com pequenas taxas de aquecimento evitando-se, assim, a introdução de tensões adicionais, e pode ser aplicado para qualquer material metálico. A tabela 3 informa sobre tratamentos de alívio de tensões de alguns aços, as respectivas temperaturas de transformação e o tempo em que foi aplicado (CHIAVERINI, 2008).

Tabela 3 – Tratamentos típicos de alívio de tensões em diversos tipos de aços

Tipo de aço	Temperatura °C	Tempo, horas por polegada de secção
Aço com 0,35% C, com menos de 3/4" de secção	alívio de tensões geralmente desnecessário	
Aço com 0,35% C, com 3/4" ou mais de secção	595° a 675°C	1
Aço com mais que 0,35% C, com menos de 1/2" de secção	alívio de tensões geralmente desnecessário	
Aço com mais que 0,35% C, com 1/2" ou mais de secção	595° a 675°C	1
Aço C-Mo, com menos que 0,20% C (qualquer espessura)	595° a 675°C	2
Aço C-Mo, com 0,20 a 0,35% C (qualquer espessura)	675° a 760°C	3 a 2
Aço Cr-Mo, com 2% Cr e 0,5% Mo (qualquer espessura)	720° a 745°C	2
Aço Cr-Mo, com 2,25% Cr, 1% Mo e 5% Cr, 0,5% Mo (qualquer espessura)	730° a 760°C	3
Aço Cr-Mo com 9% Cr e 1% Mo (qualquer espessura)	745° a 775°	3
Aços inoxidáveis 410 e 430 (qualquer espessura)	775° a 800°	2
Aços inoxidáveis 309 e 310 (com secção superior a 3/4")	870°C	2

Fonte: adaptado de CHIAVERINI, 2008.

3.2.1.2 Recozimento de recristalização

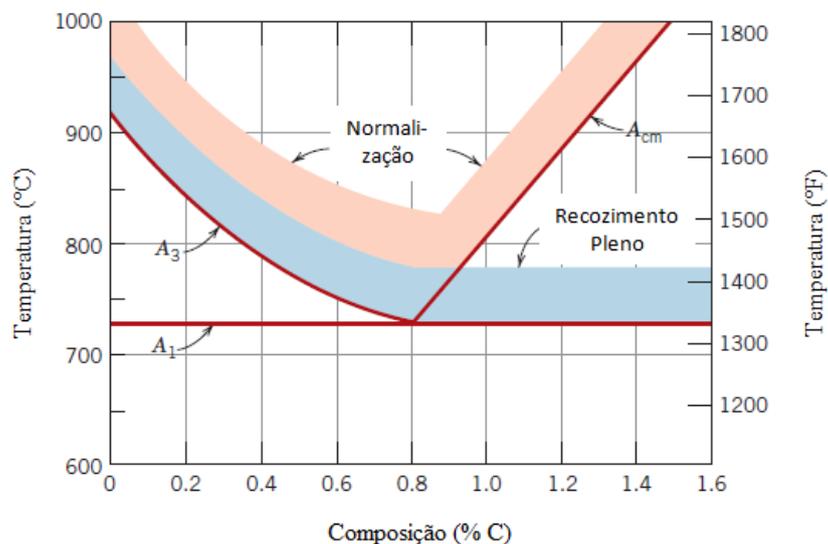
No recozimento para recristalização trabalha-se com temperaturas logo abaixo de A_1 , que representa a temperatura eutetóide (figura 13), visando o fenômeno de recristalização, no

qual se formam novos e finos grãos que proporcionam um ganho de ductilidade ao material. O resfriamento é lento, no forno, e atenção especial deve ser dada ao tempo de encharque, pois, quanto maior esse tempo, maiores serão os tamanhos de grão obtidos pelo tratamento. Pode ser aplicado para qualquer material metálico.

3.2.1.3 Reozimento pleno ou supercrítico

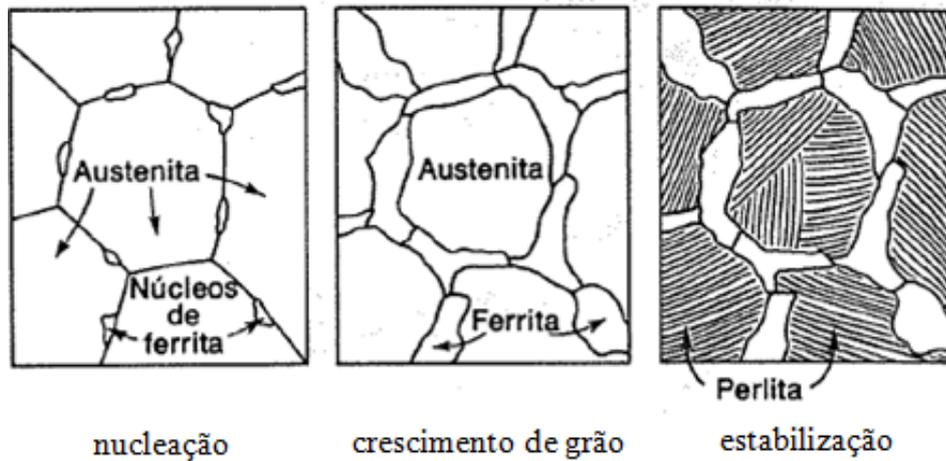
No reozimento pleno, diferentemente dos reozimentos apresentados acima, têm-se a austenitização parcial ou completa do material, ou seja, ocorrem mudanças de fase que permitem um *restart* no histórico do material, ou seja, apagam-se todas as passagens termomecânicas até então existentes. Para isso, trabalha-se normalmente com temperaturas até 50°C acima da temperatura crítica, linha A₃ para aços hipoeutetóides e A₁ para os hipereutetóides, como pode ser visualizado no diagrama de Fe-C na figura 13. Verificam-se os fenômenos de recristalização e crescimento de grão, que permitem ganhos em ductilidade do material. Este tratamento é aplicável apenas em materiais que são passíveis de mudança de fase, no caso do aço ocorrem nucleação e crescimento de grãos austeníticos e/ou ferríticos, como mostra a figura 14. Tem-se como resultado do tratamento ferrita e perlita grosseira para aços hipoeutetóides, perlita grosseira para os aços eutetóides e perlita grosseira e cementita para aços hipereutetóides. A figura 15 demonstra um diagrama esquemático do reozimento pleno (CHIAVERINI, 2008).

Figura 13 - Diagrama Fe-C



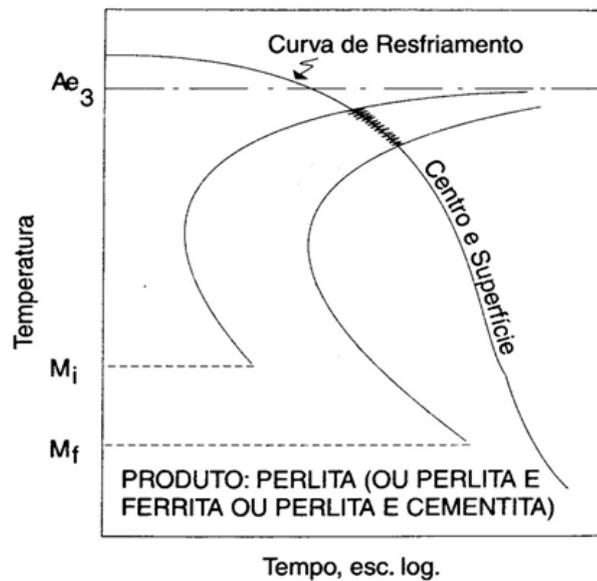
Fonte: adaptado de CALLISTER, 2002.

Figura 14 – Estágios de transformação para aços austenitizados



Fonte: adaptado de REED-HILL, 1982.

Figura 15 – Diagrama esquemático de transformação para recozimento pleno



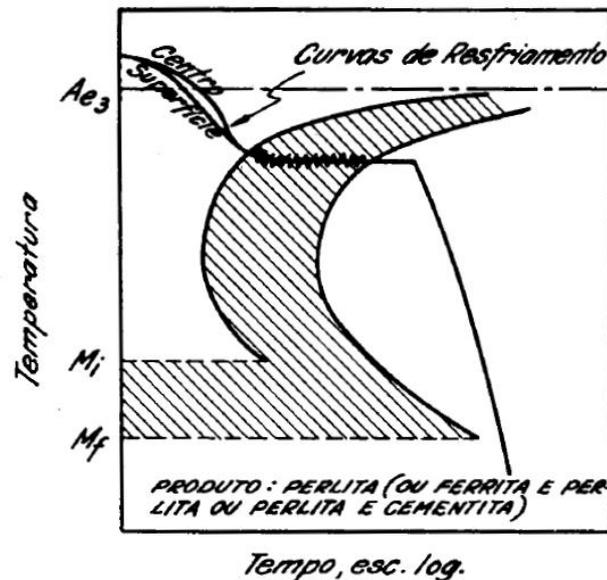
Fonte: adaptado de CHIAVERINI, 2008.

A austenitização parcial ou completa é acompanhada de um resfriamento lento, no forno, ou seja, trabalha-se com taxas de resfriamento pequenas, que proporcionam uma transformação de fases com menor índice de tensão entre os grãos formados, além de maximizar os tamanhos dos mesmos.

3.2.1.4 Recozimento isotérmico

O recozimento isotérmico é similar ao recozimento pleno, com pequenas distinções. Assim como no recozimento pleno, trabalha-se com temperaturas acima de A_1 e/ou A_3 , dependendo da composição do aço, garantindo-se a austenitização parcial e/ou completa. As particularidades relativas ao recozimento isotérmico são um resfriamento rápido até uma temperatura situada dentro da faixa superior do diagrama de transformação isotérmico, a manutenção dessa temperatura durante todo o tempo de encharque, e um resfriamento rápido logo após finalizada a transformação. Os produtos desse tratamento térmico são os mesmos daqueles apresentados no recozimento pleno, porém têm-se maior uniformidade na estrutura final. A figura 16 mostra o diagrama esquemático de transformação para recozimento isotérmico (CHIAVERINI, 2008).

Figura 16 – Diagrama esquemático de transformação para recozimento isotérmico



Fonte: adaptado de CHIAVERINI, 1984.

3.2.1.5 Recozimento de esferoidização

O recozimento de esferoidização visa melhorar a usinabilidade e a ductilidade dos aços hipereutetóides através da modificação da morfologia da cementita. Assim, à medida que a transformação ocorre, observa-se a quebra das lamelas de cementita (oriundas da perlita) e coalescimento das mesmas, que se tornam mais globulares, o que favorece o produto final,

uma vez que essa forma apresenta a menor relação área/volume. Pode-se ter um ciclo de aquecimento e resfriamento subsequente próximos à temperatura crítica ou aquecimento prolongado a uma temperatura inferior à crítica.

3.2.1.6 Recozimento em caixa

O recozimento em caixa refere-se ao tratamento térmico em que o material fica completamente vedado em um recipiente que tem a função de protegê-lo, evitando a oxidação do material enquanto o mesmo se transforma. Normalmente, para o aço, trabalha-se com temperatura na faixa de 600°-700°C, abaixo da temperatura crítica (CHIAVERINI, 2008).

3.2.2 Normalização

Assim como no recozimento pleno, no tratamento térmico de normalização para os aços envolve a austenitização do material, apagando todas as passagens termomecânicas presentes previamente objetivando, no entanto, a homogeneidade da microestrutura e o refino do grão. A figura 13 ilustra no diagrama Fe-C as faixas de temperatura recomendadas para os tratamentos de normalização e recozimento pleno de acordo com % C. Verifica-se nessa figura que para os aços hipereutetóides não se deve trabalhar com temperaturas acima da linha A_{cm} no caso de recozimento pleno, diferentemente da normalização. Essa distinção se dá para evitar a formação de cementita ao longo do contorno das colônias de perlita, o que não ocorre na normalização, uma vez que o resfriamento é ao ar, não propiciando tempo suficiente para a formação do constituinte pró-eutetóide na localização mencionada.

3.3 Características Gerais do Aço

O aço é uma liga de Fe-C que contém entre 0,008% a aproximadamente 2,11% de carbono, podendo apresentar como elementos residuais de liga o silício, manganês, fósforo e enxofre. Eles são classificados em aços de baixo, médio e alto teores de C. Outra classificação muito utilizada é aço hipoeutetóide (<0,8%C), eutetóide (=0,8%C) e hipereutetóide (>0,8%C). Há ainda a classificação dos aços por grupos de aplicação, conforme tabela 4.

Tabela 4 – Principais grupos de aplicação dos aços

● Aços Carbono	
● Aços de alta resistência e baixa liga (ARBL)	
● Aços para construção mecânica	<ul style="list-style-type: none"> — Aços para beneficiamento (ligados ou não) — Aços para molas — Aços para rolamentos — Aços para cementação — Aços para nitretação — Aços de corte livre (ou usinagem fácil)
● Aços para Ferramenta	<ul style="list-style-type: none"> — Aços para trabalho a quente (AISI H) — Aços resistentes ao choque (AISI S) — Aços para trabalho a frio (AISI A, D, O ou W) — Aços para moldes de plásticos (AISI P) — Aços rápidos (AISI M ou T)
● Aços inoxidáveis	<ul style="list-style-type: none"> — Ferríticos — Austeníticos — Duplex — Endurecíveis por precipitação (PH) — Martensíticos

Fonte: adaptado de SILVA E MEI, 2010.

A tabela 5 apresenta a classificação dos Aços segundo ABNT, excluindo aços ferramenta.

3.3.1 O Aço AISI 1008

O aço AISI 1008, segundo classificação da ABNT, NBR NM 87 (2000), é um aço carbono que apresenta em média 0,08% C. Trata-se de um aço baixo carbono, hipoeutetóide, que apresenta predominantemente ferrita e alguma perlita como constituintes no resfriamento lento. A figura 17 retrata os constituintes presentes na microestrutura do aço AISI 1008 normalizado.

Tabela 5 – Classificação dos aços conforme ABNT

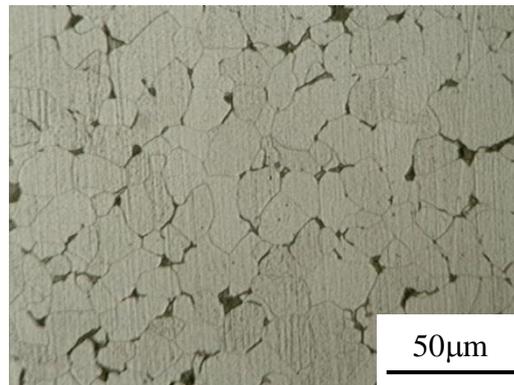
● Aços carbono		
10xx	aço carbono	
11xx	aço carbono resulfurado (corte fácil)	
12xx	aço carbono resulfurado e refosforado (corte fácil)	
● Aços de baixa liga (construção mecânica)		
13xx	Mn 1,75	
23xx	Ni 3,5	
25xx	Ni 5,0	
31xx	Ni 1,25 Cr 0,65	
33xx	Ni 3,50 Cr 1,55	
40xx	Mo 0,25	
41xx	Cr 0,50 ou 0,95, Mo 0,12 ou 0,20	
43xx	Ni 1,80, Cr 0,50 ou 0,80, Mo 0,25	
46xx	Ni 1,55 ou 1,80, Mo 0,20 ou 0,25	
47xx	Ni 1,05, Cr 0,45, Mo 0,20	
48xx	Ni 3,50, Mo 0,25	
50xx	Cr 0,28 ou 0,40	
51xx	Cr 0,80 a 1,05	
5xxxx	Cr 0,50 ou 1,00 ou 1,45, C 1,00	
61xx	Cr 0,80 ou 0,95, V 0,10	
86xx	Ni 0,55, Cr 0,50 ou 0,65, Mo 0,20	
87xx	Ni 0,55, Cr 0,50, Mo 0,25	
92xx	Mn 0,85, Si 2,00	
93xx	Ni 3,25, Cr 1,20, Mo 0,12	
98xx	Ni 1,00, Cr 0,80, Mo 0,25	
● Aços inoxidáveis (resistentes ao calor e à corrosão)		
2xx	Cr, Ni, Mn	Austenítico
3xx	Cr, Ni	Austenítico
4xx	Cr	Ferrítico
4xx	Cr	Martensítico
5xx	baixo cromo (resistente ao calor)	

Fonte: adaptado de SILVA e MEI, 2010.

Essa presença maciça de ferrita em relação a perlita, proporciona ao aço AISI 1008 capacidade de deformação a frio considerável, apresentando boa ductilidade. A cementita, fase presente na perlita, apresenta maior dureza que a ferrita, sendo aquela quem aumenta a resistência do aço à deformação.

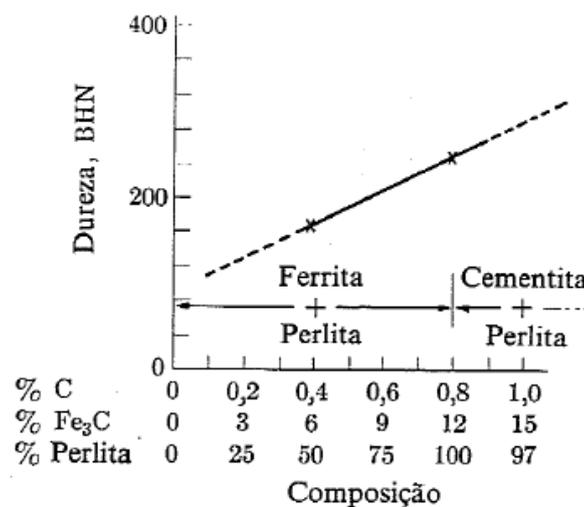
As figuras 18, 19 e 20 referem-se ao comportamento das propriedades dureza, resistência mecânica e ductilidade de acordo com a composição química (%C) do aço.

Figura 17 – Constituintes do aço AISI 1008 normalizado



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 18 - Dureza X composição do aço (%C)



Fonte: VAN VLACK, 2000.

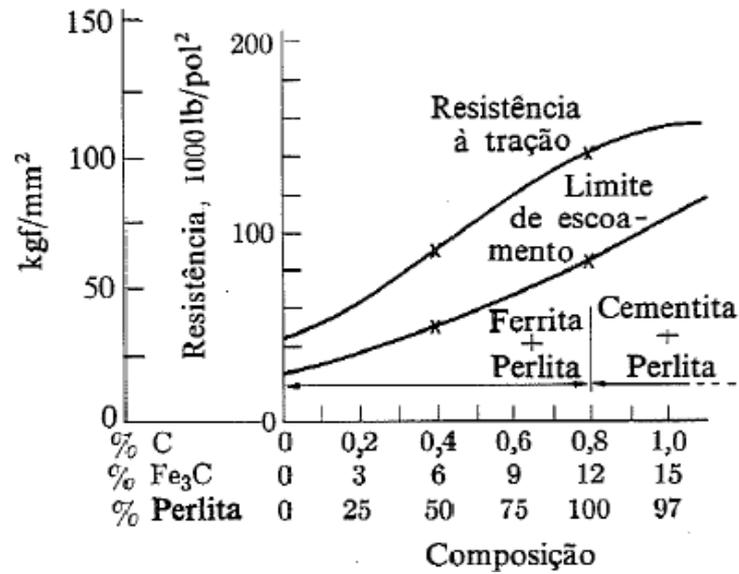
Verifica-se que com o aumento da % C têm-se um aumento da dureza do aço, que corresponde a uma maior concentração de cementita (Fe₃C) e/ou perlita na microestrutura do material.

O limite de escoamento e a resistência a tração apresentam comportamento similar àquele apresentado pela dureza. Assim, têm-se que a medida que aumenta-se a % C, maiores proporções de cementita e/ou perlita estarão presentes na microestrutura, conseqüentemente mais elevados serão os valores do limite de escoamento e limite de resistência a tração.

Já a ductilidade apresenta um comportamento completamente diferente das propriedades citadas anteriormente (dureza e resistência mecânica). Quanto mais elevado a %

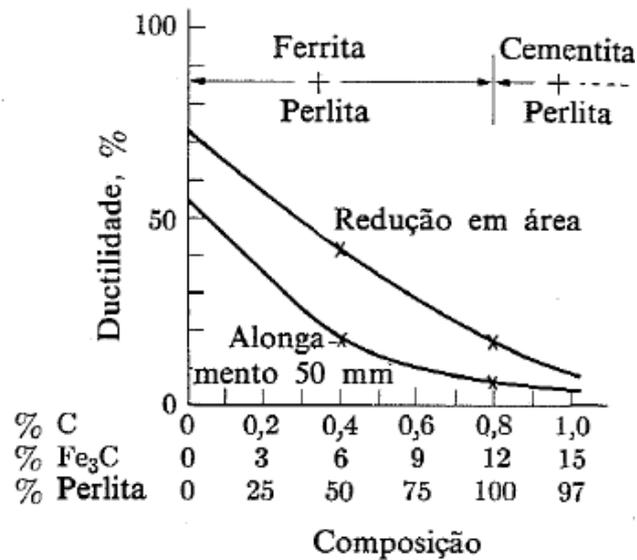
de C, menos dúctil é o aço, pois menores são a proporção de ferrita, que é a responsável pela ductilidade, na microestrutura (VAN VLACK, 2000).

Figura 19 – Resistência Mecânica X composição do aço (%C)



Fonte: VAN VLACK, 2000.

Figura 20 – Ductilidade X composição do aço (%C)



Fonte: VAN VLACK, 2000.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

O material utilizado na realização desse trabalho de conclusão de curso foi o aço AISI 1008, comprado na forma de chapa fina laminada a frio, de espessura 1,5 mm.

A tabela 6 mostra a composição química (% em peso) do aço AISI 1008 fornecida pelo fabricante.

Tabela 6 – Análise Química do aço AISI 1008

Análise Química (%)														
C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Sn	Al	Nb	V	Ti	B
0,053	0,217	0,013	0,010	0,004	0,001	0,005	0,010	0,000	0,001	0,024	0,001	0,000	0,002	0,0002

Fonte: CIA METALURGICA PRADA

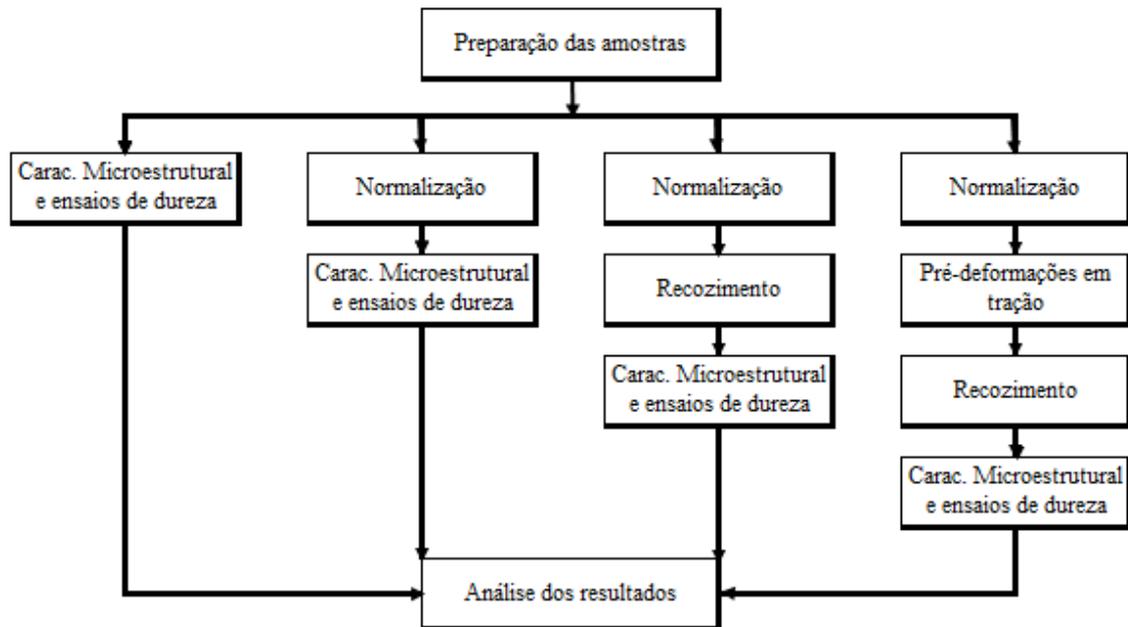
4.2 Descrição Geral do Trabalho Desenvolvido

O trabalho consistiu em avaliar a influência da pré-deformação em tração do aço AISI 1008 na microestrutura e na dureza do material após recozimento. As variáveis analisadas foram: diferentes valores de pré-deformações e diferentes tempos de encharque no tratamento térmico de recozimento pleno no aço AISI 1008 previamente normalizado. A figura 21 mostra as etapas do procedimento experimental conduzido.

4.3 Corpos de prova

Inicialmente foram preparados dois tipos de corpos de prova. O primeiro, empregado para a caracterização do material (microestrutura, dureza) no estado inicial, após normalização e após normalização e recozimento, consistiu de amostras com aproximadamente 10 mm x 20 mm, conforme mostrado na figura 22.

Figura 21–Fluxograma



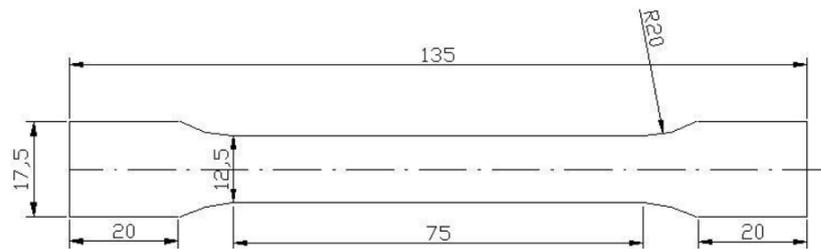
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 22– Corpo de prova para caracterização (microestrutura e dureza) no estado inicial e após tratamentos térmicos



Fonte: Produzido pelo autor

O segundo tipo, referente ao material a ser submetido a diferentes pré-deformações no ensaio de tração, foi fabricado de acordo com a norma ASTM E8 (2000). A figura 23 ilustra o modelo dos corpos de provas, enquanto a figura 24 mostra os corpos de prova já confeccionados.

Figura 23– Modelo de corpo de prova para ensaio de tração

Fonte: Lopes (2009)

Figura 24– Corpo de prova para ensaio de tração

Fonte: Produzido pelo autor

4.4 Tratamentos Térmicos

Os tratamentos térmicos realizados no desenvolvimento desse trabalho foram normalização e recozimento pleno. Todos os corpos de prova foram submetidos à normalização sob as mesmas condições, exceto aqueles para caracterização microestrutural e mecânica do aço AISI 1008 conforme adquiridos, que não passaram por nenhum tratamento térmico. Quanto ao recozimento pleno, diferentes tempos de encharque foram utilizados, no material apenas normalizado e no material normalizado e deformado no ensaio de tração. A tabela 7 mostra as condições que foram empregadas para os dois tipos de tratamentos térmicos, enquanto a figura 25 ilustra o forno elétrico utilizado para a realização dos tratamentos térmicos, da marca *Brasimet*.

Tabela 7 – Condições aplicadas dos tratamentos térmicos realizados

Tratamento Térmico	Temperatura de austenitização	Tempos de encharque
Normalização	900°C	60 min
Recozimento Pleno	900°C	10 min, 60 min, 300 min

Fonte: Produzido pelo autor

Figura 25 – Forno utilizado nos tratamentos térmicos



Fonte: Produzido pelo autor

4.5 Deformação Plástica

As pré-deformações utilizadas neste trabalho foram de 10%, 20% e 30%, realizadas por meio de ensaio de tração em uma máquina universal marca *Instron* modelo 5582 com sistema de controle e aquisição de dados *Blue Hill* e extensômetro eletrônico também da marca *Instron* modelo 2630-100. A velocidade de movimentação da garra superior da máquina em todos os testes foi de 4,5 mm/min. A Figura 26 mostra a máquina utilizada durante um dos ensaios.

Figura 26 - Máquina de tração utilizada nas pré-deformações



Fonte: Produzido pelo autor

4.6 Caracterização Microestrutural

As microestruturas das condições avaliadas nesse trabalho, ou seja, no estado inicial; normalizado; normalizado e pré-deformado (10%, 20%, 30%); normalizado, recozido (10 min, 60 min, 300 min) e pré-deformado (10%, 20%, 30%) e recozido (10 min, 60 min, 300 min), foram definidas através de preparação metalográfica de duas amostras de cada condição, todas na seção longitudinal.

A preparação metalográfica consistiu nas etapas de embutimento a frio com acrílico autopolimerizável e molde de silicone, lixamento com lixas de óxido de alumínio (#120, #240, #320, #400 e #600) em lixadeiras elétricas da marca *Struers*, seguidas de polimento com pasta de diamante (9 μm , 3 μm , 1 μm) em politrizes da marca *Arotec*. O ataque químico foi realizado por imersão com reagente Nital 3%.

A figura 27 ilustra o microscópio óptico, marca *Fortel*, e o computador utilizado para a caracterização das microestruturas e digitalização de imagens. Todas as imagens foram digitalizadas em duas ampliações, de 200x e 400x.

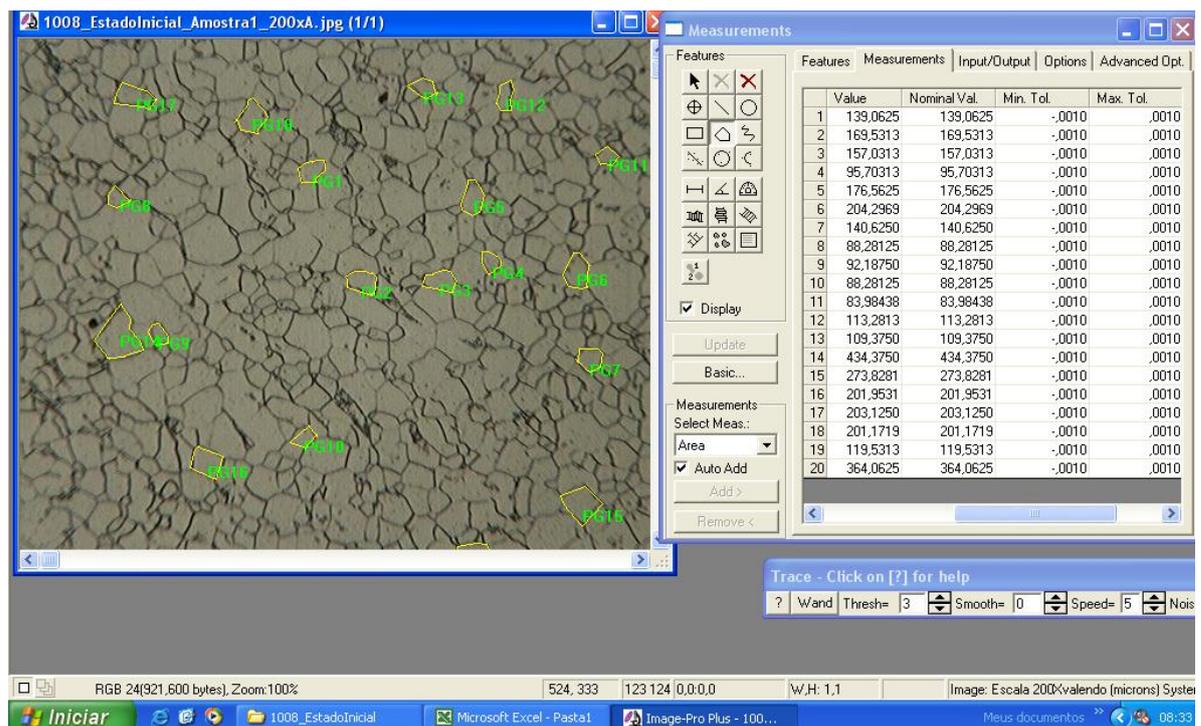
Figura 27 - Microscópio utilizado nas caracterizações microestruturais



Fonte: Produzido pelo autor

No caso da ampliação de 200x foram digitalizadas dez regiões distintas de cada condição avaliada, pois essas imagens foram utilizadas para a determinação do tamanho de grão médio das respectivas microestruturas. O programa comercial utilizado foi o *Image Pro Plus 6.0*, através do qual o diâmetro médio é determinado pelo cálculo da área de cada grão. A figura 28 exemplifica o método de determinação dos contornos de grão e a tabela 8 mostra, como exemplo, como foi realizada a coleta de dados para uma condição avaliada qualquer.

Figura 28 - Software utilizado para determinação do tamanho de grão



Fonte: Produzido pelo autor

Tabela 8 - Exemplo da coleta de dados de áreas de contorno de grão para uma condição qualquer

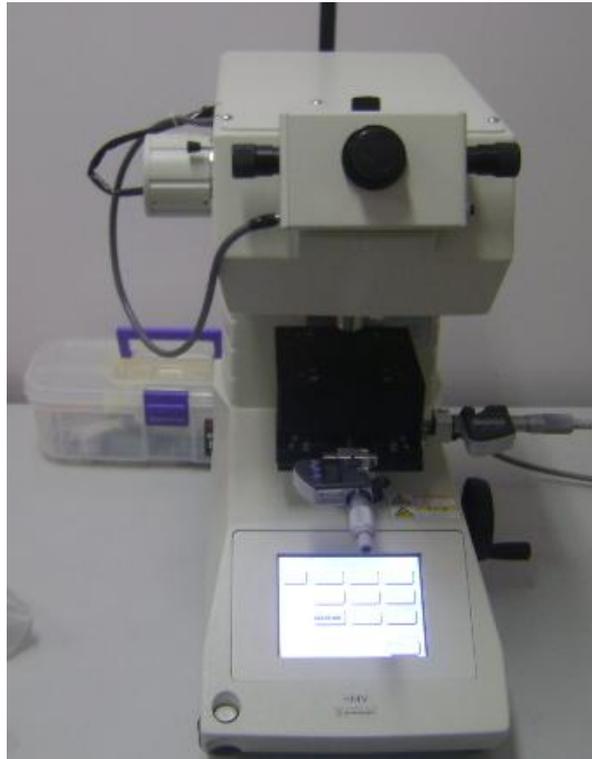
	área		área		área		área		área		área
1	519,75	36	725,93	71	587,35	106	401,85	141	491,05	176	857,72
2	422,22	37	366,36	72	926,23	107	793,21	142	285,49	177	417,59
3	575,93	38	506,17	73	450,93	108	952,47	143	682,10	178	933,02
4	369,14	39	1260,49	74	701,85	109	453,70	144	274,07	179	436,73
5	672,84	40	472,22	75	750,62	110	392,28	145	918,83	180	489,81
6	334,88	41	575,31	76	544,44	111	169,14	146	712,35	181	287,35
7	282,41	42	1365,43	77	769,14	112	536,11	147	562,96	182	831,79
8	382,72	43	677,16	78	319,44	113	453,70	148	751,23	183	123,77
9	738,89	44	551,54	79	429,01	114	597,22	149	559,57	184	287,04
10	633,02	45	546,91	80	348,15	115	542,90	150	470,99	185	595,06
11	582,72	46	610,19	81	854,94	116	806,48	151	158,95	186	269,75
12	627,16	47	629,63	82	696,30	117	180,25	152	205,25	187	185,19
13	249,07	48	500,00	83	253,70	118	464,20	153	334,88	188	923,15
14	937,96	49	647,84	84	902,47	119	1093,83	154	961,42	189	601,85
15	401,85	50	246,30	85	472,53	120	580,25	155	325,62	190	350,00
16	586,42	51	533,02	86	629,01	121	865,43	156	504,94	191	782,72
17	437,96	52	363,58	87	720,99	122	315,74	157	341,67	192	418,21
18	477,47	53	728,40	88	411,11	123	153,40	158	307,10	193	265,74
19	561,42	54	459,88	89	835,49	124	343,83	159	349,69	194	854,01
20	232,72	55	199,38	90	609,26	125	528,09	160	470,06	195	881,79
21	704,63	56	1285,49	91	436,11	126	1056,17	161	265,12	196	502,78
22	368,52	57	708,95	92	421,91	127	485,80	162	611,73	197	282,10
23	713,89	58	341,98	93	86,73	128	437,65	163	365,43	198	299,07
24	805,56	59	459,57	94	453,09	129	461,42	164	512,35	199	787,96
25	778,70	60	788,58	95	458,95	130	437,65	165	270,06	200	524,07
26	1067,28	61	810,49	96	250,62	131	522,84	166	673,77		
27	966,98	62	372,22	97	1062,96	132	382,41	167	346,30		
28	790,12	63	1061,42	98	564,20	133	688,89	168	222,53		
29	451,54	64	425,00	99	258,33	134	569,14	169	191,36		
30	651,85	65	436,11	100	348,77	135	437,96	170	259,88		
31	687,04	66	490,43	101	357,10	136	1215,12	171	292,90		
32	433,95	67	446,30	102	609,57	137	1076,54	172	400,00		
33	659,57	68	290,43	103	339,81	138	342,59	173	105,86		
34	1238,58	69	604,94	104	678,40	139	456,17	174	319,44		
35	502,16	70	478,70	105	918,21	140	404,32	175	509,88		
	MÉDIA		544,51		TAMANHO DE GRÃO		23,3		DESVIO PADRÃO		252,2

Fonte: Produzido pelo autor

4.7 Caracterização Mecânica

Para a caracterização mecânica das diversas condições avaliadas nesse trabalho foram realizados ensaios de dureza Vickers em um microdurômetro da marca Shimadzu, modelo 2T, empregando carga de 500 gf e tempo de aplicação de 15s. A Figura 29 mostra o microdurômetro utilizado no trabalho. Foram realizados cinco ensaios em cada amostra.

Figura 29 – Microdurômetro utilizado nos ensaios de dureza



Fonte: Produzido pelo autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização do Material no Estado Inicial

Verificam-se na tabela 9 os valores de dureza (HV) correspondentes ao aço conforme comprado.

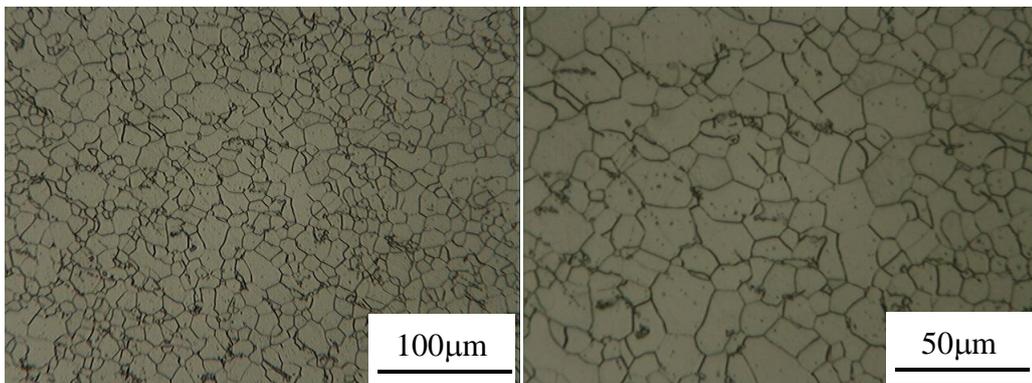
Tabela 9 – Dureza (HV) no estado inicial

	119
	122
	117
	117
	118
Média	118,6
Desvio padrão	2,07

Fonte: Produzido pelo autor

A figura 30 exibe a microestrutura do material no estado como adquirido em duas ampliações distintas. Percebe-se a ocorrência de grãos de ferrita equiaxiais e poucas regiões com colônias de perlita, microestrutura que está de acordo com a composição química fornecida pelo fabricante. Apesar de ter sido adquirido como um material laminado a frio, não se observa uma orientação preferencial dos grãos no sentido de laminação. O tamanho de grão médio encontrado foi de 13,1 μm .

Figura 30– Microestrutura do aço AISI 1008 no estado inicial



Fonte: Produzido pelo autor

5.2 Caracterização do Material após Realização da Normalização

Após a caracterização do material no estado inicial, para todas as demais condições avaliadas foram realizadas como ponto de partida a normalização a 900°C por 60 min, garantindo-se, assim, um *restart* do material, ou seja, evitando-se influência de processos termomecânicos sofridos anteriormente.

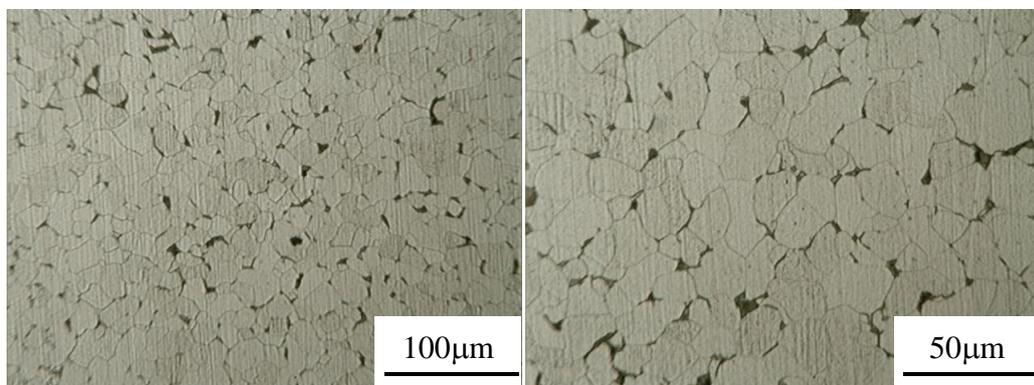
Na tabela 10 têm-se os valores de dureza (HV) referentes ao aço normalizado. Já a figura 31 mostra a microestrutura do mesmo. Neste caso, o tamanho de grão médio encontrado para as amostras normalizadas foi de 14,5 μm .

Tabela 10 – Dureza (HV) do aço SAE 1008 Normalizado

	104
	106
	100
	102
	107
Média	103,8
Desvio padrão	2,86

Fonte: Produzido pelo autor

Figura 31– Microestrutura do aço AISI 1008 Normalizado



Fonte: Produzido pelo autor

Comparando as micrografias das figuras 30 e 31, percebe-se maior homogeneidade dos grãos nas amostras que foram normalizadas, o que está de acordo com os objetivos

teóricos do tratamento. Além disso, verifica-se de maneira mais clara a presença das colônias de perlita. Em relação ao tamanho médio de grão, não foi observada uma alteração significativa.

O material no estado inicial apresenta dureza média maior que o material normalizado, característica essa proveniente do processo de laminação a frio na conformação do material, ou seja, do encruamento.

5.3 Caracterização do Material após Realização dos Recozimentos Plenos

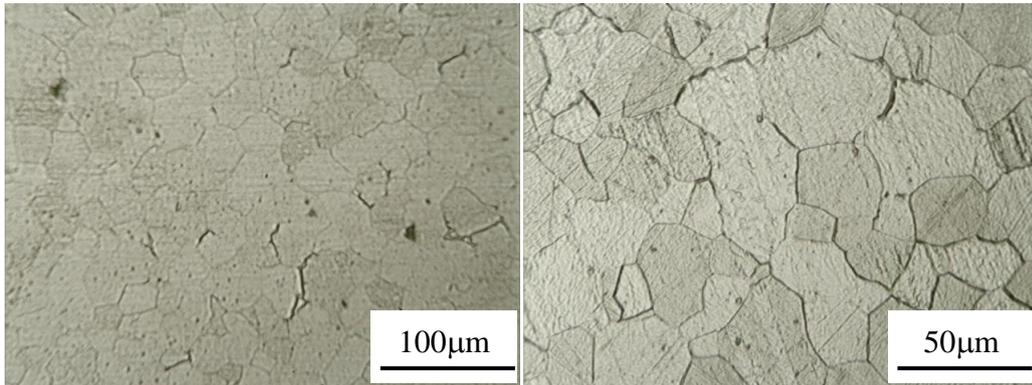
Em relação ao tratamento térmico de recozimento pleno, foram 3 tempos de encharque diferentes utilizados nas amostras já normalizadas: 10 min, 60 min e 300 min. Assim como na normalização, a temperatura trabalhada no recozimento pleno foi de 900°C. A tabela 11 apresenta os valores de dureza encontrados para cada tempo de encharque utilizado. Já as figuras 32, 33e 34 ilustram as micrografias para recozimento pleno a 10 min, 60 min e 300 min respectivamente.

Tabela 11 – Dureza (HV) do aço AISI 1008 recozido

	REC. 10 MIN	REC. 60 MIN	REC. 300MIN
	87,7	80,6	79,4
	88,4	82,6	78,9
	85,7	83,1	79,4
	86,3	79,4	82,7
	87,9	81,1	81,5
Média	87,2	81,4	80,4
Desvio padrão	1,14	1,50	1,64

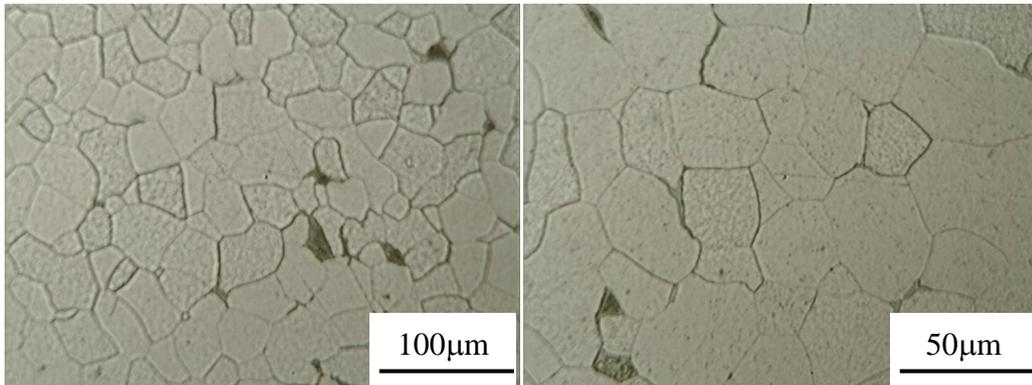
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 32– Microestrutura do aço AISI 1008 Recozido 10 min



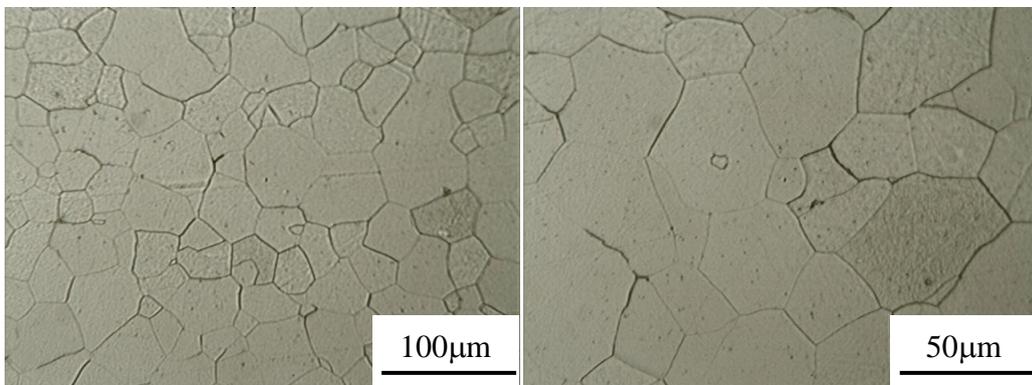
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 33– Microestrutura do aço AISI 1008 Recozido 60 min



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 34– Microestrutura do aço AISI 1008 Recozido 300 min

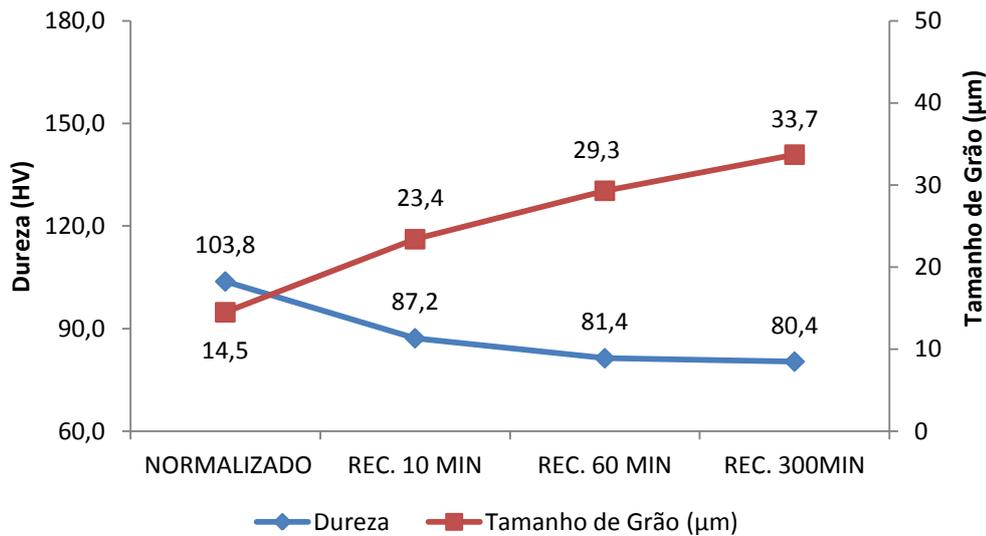


Fonte: Produzido pelo autor

Os tamanhos de grão médios encontrados foram 23,4 μm , 29,3 μm e 33,7 μm para os recozimentos de 10 min, 60 min e 300 min respectivamente.

A figura 35 sintetiza a relação dessas variáveis com o tempo de encharque. Verifica-se que à medida que o tempo de encharque é elevado ocorre um aumento do tamanho de grão médio, conseqüentemente há uma diminuição da dureza. Esse aumento de grão médio é facilmente percebido pela análise e comparação das micrografias das figuras 32, 33 e 34. Tais aumentos acontecem em decorrência do estágio de aquecimento, ou seja, uma vez terminada a recristalização, observa-se o crescimento dos grãos austeníticos, que é mais significativo quanto maior for o tempo de encharque, uma vez que se trata de um processo baseado no mecanismo de difusão. Esse crescimento mais acentuado nos grãos austeníticos influencia a microestrutura formada no resfriamento.

Figura 35– Influência do tempo de encharque na Dureza e no Tamanho de Grão



Fonte: Produzido pelo autor

5.4 Caracterização do Material Pré-deformado

Outra condição a ser avaliada foi a influência de diferentes pré-deformações em tração (10%, 20% e 30% de deformação convencional) nas propriedades do aço AISI 1008 normalizado. Essas pré-deformações foram realizadas através de ensaio de tração. A figura 36 mostra corpos de prova no estado inicial e normalizados e pré-deformados de 10%, 20% e 30%.

Figura 36– Corpos de prova apenas normalizados, normalizados e pré-deformados de 10%, 20% e 30%



Fonte: Produzido pelo autor

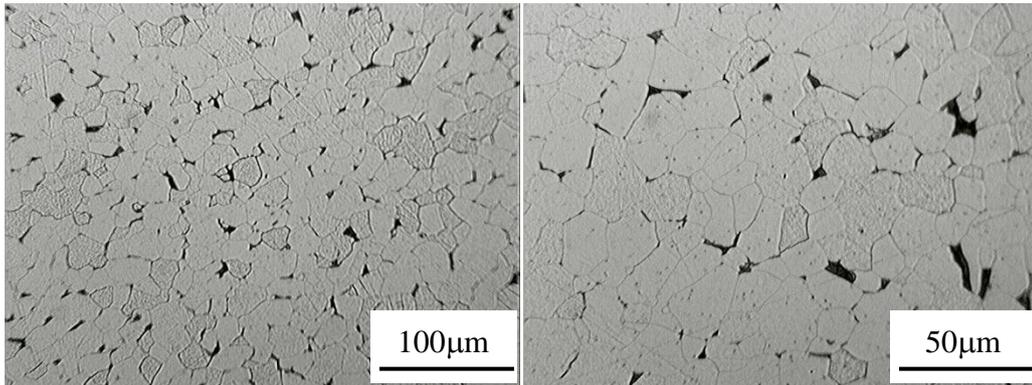
A tabela 12 apresenta os dados de dureza encontrados para as respectivas pré-deformações aplicadas. Já as figuras 37, 38 e 39 mostram as micrografias das mesmas.

Tabela 12– Dureza (HV) do aço AISI 1008 pré-deformado

	DEF.10%	DEF.20%	DEF. 30%
	148	167	173
	143	172	176
	147	168	179
	145	164	177
	141	166	176
Média	144,8	167,4	176,2
Desvio padrão	2,86	2,97	2,17

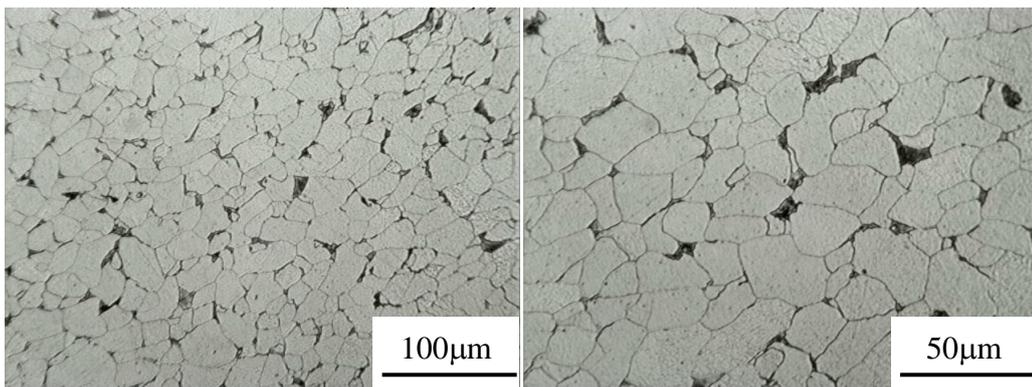
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 37– Microestrutura do aço AISI 1008 pré-deformado 10%



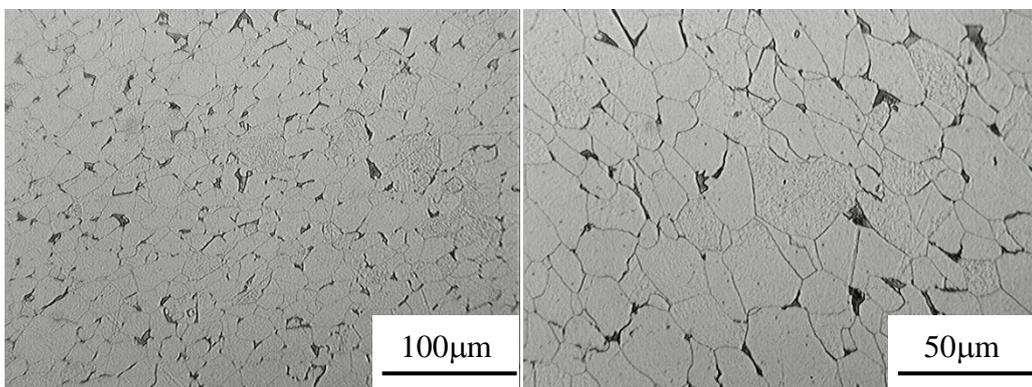
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 38 – Microestrutura do aço AISI 1008 pré-deformado 20%



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 39– Microestrutura do aço AISI 1008 pré-deformado 30%



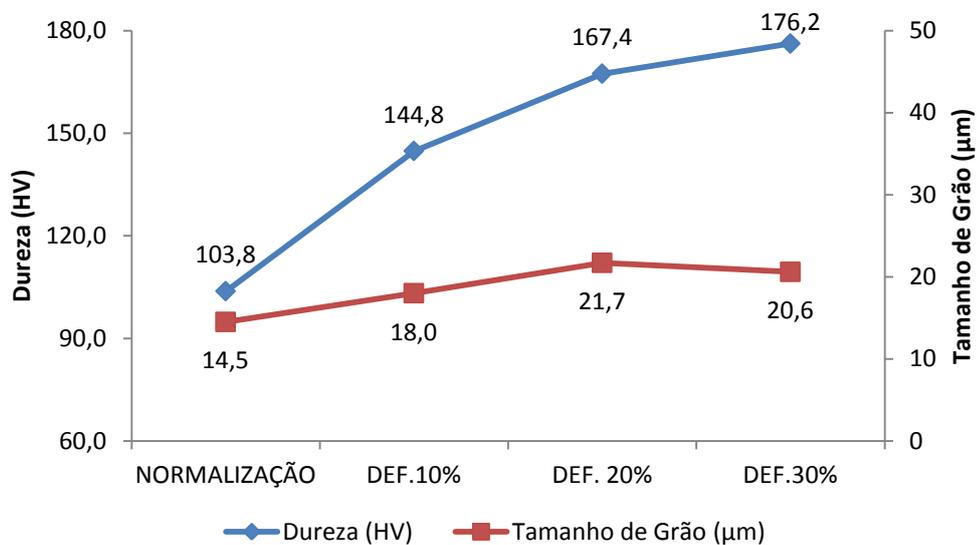
Fonte: Produzido pelo autor

Comparando as micrografias das figuras 37, 38 e 39 com a da figura 31, referente ao material apenas normalizado, verifica-se uma relativa orientação dos grãos no sentido do esforço aplicado na deformação dos mesmos, principalmente para a situação na qual a deformação na tração foi de 30%. Em relação ao tamanho médio dos grãos, aparentemente não ocorreu uma alteração significativa. Entretanto, após a medição, os tamanhos médios encontrados foram 18,0 μm , 21,7 μm e 20,6 μm para as pré-deformações de 10%, 20% e 30% respectivamente, portanto, superiores ao do material normalizado. Esse fenômeno indica que o método empregado não seria adequado para grãos não equiaxiais, visto que a mudança da morfologia dos grãos significaria um aumento na seção exibida pelos mesmos (longitudinal) e uma diminuição se observados na seção transversal, considerando a manutenção volumétrica do grão.

A Figura 40 sintetiza a relação das variáveis tamanho de grão médio e dureza com as diferentes pré-deformações.

Percebe-se que quanto maior a pré-deformação aplicada maiores foram os valores médios de dureza e de tamanho de grão. O aumento relacionado à dureza corresponde ao encruamento decorrente da deformação plástica sofrida pelo material. Sabe-se que o aumento da dureza nesse caso está relacionado com a multiplicação na densidade de discordâncias com o trabalho a frio, que interagem umas com as outras e com outras barreiras, tendo sua movimentação dificultada. Em relação ao tamanho de grão médio, têm-se um aumento gradual e uma orientação do mesmo no sentido do esforço mecânico aplicado.

Figura 40– Influência da pré-deformação na Dureza e no Tamanho de Grão



5.5 Caracterização dos Materiais Pré-Deformados Recozidos

Nessa etapa foram avaliadas tanto a influência das diferentes pré-deformações (10%, 20% e 30% deformação convencional) para cada tempo de encharque utilizado (10 min, 60 min e 300 min) no recozimento pleno, quanto a influência dos diversos tempos de encharque para cada tipo de pré-deformação aplicada.

As tabelas 13, 14 e 15 apresentam os valores de dureza verificados pela variação do % de deformação para um mesmo tempo de encharque.

Tabela 13 – Dureza (HV) X % pré-deformação no recozimento pleno 10 min

	DEF.10% REC. 10 MIN	DEF.20% REC. 10 MIN	DEF.30% REC.10 MIN
	82,3	76,1	83
	79,6	78,8	82,6
	81,3	80,7	82,7
	83,4	77,4	84,5
	80,8	76,8	84,9
Média	81,5	77,8	83,5
Desvio padrão	1,45	2,04	1,08

Fonte: Produzido pelo autor

Tabela 14– Dureza (HV) X % pré-deformação no recozimento pleno 60 min

	DEF.10%REC. 60 MIN	DEF.20%REC. 60 MIN	DEF.30% REC.60 MIN
	84,7	83	79,5
	85	83,8	82,9
	86	80,9	82,9
	83,8	82,7	81,8
	82,4	78,6	83,7
Média	84,4	82,6	82,2
Desvio padrão	1,36	1,22	1,63

Fonte: Produzido pelo autor

Tabela 15– Dureza (HV) X % pré-deformação no recozimento pleno 300 min

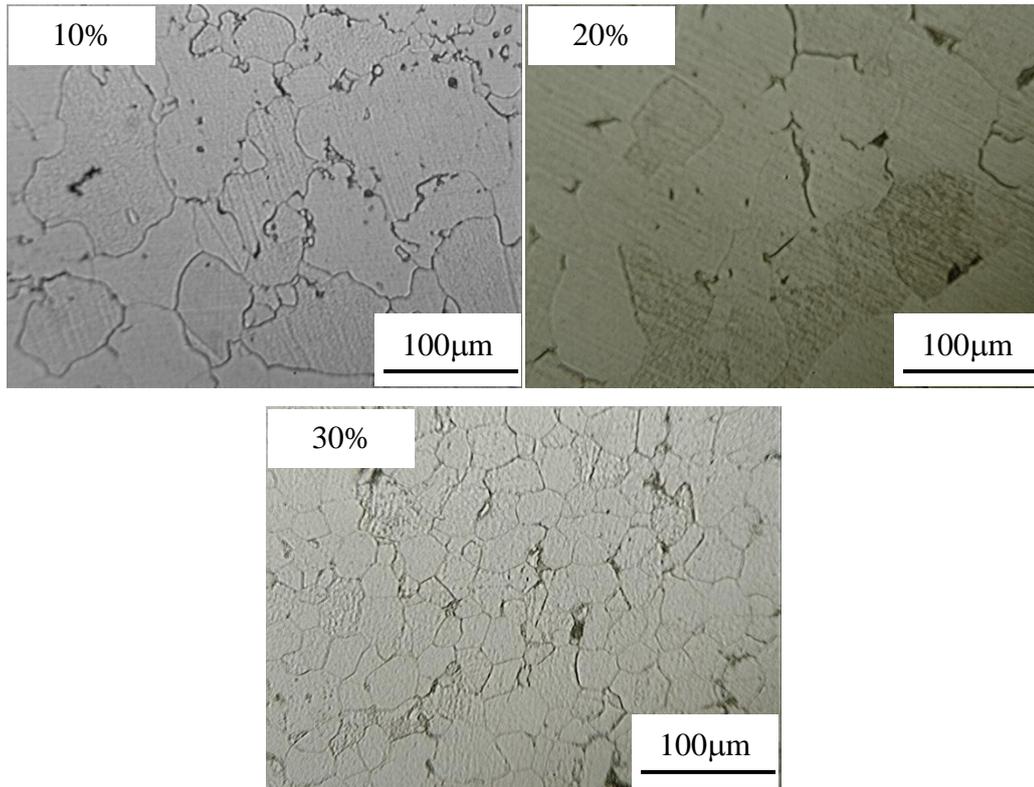
	DEF.10% REC. 300 MIN	DEF.20%REC. 300 MIN	DEF.30% REC.300 MIN
	82,6	77,7	75,3
	85,8	75,3	78,7
	81,1	79,4	75,1
	82	77,3	78
	81,2	77,9	79,1
Média	82,5	77,5	77,2
Desvio padrão	1,92	1,47	1,90

Fonte: Produzido pelo autor

Verifica-se pela análise das tabelas anteriores que a variação da % de pré-deformação do material para um tempo de encharque específico (10 min, 60 min ou 300 min) não provocou uma variação na dureza significativa, não sendo superior a 5% em nenhum dos casos.

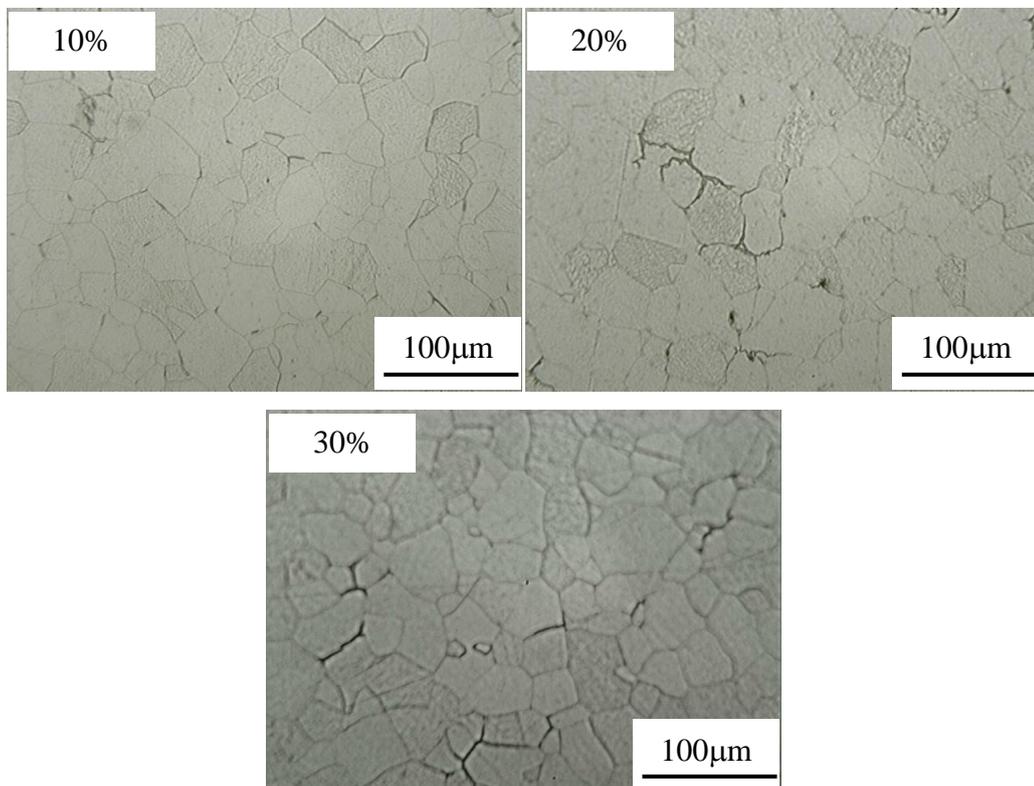
As figuras 41, 42 e 43 mostram as micrografias da variação da % de deformação para um mesmo tempo de encharque. Considerando o recozimento com tempo de 10 minutos, os tamanhos de grão médios encontrados foram 28,3 μm , 32,0 μm e 22,8 μm para as pré-deformações de 10%, 20% e 30% respectivamente. Para o tempo de 60 minutos, os tamanhos de grão médios encontrados foram 26,5 μm , 40,9 μm e 33,8 μm para as pré-deformações de 10%, 20% e 30% respectivamente. Por fim, para o tempo de 300 minutos, os tamanhos de grão médios encontrados foram 32,9 μm , 39,0 μm e 40,1 μm para as pré-deformações de 10%, 20% e 30% respectivamente.

Figura 41 – Micrografia de diferentes pré-deformações no recozimento pleno 10 min



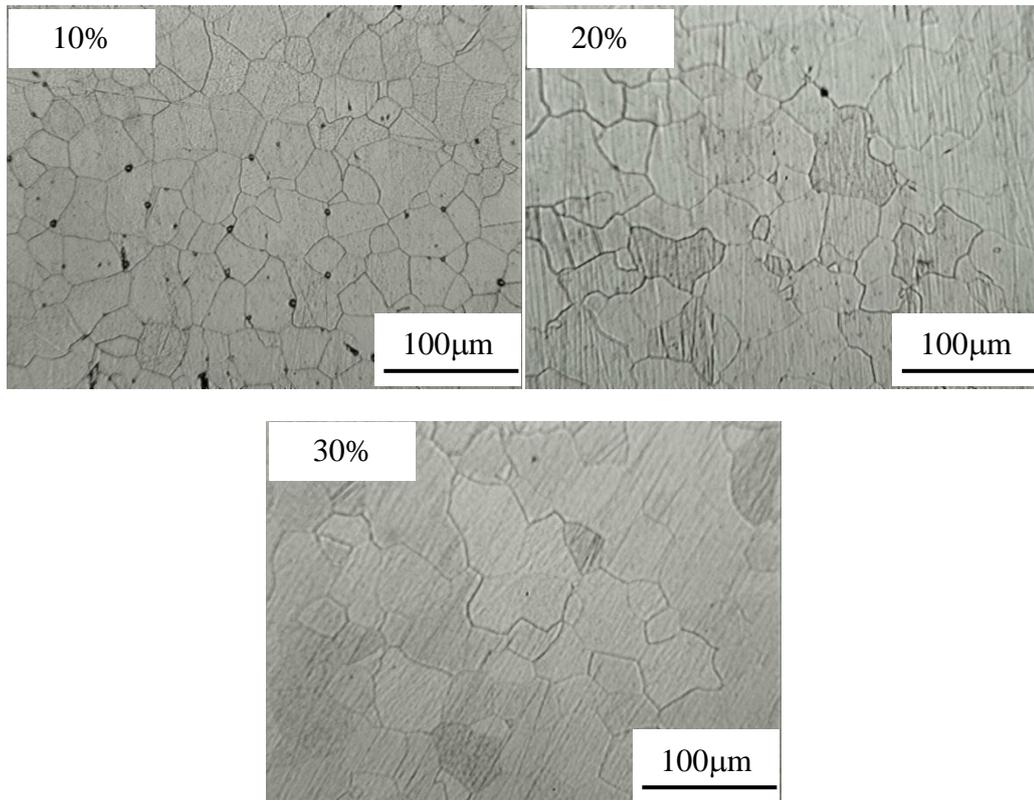
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 42– Micrografia de diferentes pré-deformações no recozimento pleno 60 min



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 43– Micrografia de diferentes pré-deformações no recozimento pleno 300 min



Fonte: Produzido pelo autor

As figuras 44, 45 e 46 sintetizam a relação das variáveis tamanho de grão médio e dureza com as diferentes pré-deformações para cada tempo de encharque utilizado, 10 min, 60 min e 300 min respectivamente.

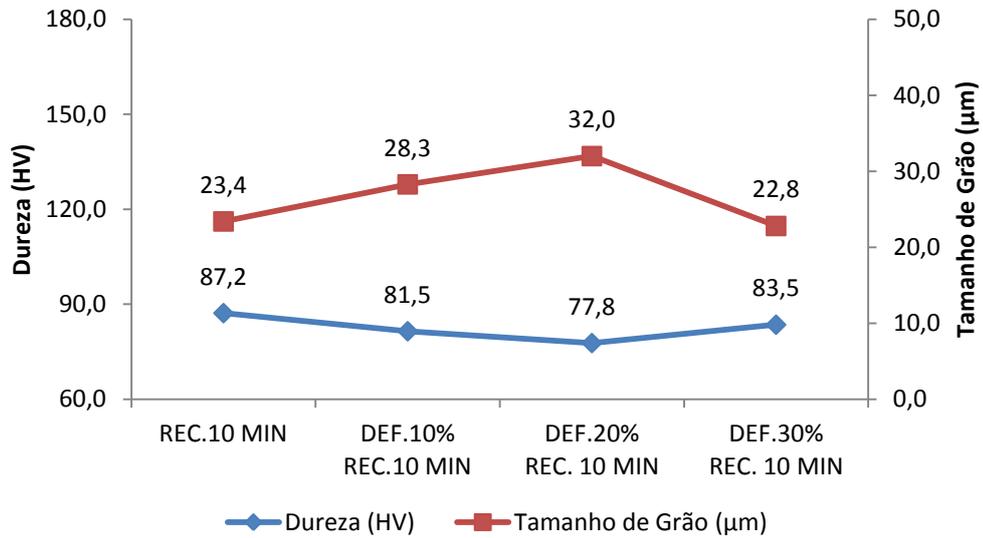
Percebe-se que, em geral, quanto maior a pré-deformação aplicada antes do recozimento de 10 min, maiores foram os valores de tamanho de grão e menores os valores de dureza. Tais fatos estão relacionados à “otimização” do estágio de recristalização, que acaba por ocorrer mais rapidamente quanto maior o percentual de deformação, favorecendo-se, assim, o estágio de crescimento de grão. Entretanto, observa-se uma anomalia para as amostras deformadas de 30% tanto em relação a dureza quanto ao tamanho de grão médio.

Para o recozimento pleno de 60 min não houve uma alteração significativa nos valores médios de dureza com o percentual de pré-deformação (< 5%). Esse fato somado à oscilação observada nos valores médios de tamanho de grão encontrados não nos permitem realizar uma análise conclusiva a respeito desses resultados.

Para o recozimento pleno de 300 min também não houve uma alteração significativa nos valores médios de dureza com o % de pré-deformação (< 5%). Já em relação ao tamanho

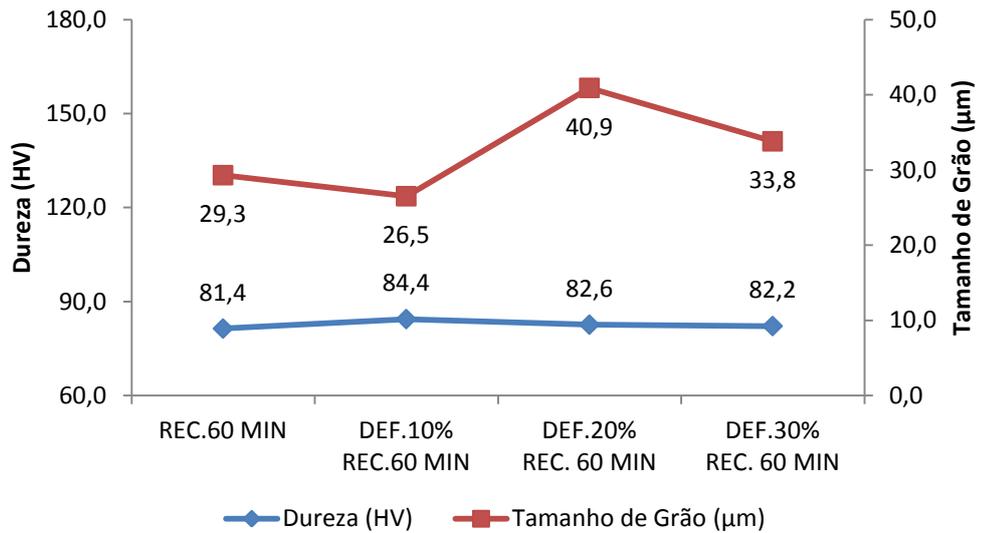
médio dos grãos houve um aumento considerável apenas entre as pré-deformações de 10% e 20%.

Figura 44– Dureza X tamanho de grão X % pré-deformação no recozimento 10 min



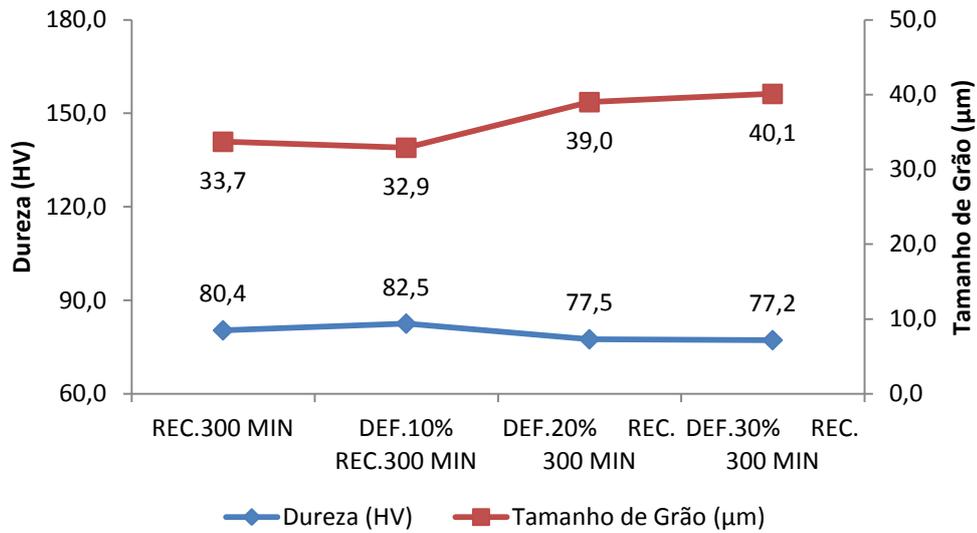
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 45– Dureza X tamanho de grão X % pré-deformação no recozimento 60 min



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 46– Dureza X tamanho de grão X % pré-deformação no recozimento 300 min



Fonte: Produzido pelo autor

As tabelas 16, 17 e 18 apresentam os valores de dureza verificados pela variação do tempo de encharque para um mesmo % de pré-deformação.

Tabela 16 – Dureza (HV) X tempo de encharque na deformação de 10%

	DEF.10%	DEF.10% REC. 10 MIN	DEF.10% REC. 60 MIN	DEF.10% REC. 300 MIN
	148	82,3	84,7	82,6
	143	79,6	85	85,8
	147	81,3	86	81,1
	145	83,4	83,8	82
	141	80,8	82,4	81,2
Média	144,8	81,5	84,4	82,5
Desvio padrão	2,86	1,45	1,36	1,92

Fonte: Produzido pelo autor

Tabela 17– Dureza (HV) X tempo de encharque na deformação de 20%

	DEF.20%	DEF.20% REC. 10 MIN	DEF.20%REC. 60 MIN	DEF.20%REC. 300 MIN
	167	76,1	83	77,7
	172	78,8	83,8	75,3
	168	80,7	80,9	79,4
	164	77,4	82,7	77,3
	166	76,8	78,6	77,9
Média	167,4	77,8	82,6	77,5
Desvio padrão	2,97	2,04	1,22	1,47

Fonte: Produzido pelo autor

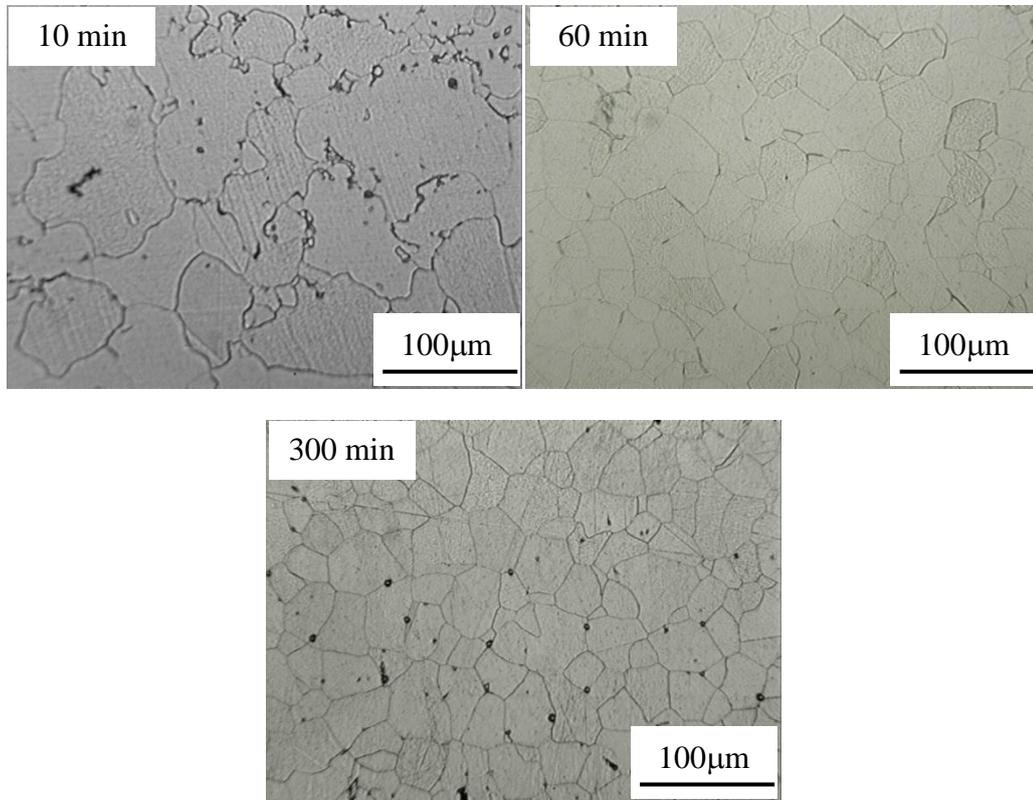
Tabela 18 – Dureza (HV) X tempo de encharque na deformação de 30%

	DEF. 30%	DEF.30% REC.10 MIN	DEF.30% REC.60 MIN	DEF.30% REC.300 MIN
	173	83	79,5	75,3
	176	82,6	82,9	78,7
	179	82,7	82,9	75,1
	177	84,5	81,8	78
	176	84,9	83,7	79,1
Média	176,2	83,5	82,2	77,2
Desvio padrão	2,17	1,08	1,63	1,90

Fonte: Produzido pelo autor

As figuras 47, 48 e 49 mostram as micrografias da variação do tempo de encharque para uma mesma pré-deformação.

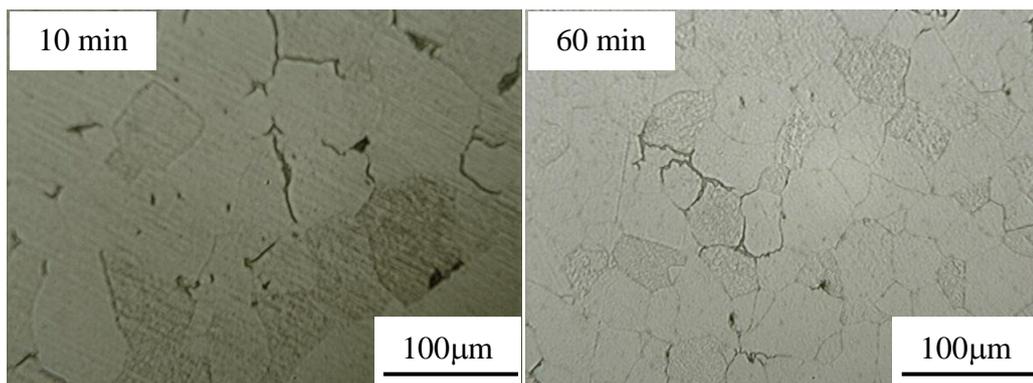
Figura 47– Micrografia de aço AISI 1008 10% pré-deformado para diferentes tempos de encharque

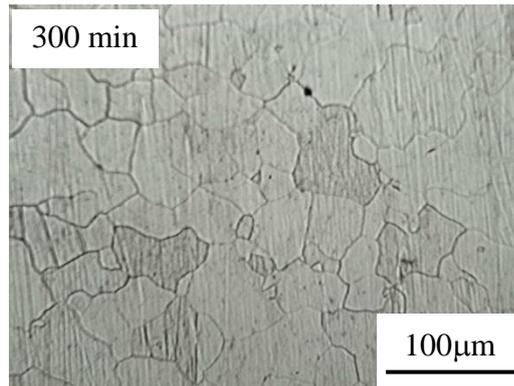


Fonte: Produzido pelo autor

Os tamanhos de grão médios encontrados para o aço AISI 1008 10% pré-deformado foram 28,3 μm, 26,5 μm e 32,9 μm para os tempos de encharque de 10 min, 60 min e 300 min respectivamente.

Figura 48– Micrografia de aço AISI 1008 20% pré-deformado para diferentes tempos de encharque

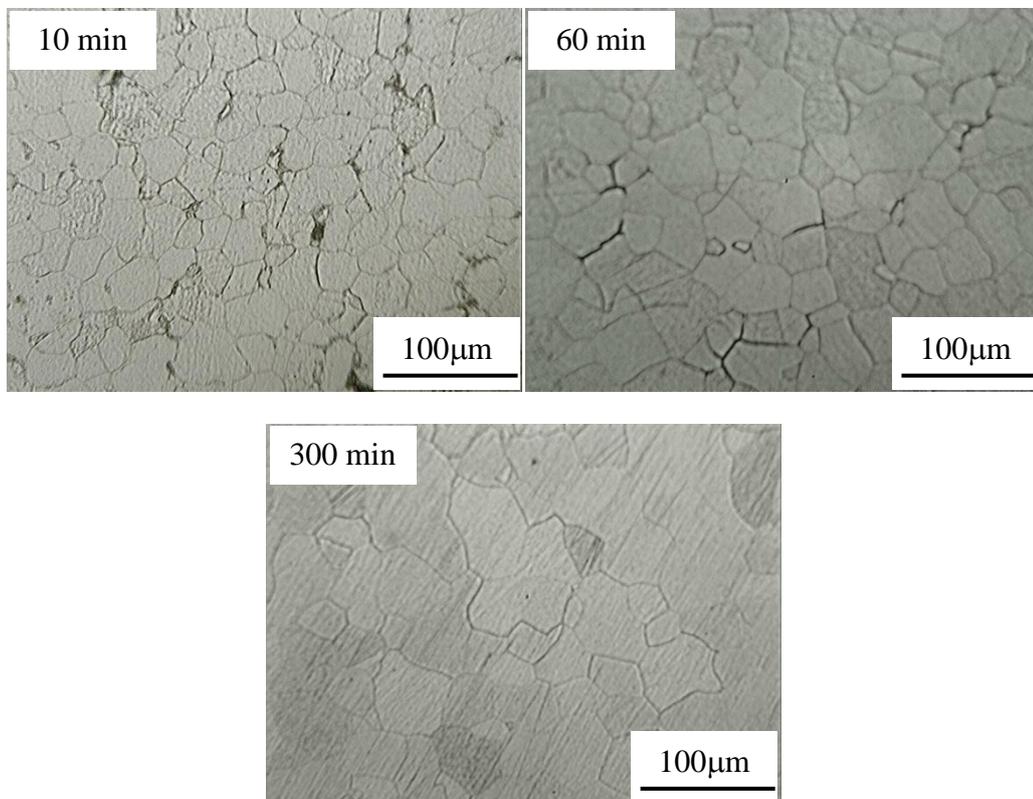




Fonte: Produzido pelo autor

Os tamanhos de grão médios encontrados para o aço AISI 1008 20% pré-deformado foram 32,0 µm, 40,9µm e 39,0 µm para os tempos de encharque de 10 min, 60 min e 300 min respectivamente.

Figura 49– Micrografia de aço AISI 1008 30% pré-deformado para diferentes tempos de encharque



Fonte: Produzido pelo autor

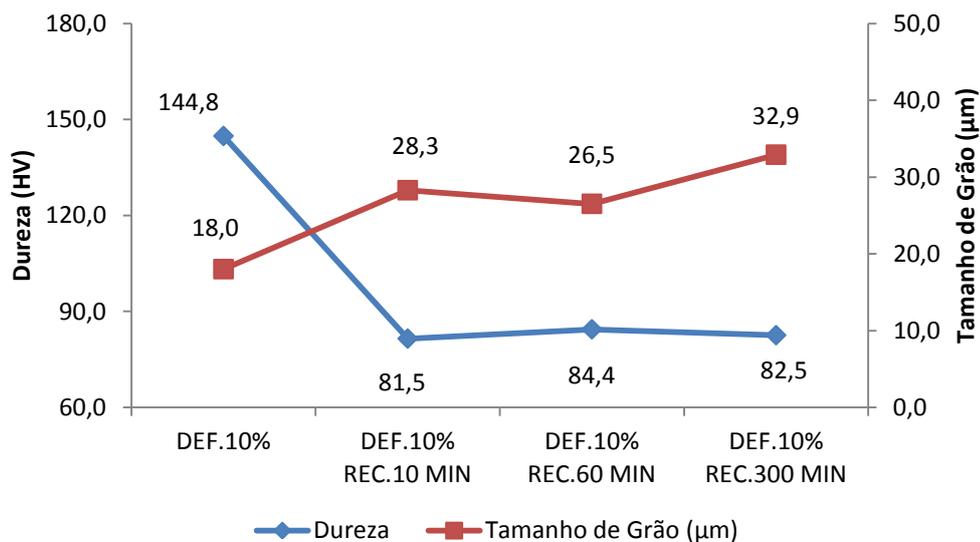
Os tamanhos de grão médios encontrados para o aço AISI 1008 30% pré-deformado foram 22,8 μm , 33,8 μm e 40,1 μm para os tempos de encharque de 10 min, 60 min e 300 min respectivamente.

As figuras 50, 51 e 52 sintetizam a relação das variáveis tamanho de grão médio e dureza com os diferentes tempos de encharque para cada % de pré-deformação respectivamente.

Observa-se nas amostras 10% pré-deformadas uma redução considerável no valor médio de dureza quando recozidas por 10 min. Para tempos de encharque de 60 min e 300 min houve uma manutenção da mesma. Já em relação ao tamanho médio dos grãos, percebe-se um aumento contínuo de acordo com o tempo de encharque, excetuando-se o verificado no tempo de 60 min.

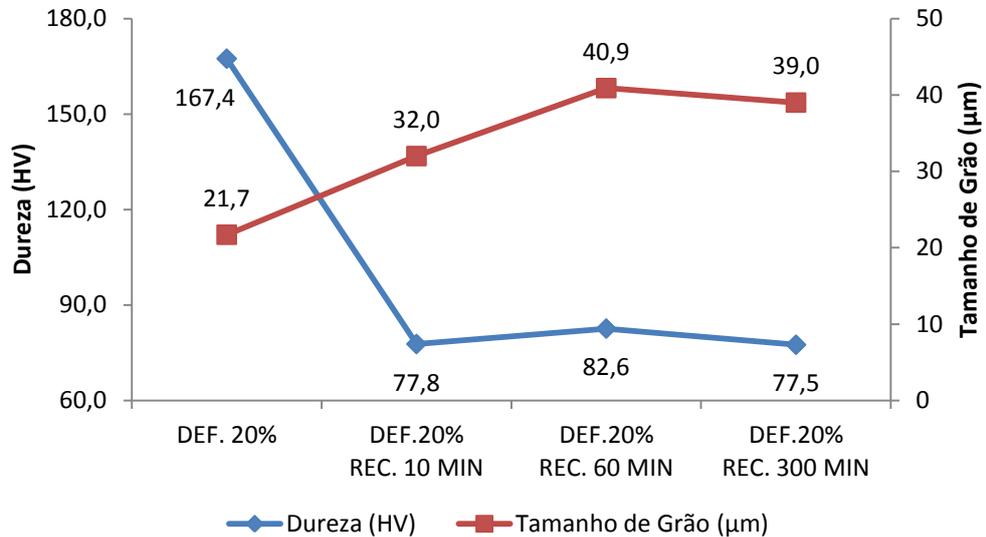
Os resultados de ensaio de dureza das amostras 20% pré-deformadas evidenciam uma redução considerável para um recozimento por 10 min. As amostras recozidas por 60 min apresentaram medida de dureza superior, de aproximadamente 5%, quando comparada com o valor medido para as amostras recozidas por 10 min e 300 min. Já em relação ao tamanho médio dos grãos, houve um aumento contínuo de acordo com o tempo de encharque, excetuando-se o verificado no tempo de 300 min.

Figura 50– Dureza X Tamanho de Grão médio X tempo de encharque para amostras 10% pré-deformadas



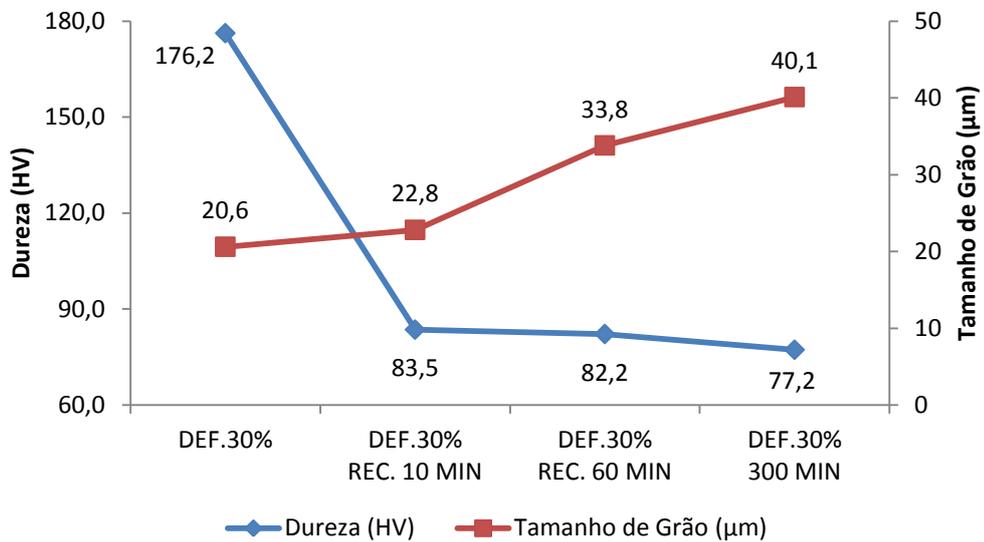
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 51– Dureza X Tamanho de Grão médio X tempo de encharque para amostras 20% pré-deformadas



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 52– Dureza X Tamanho de Grão médio X tempo de encharque para amostras 30% pré-deformadas



Fonte: Produzido pelo autor

Para as amostras 30% pré-deformadas verifica-se uma redução significativa para um recozimento por 10 min e uma diminuição mais tênue para os demais tempos de encharque utilizados. Em relação ao tamanho médio dos grãos, constata-se um aumento contínuo de

acordo com o tempo de encharque. Esse aumento de grão médio é facilmente percebido através da análise e comparação das micrografias da figura. Tais aumentos acontecem em decorrência do estágio de aquecimento, ou seja, uma vez terminada a recuperação e a recristalização, observa-se o crescimento dos grãos, que é tão mais significativo quanto maior for o tempo de encharque.

6. CONCLUSÃO

O tempo de encharque no recozimento pleno influencia diretamente as propriedades e a microestrutura do aço AISI 1008 previamente normalizado. Para tempos de manutenção de temperatura maiores, são observados tamanhos de grão médios mais elevados, e, conseqüentemente, uma redução nos valores de dureza.

As diferentes pré-deformações, 10%, 20% e 30%, realizadas no aço AISI 1008 previamente normalizado proporcionaram ao mesmo valores de dureza cada vez mais elevados quanto mais significativos foram os encruamentos. Em relação ao tamanho de grão médio foi verificado que a técnica aplicada nesse trabalho não é adequada para grãos não equiaxiais, pois se constatou um aumento do tamanho de grão médio na direção do esforço aplicado, porém, considerando a manutenção volumétrica do grão, há uma redução na seção transversal na direção contrária àquela da aplicação do esforço.

O comportamento apresentado pelas amostras pré-deformadas (10%, 20% e 30%) seguidas de recozimento pleno (10 min, 60 min e 300 min) foi similar àquele verificado pelos corpos de prova previamente normalizados antes do recozimento pleno (10 min, 60 min e 300 min), ou seja, foi observado aumento médio nos tamanhos de grão e uma redução nos valores de dureza quanto maiores os tempos de encharque avaliados.

Para um mesmo tempo de encharque (10 min, 60 min e 300 min) no recozimento pleno, os tamanhos médios de grão cresceram na medida em que se observou encruamentos mais significativos (10%, 20% e 30%). Em relação aos valores de dureza, houve uma manutenção destes valores independente de quão encruado se encontrava as amostras para cada tempo de encharque avaliado, verificando-se uma diferença de aproximadamente 5% em relação à média.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E8: Standard test methods for tension testing of metallic materials. In: Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, USA, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 87: Aços Carbono e Ligados para Construção Mecânica - Designação e Composição Química. Rio de Janeiro, 2000.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589p.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 590p.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 5 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 1982. 518p.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2008. 599p.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4 ed. São Paulo: Blücher, 2008. 672p.

COUTINHO, C. B. **Materiais metálicos para engenharia**. Belo Horizonte: FCO, 1992. 405p.

DIETER, G. E. **Mechanical metallurgy**. 3 ed. Columbus: McGraw-Hill, 1986. 800p.

KRAUSS, G. **Steel: heat treating and processing principles**. Ohio: American Society for Metals – ASM International, 1990. 497p.

REED-HILL, R. E. **Princípios de metalurgia física**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982. 776p.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2010. 648p.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 5 ed. São Paulo: Edgard BlücherLtda, 1982. 286p.

TOTTEN, G. E. **Steel heat treatment: metalurgy and technologies**. 2 ed. Portland: Portland University. 2007. 833p.

VAN VLACK, Lawrence H.. **Princípios de ciência dos materiais**. SÃO PAULO: Edgard Blücher, c1970. 427p.

