

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

**RAMILLE DE CASTRO**

**EFEITO DO TAMANHO DE GRÃO EM DIFERENTES PROPRIEDADES DO AÇO**  
**AISI 1010**

**Orientador (a): Elaine Carballo Siqueira Corrêa**  
**Coorientador (a): Wellington Lopes**

**BELO HORIZONTE**  
**2014**

**RAMILLE DE CASTRO**

**EFEITO DO TAMANHO DE GRÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO  
AISI 1010**

Monografia apresentada como Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

**Belo Horizonte, 2014**

**EFEITO DO TAMANHO DE GRÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO  
AISI 1010**

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**

---

Profa Elaine Carballo Siqueira Corrêa (orientadora)  
Departamento de Engenharia de Materiais / CEFET-MG

---

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

---

Prof. Joel Romano Brandão  
Departamento de Engenharia de Materiais / CEFET-MG

---

Eng. Suzanny Cristina Soares Martins  
CAPES / Pós-Graduação em Engenharia de Materiais / CEFET-MG

## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar as características e propriedades mecânicas de um aço baixo carbono utilizado em fabricação de produtos estampados, em função do tamanho de grão. Foram analisadas nove condições do aço baixo carbono: na forma em que foi recebido (estado inicial), tratado termicamente por meio de normalização, durante 30 minutos, 60 minutos, 180 minutos e 360 minutos e, tratado termicamente pelo processo de recozimento durante 30 minutos, 60 minutos, 180 minutos e 360 minutos. Para o ensaio de tração foram selecionadas quatro condições: estado inicial, normalizado durante 30 minutos, recozido durante 60 e 180 minutos.

Este trabalho tem como objetivo determinar e analisar as seguintes propriedades mecânicas em função do tamanho de grão: estruturas metalográficas, dureza, limite de escoamento, limite de resistência, ductilidade, estampabilidade através dos coeficientes de anisotropia, anisotropia planar e média.

**Palavras chaves: tamanho de grão; tratamento térmico; dureza.**

## **ABSTRACT**

The present study aims to evaluate the characteristics and the mechanical properties of a low carbon steel, used in the manufacture of stamped products, depending on the grain size. Nine conditions of microstructure were checked: in the form it was received (initial state) and heat treated by means of normalized, for 30 minutes, 60 minutes, 180 minutes and 360 minutes, and thermally treated by annealing process for 30 minutes, 60 minutes, 180 minutes and 360 minutes. For tensile tests, four conditions were selected: initial state, normalized for 30 minutes, annealed for 60 and 180 minutes.

This study aims to determine and analyze the following mechanical properties as a function of grain size: metallographic structures, hardness, yield strength, tensile strength, ductility, drawability by the anisotropy coefficients, planar and medium anisotropy.

**Keywords: grain size; heat treatment; hardness.**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Grão de Ferro Cromo .....	12
Figura 2: Contornos de grão de baixo ângulo, alto ângulo e inclinado .....	13
Figura 3: Orientação de grãos após processo de laminação .....	20
Figura 4: Direções de deformação para obtenção da anisotropia .....	21
Figura 5: Escoamento para $R= 1$ , $R < 1$ e $R > 1$ .....	22
Figura 6: Equipamento para realização do ensaio de Erichsen .....	23
Figura 7: Altura do copo indica o índice de Erichsen .....	24
Figura 8: Detalhe do Ensaio Olsen .....	25
Figura 9: Curvas típicas de tração de aços baixo carbono .....	26
Figura 10: Distribuição de força de corte .....	29
Figura 11: Esforços mecânicos no processo de dobramento .....	29
Figura 12: Ferramentas da estampagem profunda .....	30
Figura 13: Blanque e peça após a Estampagem .....	31
Figura 14: Propriedades mecânicas x modo de conformação .....	32
Figura 15: Esforços atuantes no processo de Estampagem .....	33
Figura 16: Curva esquemática da Têmpera .....	35
Figura 17: Curva de Equilíbrio Fe-C .....	37
Figura 18: Fluxograma do Trabalho Desenvolvido .....	39
Figura 19: Corpo de prova utilizado para a realização da análise microestrutural e dos ensaios de dureza .....	40
Figura 20: Corpos de prova utilizados para a realização dos ensaios de tração (dimensões em mm) .....	41
Figura 21: Forno utilizado nos tratamentos térmicos .....	42
Figura 22: Microscópio óptico acoplado ao computador .....	43
Figura 23: Programa Image Pro Plus em uso .....	44
Figura 24: Microdurômetro .....	45
Figura 25: Máquina universal de ensaios .....	46
Figura 26: Microestrutura do aço 1010 no estado como recebido. ....	47
Figura 27: Microestrutura do aço 1010 após recozimento a 920°C durante 30 minutos .....	48
Figura 28: Microestrutura do aço 1010 após normalização a 920°C durante 30 minutos .....	48
Figura 29: Microestrutura do aço 1010 após recozimento a 920°C durante 60 minutos .....	49
Figura 30: Microestrutura do aço 1010 após normalização a 920°C durante 60 minutos .....	49
Figura 31: Microestrutura do aço 1010 após recozimento a 920°C durante 180 minutos .....	50
Figura 32: Microestrutura do aço 1010 após normalização a 920°C durante 180 minutos .....	50
Figura 33: Microestrutura do aço AISI 1010 após recozimento a 920°C durante 360 minutos .....	51
Figura 34: Microestrutura do aço AISI 1010 após normalização a 920°C durante 360 minutos .....	51

Figura 35: Comparação entre tamanho de grão e diferentes condições de recozimento.....	52
Figura 36: Comparação entre tamanho de grão e diferentes condições de normalização.....	53
Figura 37: Comparação entre as durezas do material no estado inicial e recozido.....	55
Figura 38: Comparação entre as durezas e diferentes condições de normalização.....	55
Figura 39: Curva tensão x deformação para o aço 1010 no estado inicial para as três direções.....	56
Figura 40: Curva tensão x deformação para o aço 1010 normalizado durante 30 minutos para as três direções.....	57
Figura 41: Curva Tensão x Deformação para o aço AISI 1010 Normalizado durante 60 minutos para as três direções.....	57
Figura 42: Curva tensão x deformação para o aço 1010 normalizado durante 180 minutos para as três direções.....	58
Figura 43: Limite de escoamento em função das condições do aço AISI 1010.....	60
Figura 44: Limite de resistência em função das condições do aço AISI 1010.....	60
Figura 45: Alongamento em função das condições do aço AISI 1010.....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composições químicas e propriedades mecânicas típicas de aços para estampagem no Brasil.....	37
Tabela 2: Composição química do aço utilizado no trabalho.....	38
Tabela 3: Especificação técnica do aço AISI 1010 .....	38
Tabela 4: Condições de tratamento térmico consideradas no trabalho .....	41
Tabela 5: Condições selecionadas para ensaio de tração .....	42
Tabela 6: Tamanhos de grão do aço 1010 em diferentes condições .....	52
Tabela 7: Durezas do aço AISI 1010 em diferentes condições .....	54
Tabela 8: Propriedades do aço AISI 1010 no estado inicial (como recebido) nas diferentes direções.....	58
Tabela 9: Propriedades do aço AISI 1010 Normalizado durante 30 minutos nas diferentes direções.....	58
Tabela 10: Propriedades do aço AISI 1010 Recozido durante 60 minutos nas diferentes direções.....	59
Tabela 11: Propriedades do aço AISI 1010 Recozido durante 180 minutos nas diferentes direções.....	59
Tabela 12: Valores de anisotropia planar e normal média para a condição da amostra recebida .....	62
Tabela 13: Valores de anisotropia planar e normal média para a condição de Recozimento durante 60 minutos .....	63
Tabela 14: Valores de anisotropia planar e normal para a Condição de recozimento durante 180 minutos .....	64



## SUMÁRIO:

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVOS.....	11
2.1. Objetivos Gerais .....	11
2.2. Objetivos Específicos .....	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1 Grão .....	12
3.2. Deformação plástica e comportamento mecânico dos metais.....	14
3.3. Estampabilidade .....	20
3.3.1. Anisotropia .....	20
3.2.2. Ensaio de Estampabilidade .....	23
3.2.2.1. Ensaio de Erichsen.....	23
3.2.2.2. Ensaio de Olsen .....	24
3.2.2.3. Ensaio de Tração para Chapas.....	25
3.4 Estampagem .....	27
3.4.1 Características Gerais .....	27
3.4.2 Parâmetros do Processo .....	27
3.4.3 Processos de Estampagem.....	28
3.4.3.1 Estiramento.....	28
3.4.3.2 Corte .....	28
3.4.3.3. Dobramento .....	29
3.4.3.4 Estampagem Profunda.....	30
3.4.4. Esforços atuantes do Processo.....	32
3.5. Tratamento Térmico .....	33
3.5.1. Recozimento .....	34
3.5.1.1. Recozimento Intermediário .....	34
3.5.2. Normalização.....	35
3.5.3. Têmpera.....	35
3.6. Aço Carbono.....	36
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	38
4.1. Material.....	38
4.2. Descrição geral do trabalho desenvolvido.....	38
4.3. Corpos de Prova .....	39

4.4. Tratamentos Térmicos .....	40
4.5. Análise da Microestrutura .....	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	47
5.1. Caracterização do Material no Estado Inicial.....	47
5.2. Microestrutura do Material Após os Tratamentos Térmicos.....	47
5.3 Medidas de tamanho de grão .....	51
5.4 Dureza.....	53
5.5 Propriedades Determinadas no Ensaio de Tração .....	56
5.6 Anisotropia .....	61
6. CONCLUSÃO:.....	65
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	66

## 1. INTRODUÇÃO

Aços baixo carbono possuem, em geral, grãos de ferritaequiaxiais e colônias de perlita, em pequena quantidade. São aços com boa conformabilidade e soldabilidade, baixa dureza e alta ductilidade. Os aços carbono são comumente utilizados em processos de estampagem e em diversos seguimentos da indústria.

Estampabilidade é a capacidade que um material tem em adquirir a forma de uma matriz, através do processo de estampagem, desde que o material não se rompa ou sofra defeitos de superfície ou de forma. A estampagem de chapas pode ser um processo simples, quando se utiliza apenas uma operação ou a combinação de várias operações. Este processo de fabricação é muito utilizado em uma grande variedade de diferentes graus de complexidades. Em geral,essa operação possui o custo baixo das peças, bom acabamento e, peças com elevada resistências. A avaliação da estampabilidade de um aço carbono utilizando-se diversos ensaios, como tração, Erichen e Olsen.

Os tratamentos térmicos provocam alterações na microestrutura do aço, aumentando ou diminuindo seu tamanho de grão. Com isto, as propriedades mecânicas do material serão modificadas de acordo com a aplicação do material.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivos Gerais**

- Analisar o efeito do tamanho de grão em diferentes condições de tratamentos térmicos e mecânicos nas propriedades mecânicas do aço AISI 1010.

### **2.2. Objetivos Específicos**

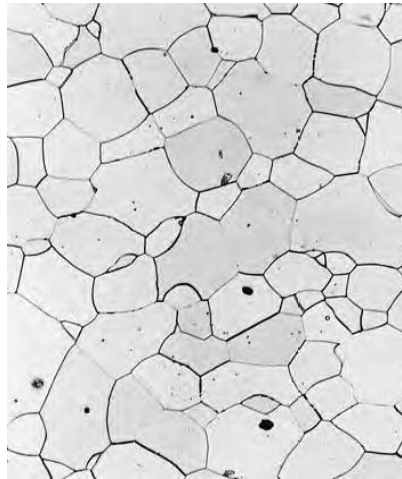
- Verificar os efeitos na variação do tamanho de grão do material ao ser submetido ao tratamento de recozimento e normalização em tempos de encharque diferentes.
- Verificar o efeito do tamanho de grão em diferentes propriedades, como dureza, limite de escoamento, limites de resistência mecânica, alongamento e estampabilidade

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Grão

Responsáveis pela composição de grande maioria dos sólidos cristalinos, os grãos são pequenas porções da estrutura cristalina que se originam a partir de um núcleo e crescem segundo uma determinada orientação cristalográfica (Figura 1). Durante a solidificação vários núcleos são formados, dando origem a diversos grãos com orientações cristalográficas distintas. A interface entre os grãos recebe o nome de contorno de grão e é considerada uma região de descontinuidade, de alta energia (CALLISTER, 2006).

**Figura 1: Grão de Ferro Cromo**



Fonte: Callister, 2006.

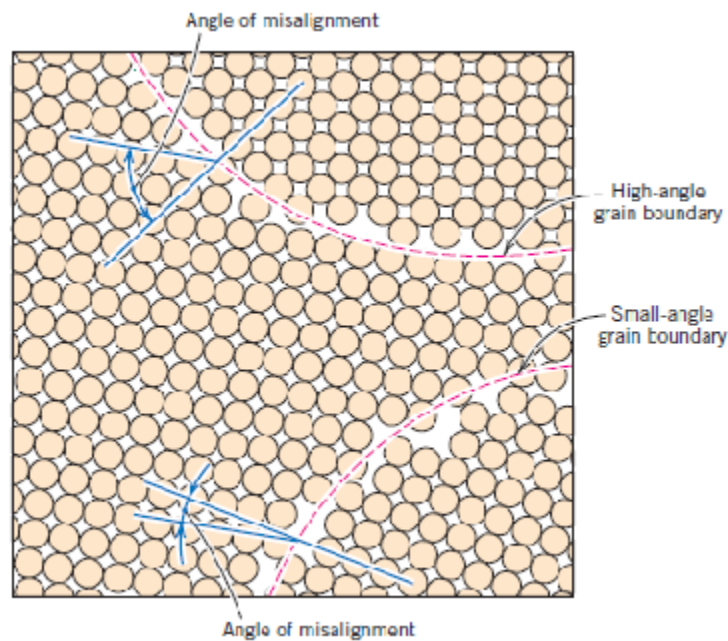
Discordância é um defeito linear, unidimensional, relacionado a deslizamento de plano cristalino, no qual alguns átomos se encontram desalinhados (CALLISTER, 2006).

O contorno de grão possui a largura de alguns poucos átomos e dentro dele existem desencontros atômicos na transição de orientação cristalina de um grão para o outro. Quando esse desencontro é pequeno, com poucos graus, recebe o nome de contorno de grão de baixo ângulo que pode ser descrito em termos de arranjo de discordâncias. Quando discordâncias de aresta estão alinhadas em forma de cunha e apresentando um ângulo  $\alpha$  qualquer recebe o nome de contorno de grão inclinado e quando o ângulo  $\alpha$  é paralelo ao contorno de grão tem-se que chama-se de contorno torcido, que é proporcionado por discordâncias espirais (Figura 2).

O contorno de grão de baixo ângulo normalmente é formado por discordâncias de arestas, espirais e mistas. As discordâncias se arranjam desta maneira de forma a diminuir

seus campos elásticos e, conseqüentemente, a energia interna. Este rearranjo das discordâncias se dá termicamente. Nos contornos de grão de alto ângulo as diferenças de orientação de um grão para o outro são bem maiores do que nos contorno de grão de baixo ângulo e não podem ser descritas em termos de arranjo de discordâncias. A região do contorno de grão é bem defeituosa e seus átomos têm um menor numero de coordenação do que os átomos no interior do grão (CALLISTER, 2006).

**Figura 2: Contornos de grão de baixo ângulo, alto ângulo e inclinado**



Fonte: Callister, 2006.

No contorno de grão os átomos estão ligados de maneira menos regular o que faz com que a energia do mesmo seja superior que a energia superficial do material, o que proporciona maior reatividade aos contornos de grãos do que ao próprio grão. A energia interfacial é menor em materiais com grãos maiores do que em materiais com grãos menores devido ao fato de que existe menos área de contorno total nos grãos maiores. Os grãos crescem na presença de temperatura elevada a fim de reduzir a energia de contorno total. Embora um material policristalino apresente um arranjo desordenado de átomos e ausência de ligações regulares nos contornos de grãos, ele é um material muito forte, pois forças de coesão existem no interior e nos contornos de grão, além disso, a densidade de um material policristalino é, tecnicamente, a mesma de um material monocristalino, desde que estes materiais sejam iguais (CALLISTER, 2006).

Contorno de macla é um tipo especial de contorno de grão, nele existe uma simetria específica em espelho da rede cristalina, ou seja, os átomos de um lado do contorno de grão estão localizados em posições de imagem especular dos átomos do outro lado do contorno. A região de material entre estes grãos é chamada de macla. Este tipo de defeito pode ocorrer durante a solidificação, deformação, recristalização ou durante o crescimento de grão e resultam de deslocamentos atômicos que são produzidos por forças de cisalhamento e também por tratamentos térmicos feitos após deformações. Quando é resultado de recristalização ou do crescimento de grão, a macla recebe o nome de macla de recozimento e quando é resultado da aplicação de força de cisalhamento recebe o nome de macla de deformação (PINTO, 2004).

A maclação ocorre em plano cristalográfico definido e direção específica dependentes da estrutura cristalina. As maclas de recozimento são encontradas normalmente em materiais que possuem estrutura cúbica de faces centradas (CFC), e as maclas de deformação em materiais com estrutura hexagonal compacta (HC) e cúbica de corpo centrado (CCC). As maclas correspondem àquelas regiões que possuem laterais relativamente retas e um contraste visual diferente daquele apresentado por regiões não macladas dos grãos no interior do qual se encontram (CALISTER, 2006).

### **3.2. Deformação plástica e comportamento mecânico dos metais**

Em sólidos cristalinos, a deformação plástica envolve, na maioria das vezes, o movimento de discordâncias. Esta deformação é permanente, e a resistência e a dureza são medidas de resistência de um material a esta deformação (PINTO, 2004).

Os dois tipos fundamentais de discordância são a discordância aresta e a discordância espiral. Na primeira, existe uma distorção localizada da rede cristalina ao longo da extremidade de um semiplano adicional de átomos, que também define a linha de discordância. Já a segunda, pode ser considerada como a resultante de uma distorção por cisalhamento (a linha da discordância passa através do centro de uma rampa espiralada de plano atômico). Muitas discordâncias em materiais cristalinos são discordância mista, ou seja, nelas há componentes em aresta e em espiral (LANDGRAF, et al., 2006).

A deformação plástica corresponde ao movimento de grandes números de discordâncias. Uma discordância aresta se move em resposta à aplicação de uma tensão de cisalhamento em uma direção perpendicular à sua linha. Antes e após o movimento de uma

discordância, através de alguma região específica do cristal, o arranjo atômico encontra-se ordenado e perfeito, e somente com a aplicação da tensão é que este arranjo é rompido (PINTO, 2004).

O processo pelo qual a deformação plástica é produzida por um movimento de uma discordância, chama-se de escorregamento. O plano cristalográfico em que a linha de discordância se movimenta denomina-se plano de escorregamento (CALISTER, 2006).

A deformação plástica macroscópica corresponde apenas a uma deformação permanente que resulta do movimento de discordâncias, ou escorregamento, em resposta à aplicação de uma tensão de cisalhamento. Sendo um movimento similar à locomoção de uma lagarta (CALISTER, 2006).

O movimento de discordância espiral, em resposta à aplicação de uma tensão de cisalhamento, tem direção perpendicular à direção da tensão. Para uma discordância aresta, o movimento é paralelo à tensão. Porém, em ambas as discordâncias, a deformação, global ou líquida, é a mesma. Já na discordância mista, a direção do movimento não é perpendicular e nem paralela, está exatamente entre esses dois extremos (LANDGRAF, et al., 2006).

Tecnicamente, todos os materiais possuem discordâncias que surgiram com a solidificação, com a deformação plástica e com o resultado das tensões térmicas durante o resfriamento rápido. O número de discordâncias (densidade de discordâncias) em um material é o comprimento total de discordâncias por unidade de volume ou o número de discordâncias que intercepta uma área unitária de uma seção aleatória. As unidades de densidade de discordâncias são milímetros de discordância por milímetro cúbico ou milímetro quadrado, podendo ser tão baixas quanto às encontradas em cristais metálicos solidificados cuidadosamente ( $10^3 \text{ mm}^{-2}$ ) ou tão altas quanto de metais muito deformados ( $10^9$  a  $10^{10} \text{ mm}^{-2}$ ). O tratamento térmico de um metal deformado pode diminuir a densidade de discordâncias para uma ordem de até  $10^5$  a  $10^6 \text{ mm}^{-2}$  (LANDGRAF, et al., 2006).

Muitas das características das discordâncias são importantes em relação às propriedades mecânicas dos metais, como os campos de deformação que existem ao redor das discordâncias que são importantes na determinação da mobilidade das discordâncias, bem com sua habilidade em se multiplicar (CALISTER, 2006).

Quando os metais são submetidos à deformação plástica, um pouco da energia de deformação é retida internamente, e a maioria é dissipada. A maior parte da energia armazenada constitui-se de energia de deformação que está associada a discordâncias.

A distorção do retículo atômico, devido à presença do semiplano adicional de átomos, são impostas sobre átomos vizinhos, resultando em átomos que experimentam uma



deformação compressiva em relação aos átomos posicionados no cristal. Já abaixo do semiplano, o efeito é o oposto, os átomos da rede cristalina suportam uma deformação de tração que lhes é imposta. Para uma discordância espiral, as deformações da rede cristalina são cisalhantes. Pode-se considerar que distorções da rede cristalina são campos de deformação que se irradiam da linha da discordância. As deformações são transmitidas para os átomos vizinhos e suas magnitudes são diminuídas em função da distância radial da discordância (CALISTER, 2006).

Os campos de deformação ao redor de discordâncias que se encontram próximas umas das outras podem interagir de tal forma que sejam impostas forças sobre cada discordância pelas interações combinadas de todas as suas discordâncias vizinhas. Essas interações são possíveis entre discordâncias espirais, de aresta e/ou mista e para uma variedade de orientações. Esses campos de deformação e as forças associadas são importantes nos mecanismos de aumento de resistênciamecânica para os metais (PINTO, 2004).

Em uma deformação plástica, o número de discordâncias aumenta muito. Fontes importantes destas discordâncias são outras discordâncias, que se multiplicam. Além disso, contornos de grãos, atuam como concentrações de tensão, podem servir como sítios de formação de discordâncias durante a deformação (CALISTER, 2006).

As discordâncias não se movem com o mesmo grau de facilidade sobre todos os planos cristalográficos de átomos e em todas as direções cristalográficas. Normalmente, existe um plano preferencial no qual ocorre, em direções específicas, o movimento das discordâncias, este plano é chamado de plano de escorregamento e a direção do movimento de direção de escorregamento que, combinados, formam o sistema de escorregamento. Esse sistema depende de estrutura cristalina do metal e é tal que a distorção atômica que acompanha o movimento de uma discordância seja mínima. Para uma estrutura cristalina específica o plano de escorregamento é aquele que possui uma maior densidade planar e a direção de escorregamento corresponde à direção que, no mesmo plano, apresente uma maior densidade linear. Para uma mesma estrutura cristalina particular podem existir vários tipos de sistemas de escorregamento que representam as diferentes combinações entre planos e direções de escorregamento (CALISTER, 2006).

A deformação e o escorregamento em materiais policristalinos são bastante complexos, isso se deve ao fato de que a direção do escorregamento varia de um grão para o outro, uma vez que este tipo de material apresenta um número grande de grãos e cada grão possui uma orientação cristalina aleatória (CALISTER, 2006).

De maneira geral, a deformação plástica de um material policristalino corresponde à distorção comparável de grãos individuais devido ao escorregamento. Durante a deformação a integridade mecânica e coesão são mantidas ao longo dos contornos de grãos, ou seja, os contornos de grão não se abrem ou separam, conseqüentemente, cada grão está parcialmente restrito à forma que pode assumir devido a seus grãos vizinhos. Antes da deformação os grãos possuem aproximadamente o mesmo tamanho em todas as direções e, após a deformação os grãos se tornam alongados ou achatados ao longo da direção na qual a amostra foi submetida a esforço. Metais policristalinos são mais resistentes do que seus equivalentes monocristalinos, o que significa que maiores esforços são requeridos para que se dê início ao escorregamento e conseqüentemente ao escoamento. Isto ocorre também, em grande parte, como um resultado de restrições geométricas as quais os grãos são submetidos durante a deformação. Embora um único grão possa ter orientação favorável ao escorregamento, ele não pode se deformar até que seus grãos vizinhos, orientados de maneira desfavorável, sejam capazes de sofrer escorregamento exigindo, portanto um nível mais elevado de tensões aplicadas (CALISTER, 2006).

Adicionalmente ao escorregamento, a deformação plástica em alguns materiais pode ocorrer por maclagem, isto é, uma força de cisalhamento pode produzir deslocamentos atômicos em bloco tal que um dos lados do plano os átomos estejam localizados em posições de imagens especulares dos átomos do outro lado. A magnitude do deslocamento dentro da região maclada é proporcional a distância a partir do plano de macla. Além disso, a maclagem ocorre num plano cristalográfico definido e em uma direção específica que é dependente do tipo de estrutura do cristal (LANDGRAF, et al., 2006).

Para a maclagem a tensão devida ao cisalhamento é homogênea. Comparando o processo de deformação por escorregamento e processo de deformação por maclagem nota-se diferenças em vários aspectos. Primeiramente, para a deformação por escorregamento, a orientação cristalográfica acima e abaixo do plano de escorregamento é a mesma, tanto antes como depois de ocorrida a deformação, já para a maclagem, ocorrerá uma reorientação através do plano de macla. O escorregamento ocorre em espaços múltiplos e distintos do espaçamento atômico, por outro lado, na maclagem o deslocamento é menor do que a separação interatômica (CALISTER, 2006).

Maclas de deformação ocorre em metais que possuem estrutura cristalina do tipo HC e CCC e só ocorrem a baixas temperaturas e sob altas cargas de impacto, condições segundo as quais o processo de escorregamento está restrito, pois existem poucos sistemas de escorregamentos ativos. A quantidade de deformação plástica volumétrica resultante da

maclagem é pequena se comparada à resultante da deformação por escorregamento. No entanto, a importância da maclagem reside nas reorientações cristalográficas que a acompanham, pois, a maclagem pode ativar novos sistemas de escorregamento em orientações favoráveis em relação ao eixo de tensão possibilitando que o processo de escorregamento ocorra (CALISTER, 2006).

Uma característica importante e requisitada dos materiais é a resistência mecânica e, logo o conhecimento dos mecanismos para aumento da resistência mecânica torna-se importante. Sendo a deformação macroscópica dos metais correspondente ao movimento de grande número de discordâncias, a habilidade de um metal para se deformar plasticamente depende da habilidade das discordâncias para se moverem. Uma vez que a dureza e a resistência estão relacionadas com a facilidade com que a deformação plástica pode ser manipulada mediante a redução da mobilidade das discordâncias, a resistência mecânica pode ser melhorada, pois maiores forças serão necessárias para dar início à deformação plástica. Por outro lado, quando menos movimento de discordância houver, maior será a facilidade com a qual um metal poderá se deformar. Tecnicamente, todas as técnicas de aumento de resistência mecânica dependem de restringir ou impedir o movimento de discordâncias, conferindo maior dureza e mais resistência mecânica a um material (LANDGRAF, et al., 2006)

Discute-se atualmente os mecanismos de aumento de resistência mecânica para metais monofásicos focados em determinados pontos, tais como redução do tamanho de grão e formação de ligas por solução sólida e encruamento (PINTO, 2004).

O tamanho do grão de um material influencia nas suas propriedades mecânicas. Os grãos adjacentes possuem, normalmente, orientações cristalográficas diferentes e um contorno de grão comum. Durante a deformação plástica o escorregamento também ocorre através desse contorno comum. O contorno de grão atua com uma barreira ao movimento de discordâncias por duas razões, a primeira delas é o fato de que uma vez que dois grãos possuem orientações diferentes, uma discordância que passa para dentro do grão adjacente terá que mudar sua direção de movimento, isso se torna mais difícil à medida que a diferença de orientação cristalográfica torna-se maior. A outra razão é que a desordenação atômica no interior de uma região de contorno de grão resultará em uma descontinuidade de planos de escorregamento de um grão para outro (CALISTER, 2006).

Para contorno de alto ângulo pode acontecer de as discordâncias não atravessarem o contorno de grão durante a deformação, e a concentração de tensões frente ao plano de escorregamento gerar novas fontes de discordâncias nos grãos adjacentes (CALISTER, 2006).

Um material que possui granulação fina é mais duro e resistente do que um material que possua granulação grosseira, uma vez que o primeiro possui uma maior área total de contornos de grão para dificultar o movimento das discordâncias. Para muitos materiais o limite de escoamento varia com o tamanho do grão conforme a seguinte relação:

$$\sigma_e = \sigma_0 + k_e d^{1/2} \quad (1)$$

Nessa expressão, conhecida como equação de Hall Petch,  $d$  representa o diâmetro médio do grão, enquanto  $\sigma_0$  e  $k_e$  são constantes para cada material específico. No entanto a equação não é válida para materiais que possuem grãos muito grandes nem grãos muito pequenos. O tamanho de grão pode ser regulado mediante o ajuste da taxa de solidificação a partir da fase líquida e também por deformação plástica seguida por tratamento térmico apropriado. A redução do tamanho de grão aumenta não só a resistência mecânica como também a tenacidade de muitas ligas (PINTO, 2004).

Contornos de grãos de baixo ângulo não eficazes como barreira ao escorregamento, pois possuem um leve desalinhamento cristalográfico através do contorno. Por outro lado, os contornos de macla irão bloquear de maneira eficaz o escorregamento e conseqüentemente aumentar a resistência mecânica do material. Contornos entre interface diferentes também são eficazes como barreiras ao escorregamento, o que será importante no aumento da resistência mecânica de ligas mais complexas. Os tamanhos e as formas das interfaces constituintes afetam significativamente as propriedades mecânicas das ligas com muitas faces (CALISTER, 2006).

Outra técnica utilizada para aumentar a resistência mecânica dos metais é a formação de ligas com átomos de impurezas que aparecem tanto em solução sólida substitucional quanto em solução sólida intersticial, esse processo é chamado aumento de resistência por solução sólida. Os metais altamente puros são geralmente mais macios e mais fracos que as ligas nas qual tem esse mesmo material como base. O aumento das impurezas ocasiona um aumento no limite de resistência à tração e no limite de escoamento (CALISTER, 2006).

As ligas são mais resistentes que os metais puros porque os átomos de impureza entram em solução sólida e, geralmente, impõe deformações na rede cristalina sobre os átomos vizinhos. Interações do campo de deformações na rede cristalina entre os átomos de impureza resultam desse processo e, como conseqüência o movimento das discordâncias é restringido. Por exemplo, um átomo de impureza que seja menor do que um átomo hospedeiro

que ele esteja substituindo exerce tração sobre a rede cristalina vizinha, ao contrario do que acontece se o átomo for maior do que o hospedeiro que ele substitui, pois irá causar deformações compressivas na rede cristalina vizinha (LANDGRAF, et al., 2006).

O encruamento é o fenômeno pelo qual um material dúctil se torna mais duro e mais resistente quando submetido a uma deformação plástica, ou seja, é o aumento da resistência mecânica devido a redução da mobilidade de discordâncias. Pode ser conhecido como endurecimento por trabalho, devido ao fato de que a temperatura em que a deformação ocorre ser fria em relação à temperatura de fusão do metal. A maioria dos metais encrua a temperatura ambiente. Esse processo além de resultar em um aumento da dureza ocasiona também uma, normalmente indesejada, redução da ductilidade (CALISTER, 2006).

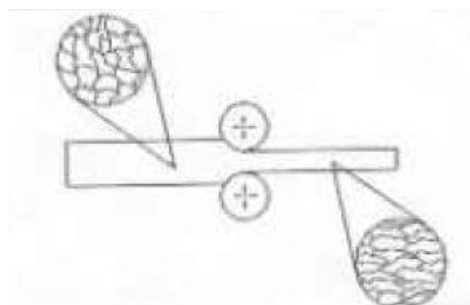
### 3.3. Estampabilidade

A estampabilidade é a capacidade que uma chapa tem de adquirir a forma de uma matriz, através do processo de estampagem, não apresentando defeitos de superfície ou de forma, além de não se romper (MORO E AURAS, 2006).

#### 3.3.1. Anisotropia

Anisotropia é a variação das propriedades mecânicas de acordo com a direção. Após a deformação mecânica, a anisotropia ocorre devido a orientação preferencial dos grãos no metal, surgindo assim uma anisotropia cristalográfica, causada ou pelo alinhamento de inclusões, vazios, segregações, ou por uma segunda fase precipitada, como pode ser observado na Figura 3a orientação dos grãos após o processo de laminação (SCHAEFFER, 1999).

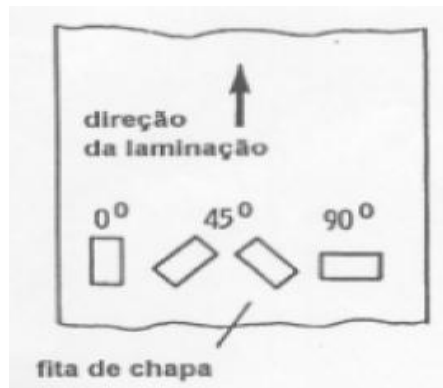
**Figura 3: Orientação de grãos após processo de laminação**



Fonte: SCHAEFFER, 1999.

A estampabilidade depende em grande parte da resistência mecânica da chapa ao afinamento durante o processo de estampagem (FILHO, 2011). Em uma chapa são retirados corpos de prova em forma de tiras retangulares, de acordo com a direção de laminação ( $0^\circ$ ), direção transversal ( $90^\circ$ ) e a direção de  $45^\circ$ , como pode ser observado na Figura 4.

**Figura 4: Direções de deformação para obtenção da anisotropia**



Fonte: Ferrarini, 2004.

Em cada um dos corpos de prova é realizado o ensaio de tração, para determinar o coeficiente de anisotropia normal  $R$ , definido da seguinte forma:

$$R = \frac{\varepsilon_W}{\varepsilon_T} \quad (2)$$

$$\varepsilon_t = \ln\left(\frac{t}{t_0}\right) \quad (3)$$

$$\varepsilon_w = \ln\left(\frac{w}{w_0}\right) \quad (4)$$

Onde,  $w_0$ ,  $t_0$  são largura e comprimento iniciais do corpo de prova e  $w$  e  $t$  são largura e comprimento do corpo de prova após determinada deformação plástica, e  $\varepsilon_t$  e  $\varepsilon_w$ , são as deformações verdadeiras na largura e no comprimento, respectivamente (FILHO, 2011).

Pode-se calcular o coeficiente de anisotropia pela seguinte fórmula:

$$R = -\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_w + \varepsilon_t} \quad (5)$$

Com isso obtém-se em cada uma das direções longitudinal, transversal, e 45°,  $R_{0^\circ}$ ,  $R_{45^\circ}$  e  $R_{90^\circ}$ .

Podem ocorrer três situações distintas:

$R_{0^\circ} = R_{45^\circ} = R_{90^\circ} = 1$ , isotropia total.

$R_{0^\circ} = R_{45^\circ} = R_{90^\circ} \neq 1$ , anisotropia normal, média, e anisotropia planar.

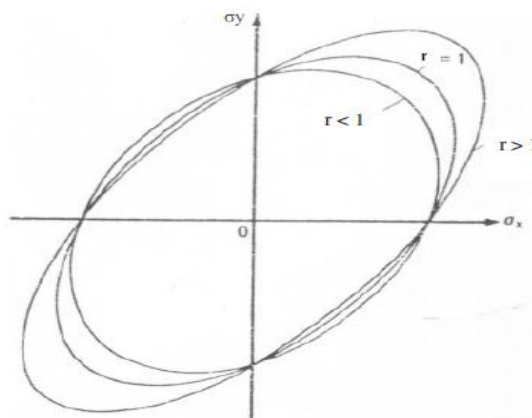
$R_{0^\circ} \neq R_{45^\circ} \neq R_{90^\circ} \neq 1$ , anisotropia média ou normal, somadas a anisotropia planar.

Em um sistema biaxial, onde  $\sigma_x = \sigma_y$ , um valor alto para  $R$  ( $R$  maior que 1), implica em uma alta resistência ao afinamento da chapa e, para um baixo valor de  $R$  ( $R$  menor que 1), ocorre a facilidade em afinamento da chapa, ou seja, em uma resistência biaxial baixa. Para materiais isotrópicos o a anisotropia média e planar será zero. A Figura 5 mostra o escoamento localizado nas condições descritas (FILHO, 2011).

O coeficiente de anisotropia planar  $\Delta R$  está relacionado a possibilidade de ocorrer a formação de orelhas na estampagem. Pode ser calculado conforme equação 7.

$$\Delta R = \frac{R_{0^\circ} + R_{90^\circ}}{2} - R_{45^\circ} \quad (6)$$

**Figura 5: Escoamento para  $R = 1$ ,  $R < 1$  e  $R > 1$ .**



Fonte: Ferrarini, 2004.

A anisotropia planar é indicada pela diferença no comportamento mecânico apresentado pelo aço no plano da chapa. É responsável pela indesejável formação de orelha no processo de estampagem (FILHO, 2011).

A anisotropia normal média  $|\bar{R}|$  é esta resistência que o material apresenta e pode ser definida pela expressão:

$$|\bar{R}| = \frac{1}{4}(R_{0^\circ} + 2 * R_{45^\circ} + R_{90^\circ}) \quad (7)$$

A anisotropia média alta é relevante na estampagem profunda, proporcionando maior resistência ao afinamento durante a conformação (FILHO, 2011).

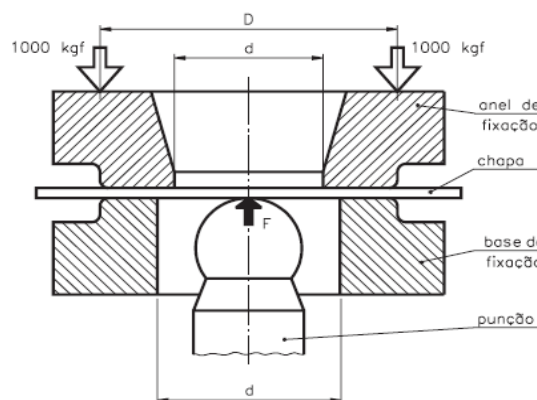
### 3.3.2. Ensaio de Estampabilidade

#### 3.3.2.1. Ensaio de Erichsen

O ensaio de Erichsen foi inventado por A. M. Erichsen em 1910 e é padronizado no método MB-362 e nas normas DIN 50101 e DIN 50102 (SCHAEFFER, 2009).

O ensaio Erichsen (mais utilizado na Europa e Japão) consiste em estirar um corpo de prova em forma de disco até o surgimento de uma ruptura incipiente, medindo-se então a profundidade do copo assim formado. Esta profundidade, expressa em milímetros, representa o índice de ductilidade Erichsen (IE) (SCHAEFFER, 2009). A Figura 6 mostra o equipamento utilizado no ensaio.

**Figura 6: Equipamento para realização do ensaio de Erichsen**

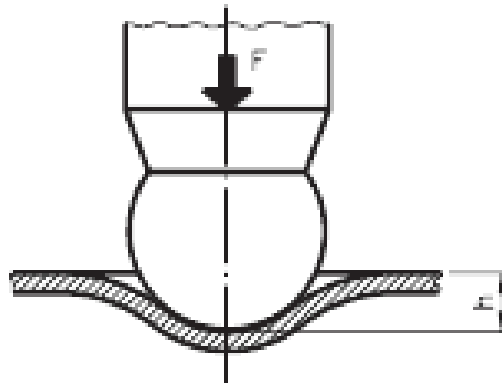


Fonte: CIMM.



O disco de chapa é inicialmente fixado entre a matriz e o anel de sujeição com carga de 1.000 kgf. O estampo tem formato esférico com diâmetro de 20mm (Figura 7). A cabeça do estampo é lubrificada (normalmente com uma graxa grafitada termo-resistente). O ensaio submete a peça primeiramente a um estiramento biaxial, e o resultado obtido é influenciado pela espessura da chapa (SCHAEFFER, 2009).

**Figura 7: Altura do copo indica o índice de Erichsen**



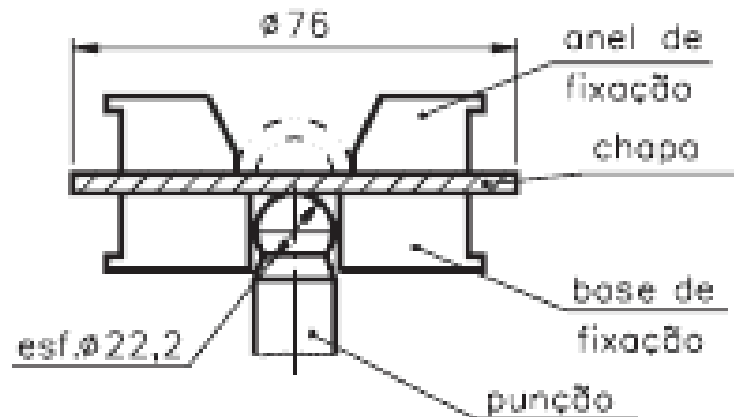
Fonte: CIMM.

O corpo de prova, como já mencionado tem formato de um disco , com diâmetro de 90mm. A espessura nominal da chapa para o teste pode variar entre 0,2 mm e 2 mm para as dimensões apresentadas na Figura 6. Existem também dispositivos capazes de ensaiar chapas com espessura nominal até 5mm (SCHAEFFER, 2009).

### 3.3.2.2. Ensaio de Olsen

O ensaio Olsen (mais utilizado nos Estados Unidos) difere do Erichsen apenas quanto às dimensões do estampo que tem cabeça esférica com 22 mm (7/8 pol) de diâmetro. O corpo de prova tem forma de disco e é fixado entre matrizes em forma de anel com 25 mm (1pol) de diâmetro interno (Figura 8). Durante o teste são medidas continuamente a carga e a altura do copo (SCHAEFFER, 2009).

**Figura 8: Detalhe do Ensaio Olsen**



Fonte: CIMM.

O índice de ductilidade Olsen é dado pela altura do copo, em milésimos de polegada, no momento em que a carga começa a cair (SCHAEFFER, 2009).

O corpo de prova tem formato de disco com diâmetro de 95mm. A espessura nominal da chapa para o ensaio Olsen é limitada a 1,57 mm (0,062 pol) devido à folga entre o estampo e as matrizes (SCHAEFFER, 2009).

### 3.3.2.3. Ensaio de Tração para Chapas

O ensaio de tração é o mais utilizado para determinar as propriedades mecânicas dos materiais. Através deste ensaio obtém-se o limite de resistência, o limite de escoamento, o grau de encruamento e também o índice de anisotropia (SCHAEFFER, 2009).

O ensaio é conduzido por uma máquina que possui uma garra fixa (normalmente embaixo) e uma garra móvel. Esse teste realizado de forma uniaxial, não possui atrito e é reduzido com velocidade constante. Os sensores presentes na máquina de tração registram a força  $F$  e o alongamento  $\Delta l$ . O ensaio pode ser finalizado pela ruptura do corpo de prova (SCHAEFFER, 2009).

Em lugar da força e do alongamento, frequentemente utilizam-se as tensões e deformações convencionais ( $S$ ,  $e$ , respectivamente) ou tensões e deformações verdadeiras ( $\sigma$ ,  $\epsilon$ , respectivamente) (CARVALHIDO, 2007):

- Tensão Convencional:  $S = P/A_0$  (9)

- Deformação Convencional:  $e = \Delta L/L_0 = (L_i - L_0)/L_0$  (10)

- Tensão Verdadeira:  $\varepsilon = S(1+e)$  (11)

- Deformação Verdadeira:  $\varepsilon = \ln L_i/L_0 = \ln (1+e)$  (12)

Onde:

$A_0$  = área da seção transversal inicial do corpo de prova;

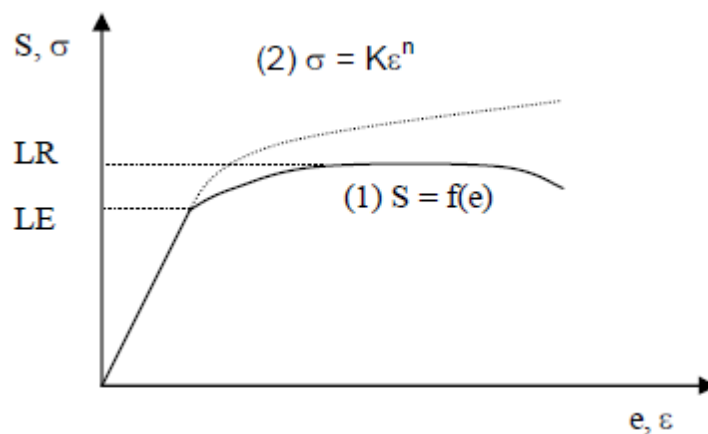
$L_0$  = comprimento inicial de corpo de prova;

$L_i$  = comprimento do corpo de prova em um instante “i”;

$L_f$  = comprimento do corpo de prova após fratura.

A Figura 9 mostra os dois tipos de curvas, convencional (1) e verdadeira (2), que foram obtidas em um ensaio de tração de aço de baixo carbono laminado a frio e destinado a operações de estampagem (CARVALHIDO, 2007).

**Figura 9: Curvas típicas de tração de aços baixo carbono**



Fonte: CARVALHIDO, 2007.

A curva representada pela linha cheia (1) é chamada de curva tensão x deformação convencional, já a curva representada pela linha tracejada é chamada de tensão x deformação verdadeira (CARVALHIDO, 2007).

### **3.4 Estampagem**

A estampagem é um processo de conformação plástica que pode ser classificada como estampagem profunda e conformação em geral (FILHO, 2011). Os processos de estampagem são comumente trabalhados em matéria-prima de espessura fina tais como chapas, perfis ou tubos de espessura fina (SCHAEFFER, 2009).

#### **3.4.1 Características Gerais**

Dentre os processos de conformação destaca-se a estampagem de chapas pela versatilidade de formas dos produtos, a rapidez do processamento e a economia de material e de energia durante a conformação quando comparado com os processos tradicionais, como a laminação e o forjamento.

Na estampagem, a chapa é conformada na forma de uma matriz pela aplicação de esforços mecânicos com o auxílio de uma ferramenta (punção). Nota-se ainda o alongamento e a contração das dimensões de todos os elementos de volume durante esta operação (MORO e AURAS, 2011).

A maior parte da produção na conformação de chapas é realizada em prensas mecânicas ou hidráulicas, sendo o trabalho executado em uma ou várias operações progressivas (MORO e AURAS, 2011).

Para controlar a forma e o acabamento superficial da chapa estampada, algumas variáveis devem ser monitoradas, tais como: a folga e o atrito entre o punção e a matriz; as forças envolvidas na operação; a geometria da matriz e do punção e a evolução do encruamento ao longo da operação de estampagem mecânica (MORO e AURAS, 2011).

#### **3.4.2 Parâmetros do Processo**

O controle de diversos fatores no processo de estampagem é determinante para a otimização do processo (SCHAEFFER, 2006).

- Parâmetros tecnológicos: força, energia, deslocamento, tempo de deslocamento, velocidade de deformação, tempo de pressão.
- Geometria do componente: espessura da chapa, comprimento da chapa, largura da chapa, diâmetro da geratriz, raios de centro, retorno elástico.

- Ferramental: geometria e sistema de fixação do punção, geometria e sistema de fixação da matriz, temperatura, deformações elásticas do material.
- Equipamento: velocidade do punção, profundidade de conformação, tempo de pressão, precisão das guias, folga das guias, força, deslocamento e lubrificação.
- Material: tensão máxima, tensão de escoamento, coeficiente de encruamento, anisotropia, alongamento, limite de ruptura, condições superficiais, microestrutura.

### **3.4.3 Processos de Estampagem**

#### **3.4.3.1 Estiramento**

O estiramento é uma operação na qual ocorre a aplicação de forças de tração biaxial sobre o material em uma matriz. Suas extremidades são fixadas para garantir a aplicação dos esforços (MIRANDA, 2007).

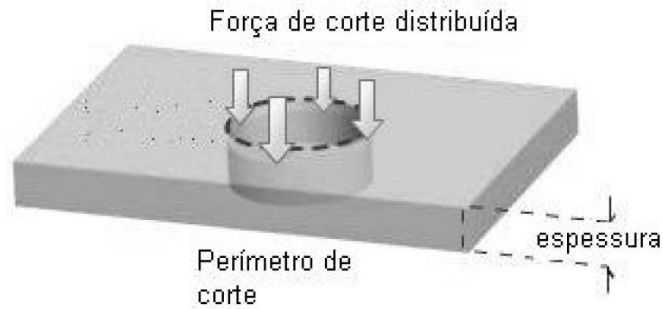
No processo de estiramento o limite de conformação pode ser determinado pela estricção. A estricção consiste na redução das medidas da seção transversal, quando o material é submetido ao processo de tração (MIRANDA, 2007).

#### **3.4.3.2 Corte**

O corte é destinado à obtenção de formas geométricas, a partir de chapas. Estas são submetidas a pressão através de um punção ou uma lâmina, onde ocorre a penetração na chapa (Figura 10). Ao iniciar a penetração têm-se a força de compressão e logo em seguida apresentam-se os esforços cisalhantes, onde ocorre a ruptura (MORO e AURAS, 2011).

Para o cálculo da força e potência do corte, utiliza-se o cálculo da força pelo produto da área pela tensão de ruptura cisalhante. Admite-se o cálculo simples da força pelo produto da área pela tensão de ruptura em cisalhamento (MORO e AURAS, 2011).

**Figura 100: Distribuição de força de corte**



Fonte: MOURO e AURAS, 2011.

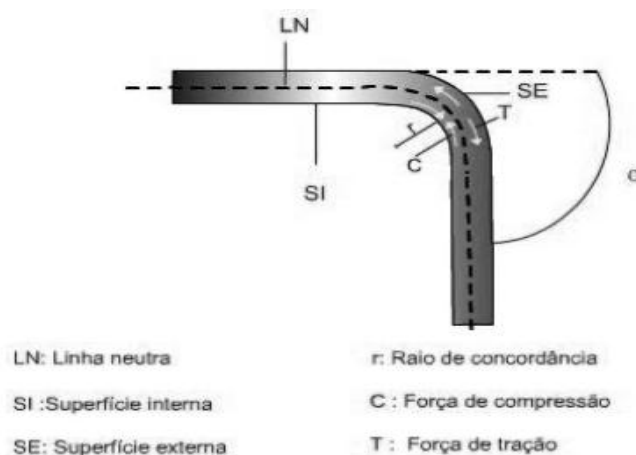
### 3.4.3.3. Dobramento

O processo de dobramento é aplicado há muitos anos na indústria. Arames, barras, chapas e componentes maciços são exemplos de produtos que podem ser submetidos ao dobramento.

Para executar esta operação é necessário considerar, dentre outros parâmetros, a forma do material que será dobrado, assim como a ductilidade e a própria resistência mecânica para reduzir erros na dimensão e na forma do produto dobrado.

Com relação a distribuição do esforço mecânico (Figura 11) no dobramento, a chapa sofre deformação por flexão nas prensas. Neste caso, a chapa é submetida a esforços aplicados em direções diferentes para mudar a forma de uma superfície plana para concorrente, em ângulo, com raio de concordância em sua junção (MORO e AURAS, 2011).

**Figura 111: Esforços mecânicos no processo de dobramento**



Fonte: MOURO e AURAS, 2011.

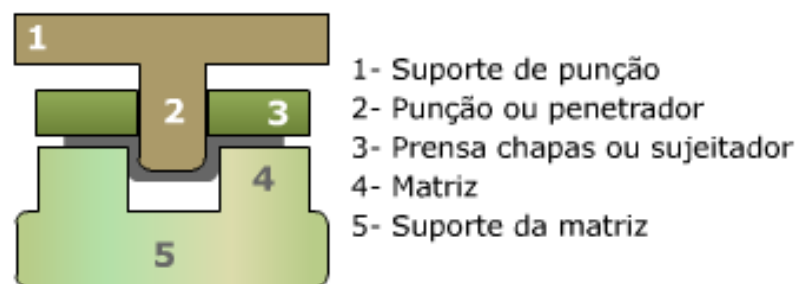
A aplicação do esforço mecânico, a superfície externa do material fica tracionada e a interna comprimida. Desta forma, uma parte das tensões atuantes na seção dobrada estará sob o regime elástico e a outra parte sob o regime plástico. Uma vez retirado o esforço de dobramento, a parte da seção do regime elástico tende a retornar a sua posição inicial, sendo este fenômeno conhecido pelo nome de “retorno elástico” ou “efeito mola”. Desta forma, é necessário considerar a recuperação elástica do material para que a peça dobrada tenha as dimensões requeridas ao término da operação.

O retorno elástico está relacionado com a tensão limite de escoamento do material é com o processo de dobramento. Quanto menor o raio de dobramento, maior é a zona plástica, assim as forças elásticas e o retorno elástico são pequenos (SCHAEFFER, 2004).

#### 3.4.3.4 Estampagem Profunda

O processo de embutimento profundo ou de estampagem profunda consiste em transformar uma chapa metálica em diferentes formas geométricas com saliências profundas ou rasas. Os principais componentes (ferramentas) usados nesta operação de estampagem são: punção, prensa-chapas, matriz, extrator e base da matriz, como mostrado na Figura 12 (SCHAEFFER, 2004).

**Figura 122: Ferramentas da estampagem profunda**



Fonte: CIMM.

Qualquer metal pode ser transformado em chapa pelo processo de laminação e se for dúctil também pode ser submetido ao embutimento profundo. Os efeitos que a laminação a frio produz nas chapas devem ser removidos antes da estampagem e as bobinas não devem estar envelhecidas (tratamento térmico). Após o embutimento profundo, a ductilidade de uma

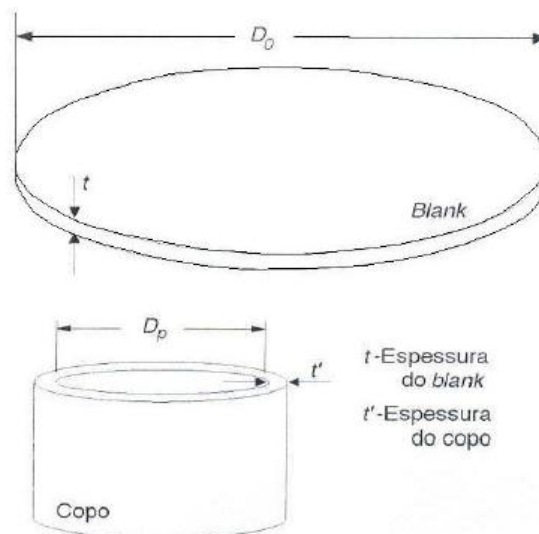
chapa pode ser melhorada com a realização do tratamento de recozimento. Em muitos casos, o metal que foi submetido a uma primeira estampagem pode sofrer estampagens subsequentes sem a necessidade do recozimento entre as operações (ASM INTERNATIONAL, 1998).

Contudo, algumas propriedades devem ser observadas no momento de escolher um material para a operação de embutimento ou estampagem profunda. Neste caso, cita-se que o material deve exibir (ASM INTERNATIONAL, 1998):

- composição química com quantidade reduzida de inclusões e de elementos residuais;
- propriedades mecânicas adequadas à necessidade de alongamento do material, sendo necessário assim, conhecer o valor do limite de deformação plástica até o início da instabilidade plástica em tração (alongamento uniforme) assim como o expoente de encruamento;
- propriedades físicas, dimensões, módulo de elasticidade e outros parâmetros capazes de manter (prevendo sempre, o retorno elástico do material após a aplicação do esforço mecânico) a forma após a estampagem.

O início do processo de conformação por estampagem é feito a partir do dimensionamento de um *blank* (esboço) recortado de uma geratriz (chapa), com a forma adequada de modo a reduzir a perda de material durante o processo de estampagem. A Figura 13 mostra um *blank* e um copo produzido a partir do mesmo.

**Figura 13: Blank e peça após a Estampagem**



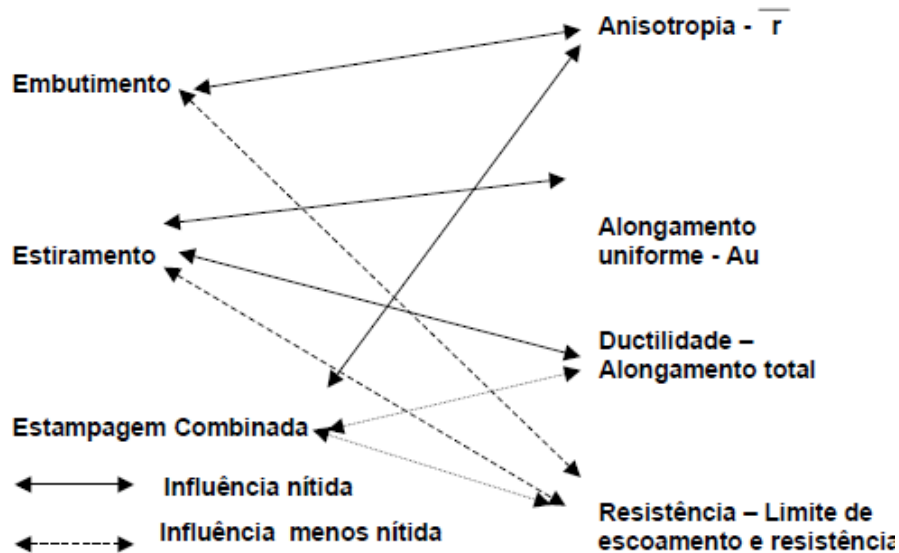
Fonte: BATALHA, 2003

A Figura 14 mostra algumas propriedades mecânicas de um produto estampado. Pode ser observado que alguma das propriedades tem efeito expressivo maior quando comparado a



outros processos de conformação. Como por exemplo, a anisotropia, que possui um efeito nítido nos processos de embutimento, estiramento e estampagem combinada.

**Figura 14: Propriedades mecânicas x modo de conformação**



Fonte: Acesita, 2004

#### 3.4.4. Esforços atuantes do Processo

A força total do punção para que ocorra a deformação completa do copo, corresponde a todos os esforços atuantes no processo, inclusive o atrito. O esforço para deformação ideal aumenta continuamente devido ao efeito do encruamento na conformação plástica. A força global de atrito é composta pelo atrito entre o blank e o anel fixador, na borda do copo, que parte de um pico de esforço (atrito estático para o atrito dinâmico) e diminui continuamente devido à diminuição da área de material sob o anel de fixação. Caso não exista folga entre punção/blank/matriz, o atrito deve se estabilizar em um valor mínimo diferente de zero. A uniformização da espessura da parede ocorre ao final de processo, após toda a área do blank estar contida no interior da matriz. A Figura 15 ilustra um esboço dos esforços envolvidos na estampagem e a força global do punção (BATALHA, 2003).

**Figura 135: Esforços atuantes no processo de Estampagem**



Fonte: (BATALHA, 2003)

### 3.5. Tratamento Térmico

O tratamento térmico é um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento sob condições controladas de temperatura, de tempo, de atmosfera do forno e de velocidade de resfriamento (CALLISTER, 2002).

O objetivo de um tratamento térmico é alterar as propriedades dos materiais ou conferir específicas ao mesmo. Neste caso, o material pode vir a experimentar alguns fenômenos em função da temperatura, tais como a recuperação, recristalização e o crescimento de grão (CALLISTER, 2002).

Os tipos principais de tratamento térmico são (CALLISTER, 2002):

- **recozimento:** tratamento cujo objetivo geral é remover efeitos de processamento anteriores. O procedimento geral consiste em aquecimento até uma determinada temperatura, encharque e resfriamento lento, no forno;
- **normalização:** o objetivo e refinar é uniformizar a estrutura. Seu procedimento resume-se no aquecimento até a austenitização, encharque e resfriamento ao ar;
- **têmpera:** aplicado a ligas ferrosas, cujo objetivo principal é endurecer o material através de transformação martensítica. O procedimento consiste em aquecimento até a austenitização, encharque e resfriamento brusco (água, óleo, banho de polímero, salmoura, nitrogênio);

- **revenimento:** apresenta como objetivo devolver tenacidade à peça temperada. Seu procedimento baseia-se em reaquecimento da peça temperada até uma temperatura abaixo da austenitização, encharque e resfriamento ao ar.

### **3.5.1. Reozimento**

O reozimento é um tipo de tratamento térmico no qual o material é aquecido a elevada temperatura por um longo período de tempo, sendo submetido posteriormente a um resfriamento lento. Os principais objetivos do reozimento são (CALLISTER, 2002):

- aliviar tensões;
- tornar o material mais, dúctil e tenaz;
- produzir uma microestrutura específica;

Todos os tipos de reozimento passam por três estágios:

- Aquecimento até uma temperatura típica de reozimento;
- Manutenção ou “encharcamento” naquela determinada temperatura;
- Resfriamento até a temperatura ambiente.

O tempo e a temperatura são fatores muito relevantes durante o processo de reozimento. Ao se aquecer e resfriar existe no processo gradientes de temperatura nas partes internas e externas que devem ser levados em consideração para que a taxa de variação não seja muito grande e induza estes gradientes de temperatura e tensões internas causando empenamento e trincas. (CALLISTER, 2002).

#### **3.5.1.1. Reozimento Intermediário**

O reozimento intermediário é um tratamento térmico utilizado para anular os efeitos da deformação plástica a frio, com o objetivo de aumentar a ductilidade de um material que tenha sofrido encruamento (CALLISTER, 2002).

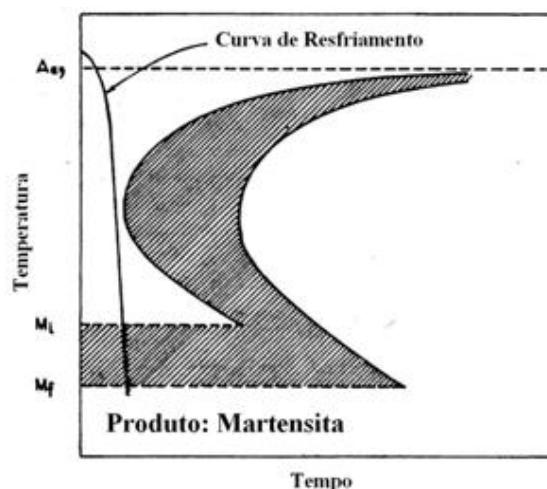
### 3.5.2. Normalização

A normalização é um procedimento em que os grãos são refinados, ou seja, ocorre a diminuição dos grãos médios e a distribuição de tamanho de grão fica mais uniforme. Após o aquecimento e dado o tempo suficiente para que a liga seja totalmente transformada em austenita (austenitização), o procedimento é finalizado pelo resfriamento ao ar (CALLISTER, 2002).

### 3.5.3. Têmpera

De acordo com Colpaert (2008), o tratamento de têmpera visa a formação da martensita. . A martensita é obtida quando se austenitiza o aço e o mantém neste patamar por um determinado tempo. O resfriamento deve ser feito de forma brusca, ou seja, a uma elevada taxa de resfriamento, impedindo que ocorra a difusão, já que o mecanismo de formação da martensita é adifusional. Esse resfriamento pode ser realizado, em água, óleo, salmoura e, até mesmo, ao ar, de acordo com as características do material. Na Figura 16 é exibida uma representação esquemática do processo superposta em uma curva tempo – temperatura - transformação, na qual  $M_i$  e  $M_f$  representam as temperaturas de início e de fim da transformação martensítica e  $A_{e3}$  a temperatura de austenitização.

**Figura 146: Curva esquemática da Têmpera**



Fonte: adaptado de CHIAVERINI, 2005

### 3.6. Aço Carbono

Os principais elementos do aço são ferro e carbono, contendo entre 0,008% a aproximadamente 2,11% de carbono, e podem ser encontrados elementos secundários como silício, manganês, fósforo e enxofre (CHIAVERINI, 1984).

Os aços podem ser classificados como aço carbono e aço liga (CHIAVERINI, 1984):

- **Aço carbono:** são ligas de ferro e carbono que contém de 0,008% a 2,11% de carbono, além de elementos residuais resultantes do processo de fabricação.
- **Aço liga:** são aços carbono que possuem outros elementos de liga, ou elementos residuais, acima dos teores que são considerados normais.

Os aços carbono podem ser subdivididos em (CHIAVERINI, 1984):

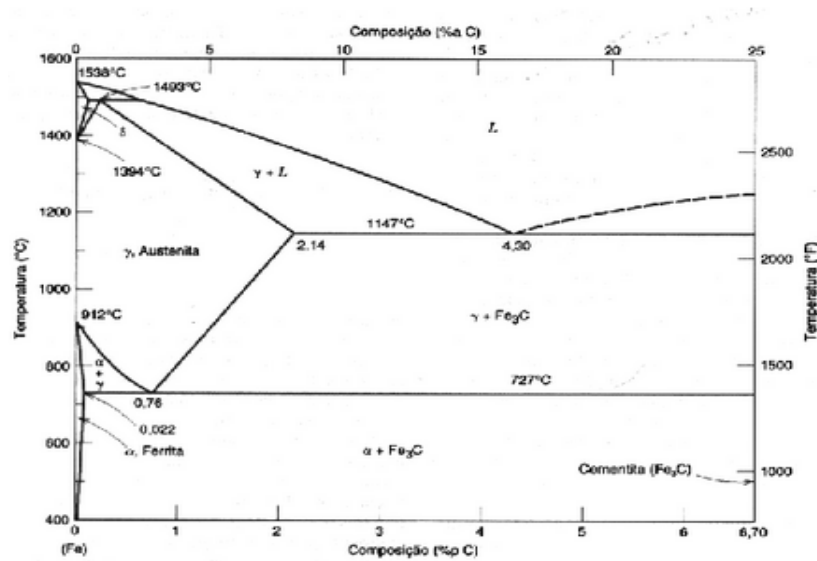
- **Aço de baixo teor de carbono,** possuindo concentrações de carbono menor que 0,3%. Estes aços possuem grande ductilidade, utilizados em trabalhos mecânicos e soldagem. Os aços de baixo teor de carbono não são temperáveis.
- **Aço de médio carbono** com concentrações de carbono entre 0,3% a 0,7% e são utilizados em engrenagens, bielas, etc. Possuem boa tenacidade e resistência mecânica quando submetidos a têmpera e revenimento.
- **Aço de alto teor de carbono** possuindo concentrações acima de 0,7%. Após a têmpera atingem alta dureza e são utilizados em molas, engrenagens, componentes agrícolas que são submetidos ao desgaste, ferramentas de pequenas dimensões, dentre outros.

Tendo em vista o foco econômico, o aço baixo carbono é aplicado principalmente em processos de estampagem, em especial estampagem profunda, em aplicações automobilísticas e forma estrutural (CALLISTER, 2008).

O aço baixo carbono possui sua microestrutura predominantemente ferrita. A ferrita é uma solução sólida de ferro no estado alotrópico alfa, possuindo baixos teores de carbono ou mais elementos de liga dissolvidos. Estes ocupam posições específicas no reticulado cristalino da célula cúbica de corpo centrado. A curva de equilíbrio Fe – C é mostrada na figura 18, onde é mostrada a estabilidade de fases (CALLISTER, 2002).

Pode-se determinar a resistência mecânica da ferrita através do tamanho de grão. A relação do tamanho de grão é inversamente proporcional, ou seja, quanto menor o tamanho de grão, maior será a resistência mecânica de acordo com a equação de Hall-Petch, como foi descrito na Equação 17.

**Figura 157: Curva de Equilíbrio Fe-C**



Fonte: (CALLISTER ,2008).

Em relação a estampabilidade de aços baixo carbono, quanto menor o teor de carbono, que não deve ultrapassar a 1% de C, e os elementos de liga juntos não devem ultrapassar a 1%, maior será a estampabilidade do aço. Os elementos de liga dissolvidos na ferrita aumentam a resistência mecânica, porém diminuem a estampabilidade do aço. A Tabela 1 mostra valores de composição química de aços de baixo carbono e suas propriedades para diferentes tipos de estampagem. Sendo LE o limite de escoamento, LR, o limite de resistência, AL alongamento e  $r_m$  o coeficiente de anisotropia normal média total.

**Tabela 1: Composições químicas e propriedades mecânicas típicas de aços para estampagem no Brasil**

Aço Baixo Carbono	Composição Química (% Peso)					Propriedades Mecânicas				
	C	Mn	P	S	Al	LE	LR	AL	LE/LR	$r_m$
Estampagem Média	0,05	0,23	0,018	0,015	0,043	210	335	39	0,66	1,5
Estampagem Profunda	0,05	0,23	0,017	0,015	0,043	195	320	41	0,62	1,5
Estampagem Extra-Profunda	0,04	0,23	0,016	0,015	0,044	180	314	42	0,59	1,7
Estampagem Extra-Profunda Crítica	0,04	0,21	0,014	0,014	0,042	170	308	43	0,58	1,8

Fonte: adaptado de CORASSINI, 2012

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Material

O material utilizado no trabalho foi o aço AISI 1010, adquirido na forma de chapa, com 3mm de espessura, 1,5m de comprimento e 1m de largura. A composição química do aço, fornecida pelo fabricante, e a especificação técnica prevista na Norma ASTM E8 são mostradas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

**Tabela 2: Composição química do aço utilizado no trabalho**

Elemento	C	Mn	P	S
% (em peso)	0,10	0,59	0,015	0,01

Fonte: Fornecido pelo fabricante.

**Tabela 3: Especificação técnica do aço AISI 1010**

Elemento	C	Mn	P	S
% (em peso)	0,08-0,13	0,30-0,60	0,04 máx.	0,05 máx.

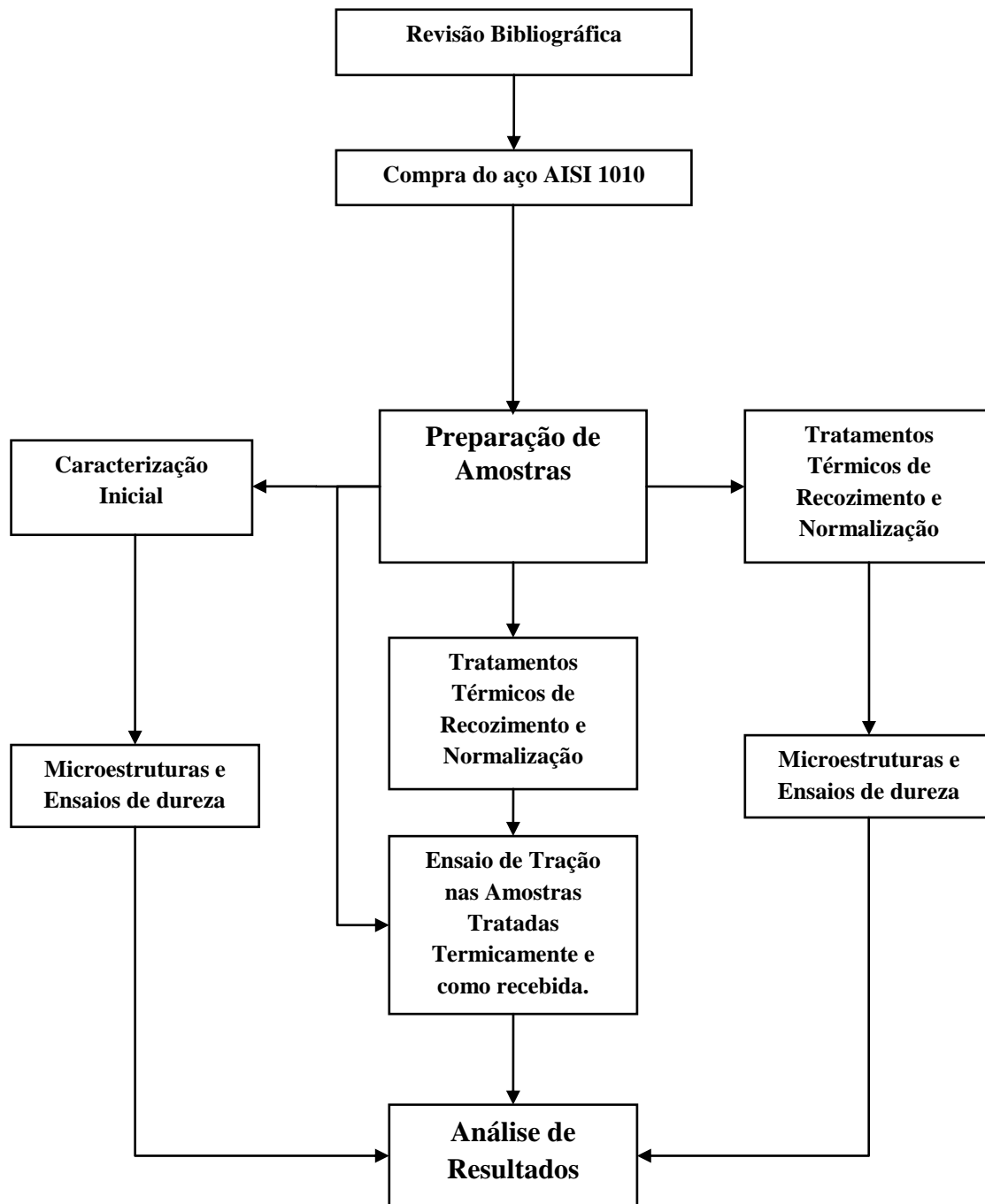
Fonte: Adaptado da Norma NBR MN87 (2000).

### 4.2. Descrição geral do trabalho desenvolvido

O trabalho realizado consistiu na análise dos efeitos do tamanho de grão nas propriedades do aço AISI 1010, envolvendo a avaliação da dureza, da resistência mecânica, da ductilidade e da estampabilidade, esta última avaliada por meio do cálculo do coeficiente de anisotropia. As propriedades mencionadas foram determinadas empregando ensaios de tração e dureza. Os diferentes tamanhos de grão foram obtidos através de tratamentos térmicos de recozimento e normalização, utilizando tempos de encharque diversos.

Na Figura 18 é apresentado um fluxograma compreendendo as etapas desenvolvidas no trabalho, desde a realização da revisão bibliográfica até a análise dos resultados.

**Figura 168: Fluxograma do Trabalho Desenvolvido**



Fonte: Produzido pela autora

### 4.3. Corpos de Prova

Para a realização do trabalho foram considerados dois tipos de corpos de prova, cujas representações esquemáticas e imagens são exibidas nas Figuras 19 e 20.



Na Figura 19 é apresentado o corpo de prova empregado para a realização da análise microestrutural e dos ensaios de dureza do material no estado inicial e após a realização dos tratamentos térmicos. Neste caso, a confecção foi conduzida através de corte inicial da chapa em uma guilhotina da marca *Newton* modelo TM 10 seguido de corte em uma máquina com disco abrasivo da marca *Struers*.

**Figura 19: Corpo de prova utilizado para a realização da análise microestrutural e dos ensaios de dureza.**



Fonte: Produzido pela autora.

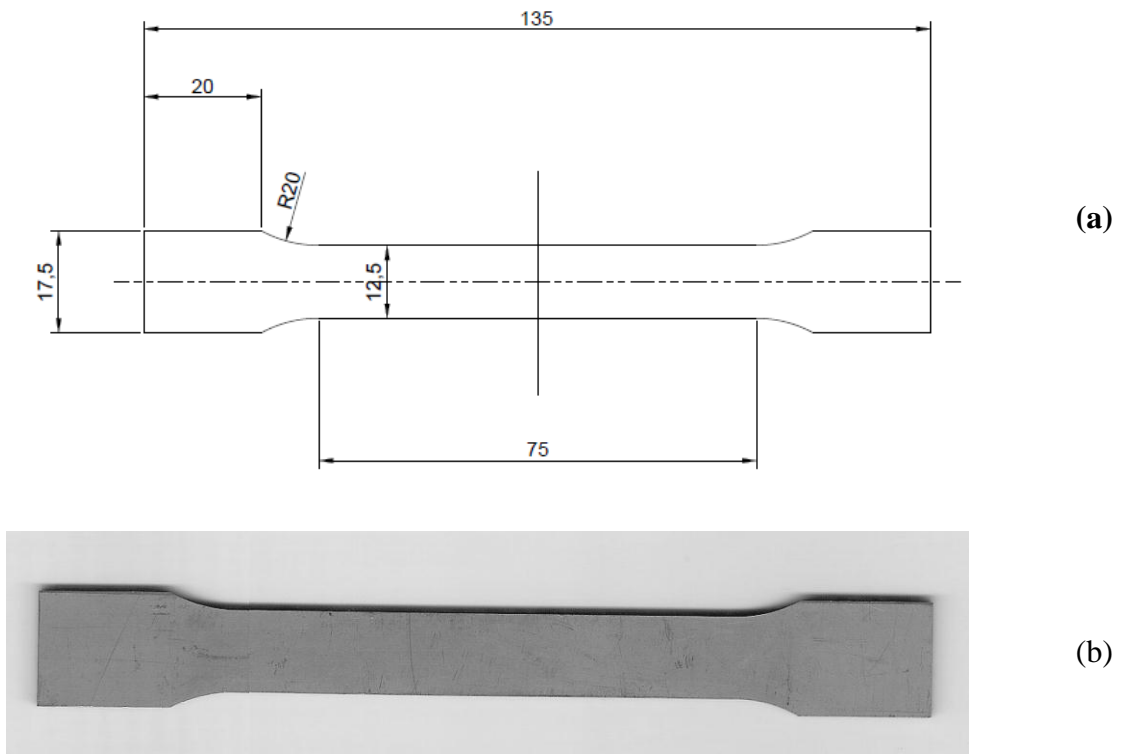
Na Figura 20 é mostrado o corpo de prova utilizado para os ensaios de tração, elaborado segundo a Norma ASTM E8 (2009). A confecção foi iniciada novamente com corte da chapa na guilhotina da marca *Newton* modelo TM 10 seguida de usinagem por eletroerosão a frio em uma máquina marca *Charmilles* modelo Rodofil 290.

#### 4.4. Tratamentos Térmicos

Diversos tratamentos térmicos foram realizados com o objetivo de produzir microestruturas distintas em termos de tamanho de grão, cujos detalhes são mostrados na Tabela 4. Observa-se que a temperatura escolhida foi mantida constante para as oito operações, escolhida em função do teor de carbono do aço e do diagrama de fases Fe-Fe<sub>3</sub>C, considerando a austenitização completa do metal (COLPAERT, 2008). Em relação ao tempo e ao resfriamento, foram avaliadas quatro e duas condições, respectivamente, caracterizando assim tratamentos térmicos de recozimento e normalização. Para a análise da relação entre o tamanho de grão e a dureza do material, todas as situações mostradas foram usadas. Por outro lado, para a análise da anisotropia normal e de propriedades como resistência mecânica e ductilidade (determinadas através de ensaios de tração) foram consideradas apenas três

condições mostradas na Tabela 5. Essas condições foram escolhidas a partir do tamanho médio dos grãos (nesta etapa foram observados de maneira qualitativa), ou seja, foram utilizados os parâmetros que levariam a diâmetros relativamente distintos.

**Figura 20: Corpos de prova utilizados para a realização dos ensaios de tração (dimensões em mm)**



(a) Representação esquemática e (b) imagem.

Fonte: Produzido pela autora.

**Tabela 4: Condições de tratamento térmico consideradas no trabalho**

Temperatura (°C)	Tempo (min)	Resfriamento
920	30	no forno
920	30	ao ar
920	60	no forno
920	60	ao ar
920	180	no forno
920	180	ao ar
920	360	no forno
920	360	ao ar

Fonte: Produzida pela autora.

Todos os tratamentos foram realizados em um forno elétrico da marca *Brasimet*, cuja imagem é exibida na Figura 21.

**Tabela 5: Condições selecionadas para ensaio de tração**

Temperatura (°C)	Tempo (min)	Resfriamento
920	30	ao ar
920	60	no forno
920	180	no forno

Fonte: Produzido pela autora.

**Figura 171: Forno utilizado nos tratamentos térmicos**



Fonte: Produzido pela autora.

#### 4.5. Análise da Microestrutura

A análise da microestrutura foi realizada em amostras do material no estado inicial e após as oito condições de tratamentos térmicos descritas no item anterior. O procedimento foi iniciado com a preparação metalográfica dos corpos de prova: 1) embutimento a frio com polimetilmetacrilato da marca *JET* em formas de embutimento de silicone da marca *AROTEC*; 2) lixamento com lixas de óxido de alumínio da marca *Norton* em equipamentos elétricos *Struers* com as granulometrias de #120, #240, #320, #400 e #600 e rotação de 90° e limpeza com água entre passes; 3) polimento com pasta de diamante de 9µm, 3µm e 1µm da marca *Arotec* em politrizes das marcas *Struers* e *Arotec*, com álcool como lubrificante e

limpeza com detergente e água entre passes; 4) ataque químico por imersão com reagente Nital 3%.

Após a preparação, as amostras foram analisadas em um microscópio óptico da marca Fortel com sistema de captura de imagens via computador, cuja imagem é mostrada na Figura 22. Neste caso, foram empregadas duas amostras para cada condição e para cada uma delas foram digitalizadas dez regiões distintas em uma mesma ampliação.

**Figura 182: Microscópio óptico acoplado ao computador**



Fonte: Produzido pela autora.

Para a determinação do tamanho de grão foi utilizado o programa comercial *Image Pro Plus 6.0*, através do qual o diâmetro médio é determinado pelo cálculo da área de cada grão. Foram feitas 200 medidas de tamanho de grão (100 em cada amostra) de cada uma das condições. A Figura 23 mostra como exemplo a técnica do programa para o cálculo dos grãos. Após a determinação da área de 200 grãos para cada condição, a média foi calculada e, a partir do valor, o diâmetro médio.

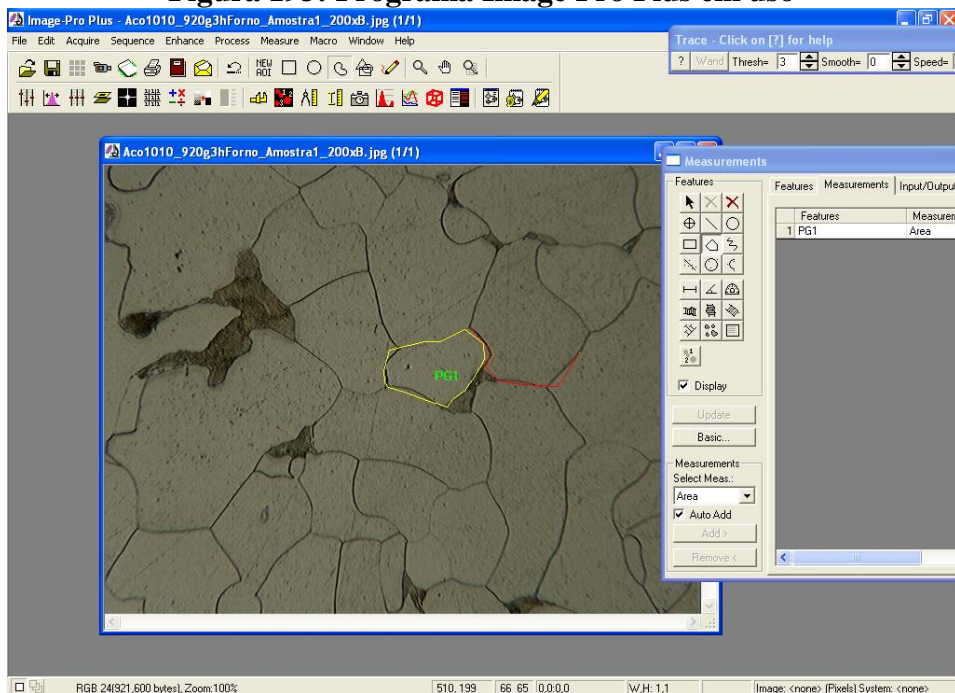
#### **4.6. Análise do Comportamento Mecânico**

A análise do comportamento mecânico do material foi realizada por meio da avaliação das propriedades dureza, resistência mecânica, ductilidade e anisotropia normal.

A dureza, observada no material no estado inicial e após todos os tratamentos térmicos, foi determinada para todas as condições de tratamento térmico descritas na seção

4.4, assim como para o aço no estado como recebido. Foram realizados ensaios de dureza Vickers em um microdurômetro da marca *Shimadzu* modelo 2T, empregando carga de 500gf e tempo de aplicação de 15s, aleatoriamente na superfície de cada amostra. Similarmente à análise microestrutural, duas amostras para cada condição foram avaliadas, tendo sido realizados ao menos cinco testes em cada. Na Figura 24 é mostrada a imagem do microdurômetro utilizado no trabalho.

**Figura 193: Programa Image Pro Plus em uso**



Fonte: Produzido pela autora.

A resistência mecânica, a ductilidade e a anisotropia normal foram analisadas por meio de ensaios de tração. A resistência mecânica foi avaliada em termos de limite de escoamento e limite de resistência e a ductilidade foi observada em termos de alongamento % uniforme. Neste caso, as demais propriedades foram obtidas para o estado inicial e para três condições de tratamentos térmicos descritas anteriormente (tabela 5), a 0°, 45° e 90° da direção de laminação.

A anisotropia normal e anisotropia planar foram determinadas através de três medidas nos corpos de prova, distintas, do comprimento e largura iniciais e finais (após a tração), nas condições de 0°, 45° e 90°, tendo como referência a direção de laminação. Os comprimentos

iniciais que foram medidos antes do ensaio foram 50 mm e 25 mm. A largura inicial que foi medida antes do ensaio foi 8mm. Após o procedimento, foram calculadas por meio das equações 5 e 6, as deformações verdadeiras relativas ao comprimento e à largura, respectivamente. O coeficiente de anisotropia ( $R$ ) foi calculado a partir da equação 7. Já a anisotropia planar ( $|\bar{R}|$ ) e anisotropia normal média( $\Delta R$ ), foram calculadas a partir das equações 8 e 9.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina universal de ensaios 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 célula de carga empregada foi de 100kN. A velocidade de movimentação da garra superior da máquina em todos os testes foi de 4,5mm/min.

Na Figura 25 é mostrada a imagem da máquina universal de ensaios durante um dos experimentos de tração.

**Figura204: Microdurômetro**



Fonte: Produzido pela autora.

**Figura 215: Máquina universal de ensaios**



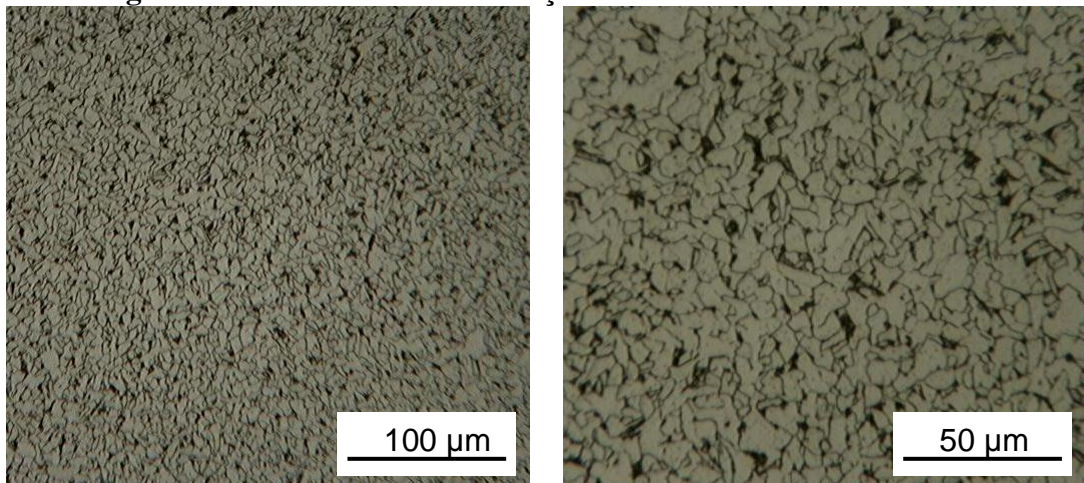
Fonte: Produzido pela autora.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Caracterização do Material no Estado Inicial

A Figura 26 mostra a microestrutura do aço AISI 1010 no estado inicial. Percebe-se a ocorrência de grãos de ferritaequiaxiais e colônias de perlita, em pequena quantidade, resultado compatível com a composição química do aço AISI 1010.

**Figura 226: Microestrutura do aço 1010 no estado como recebido.**



(a) Ampliação de 100x

(b) Ampliação de 200x

Fonte: Produzida pela autora.

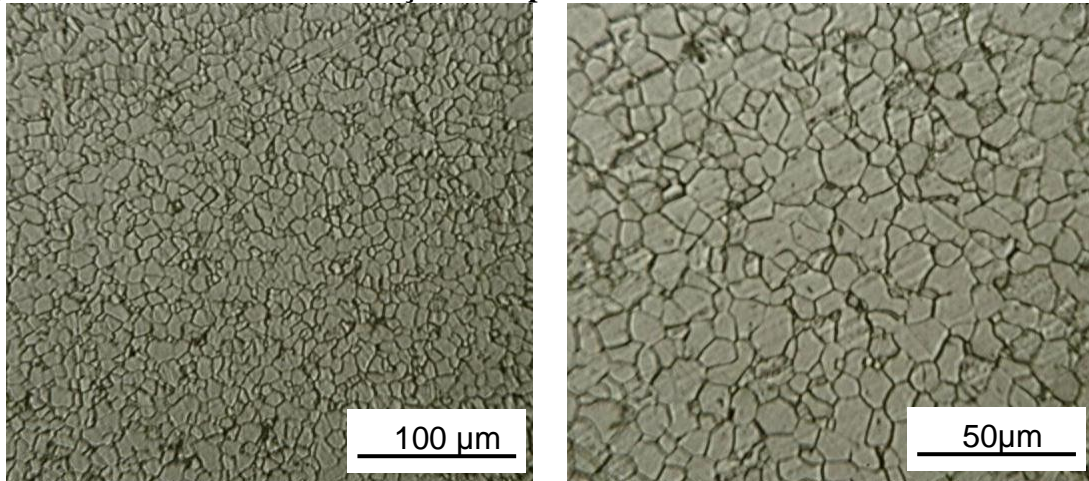
### 5.2. Microestrutura do Material Após os Tratamentos Térmicos

Após os tratamentos térmicos de normalização e recozimento, foram obtidas as microestruturas conforme Figuras 27 a 34. Verifica-se que, em geral, comparando as amostras recozidas e normalizadas (Figuras 27 e 28, Figuras 29 e 30, Figuras 31 e 32, Figuras 33 e 34), qualitativamente, o tamanho de grão diminui com o resfriamento ao ar, conforme esperado na literatura (CHIAVERINI, 1984). Similarmente, com o aumento do tempo de encharque, para o recozimento, (Figuras 27, 29, 31 e 33), o tamanho dos grãos pareceu aumentar. Já em relação às amostras normalizadas, esse comportamento não ficou claro. Para o caso específico das amostras normalizadas com tempo de encharque de 180 minutos e 360 minutos a



morfologia dos grãos foi alterada, que de formato relativamente hexagonal passaram a exibir em alguns casos morfologia mais “alongada”, até mesmo “acicular”.

**Figura 237: Microestrutura do aço 1010 após recozimento a 920°C durante 30 minutos**

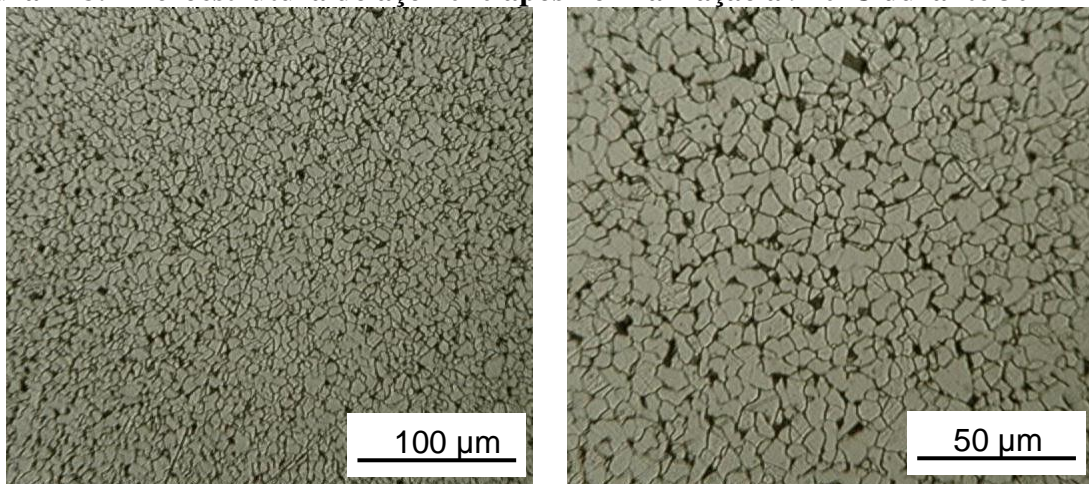


(a) Ampliação de 100x

(b) Ampliação de 200x

Fonte: Produzido pela autora.

**Figura 248: Microestrutura do aço 1010 após normalização a 920°C durante 30 minutos**

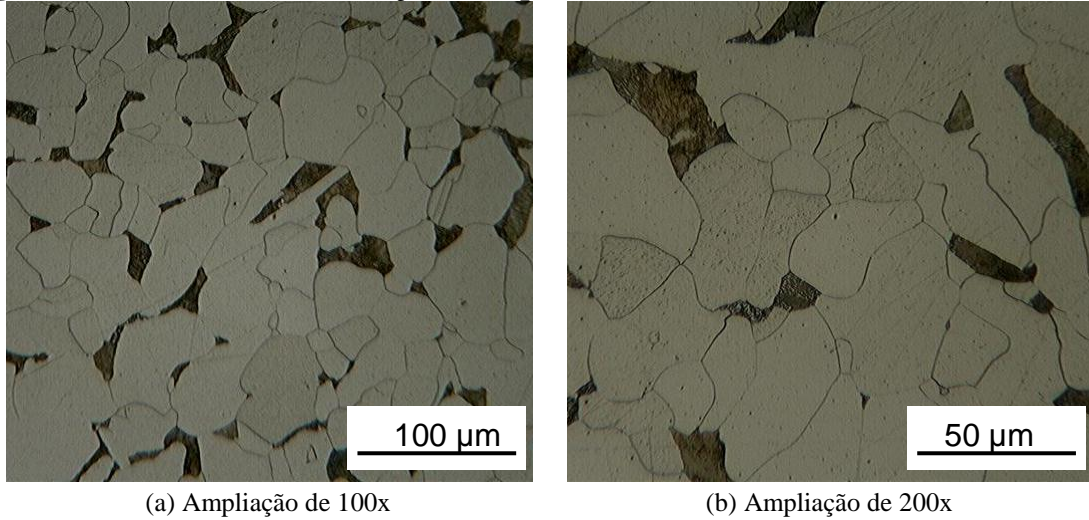


(a) Ampliação de 100x

(b) Ampliação de 200x

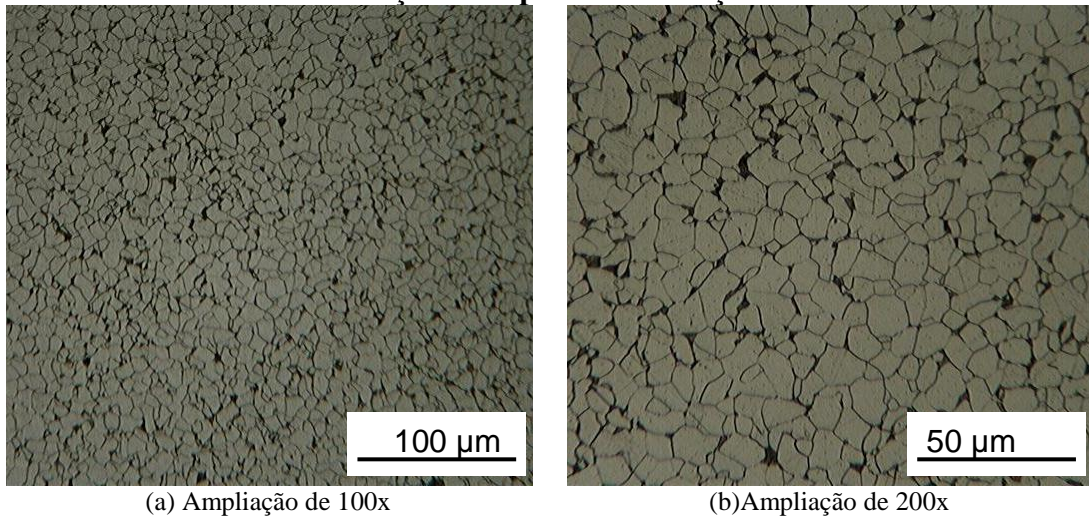
Fonte: Produzido pela autora.

**Figura 29: Microestrutura do aço 1010 após recozimento a 920°C durante 60 minutos**



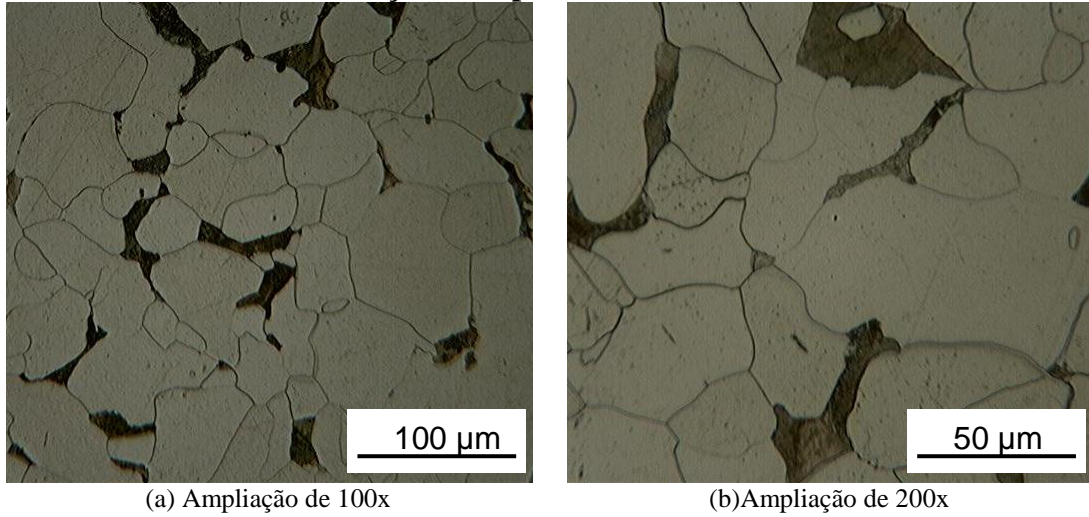
Fonte: Produzido pela autora.

**Figura 250: Microestrutura do aço 1010 após normalização a 920°C durante 60 minutos**



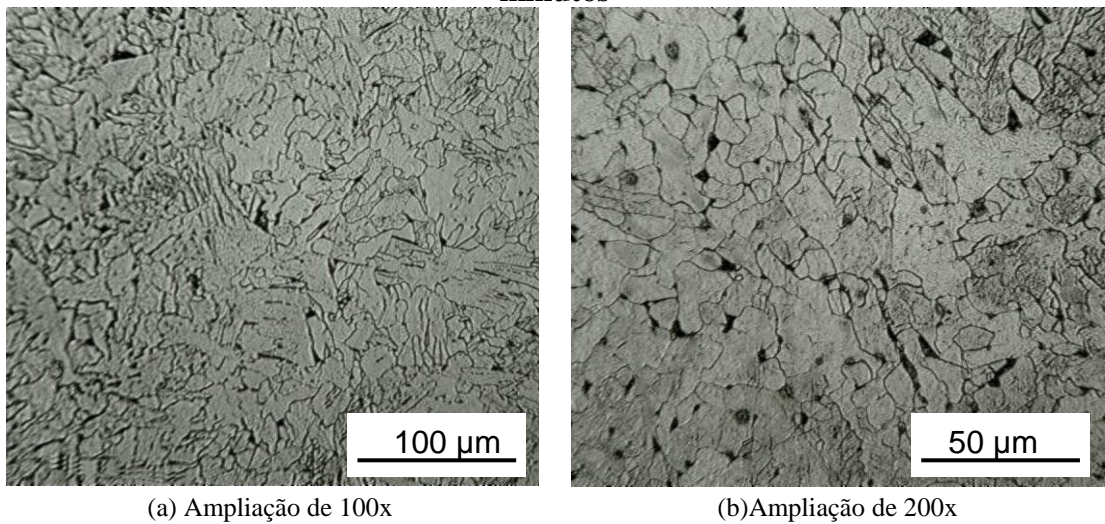
Fonte: Produzido pela autora.

**Figura 31: Microestrutura do aço 1010 após recozimento a 920°C durante 180 minutos**



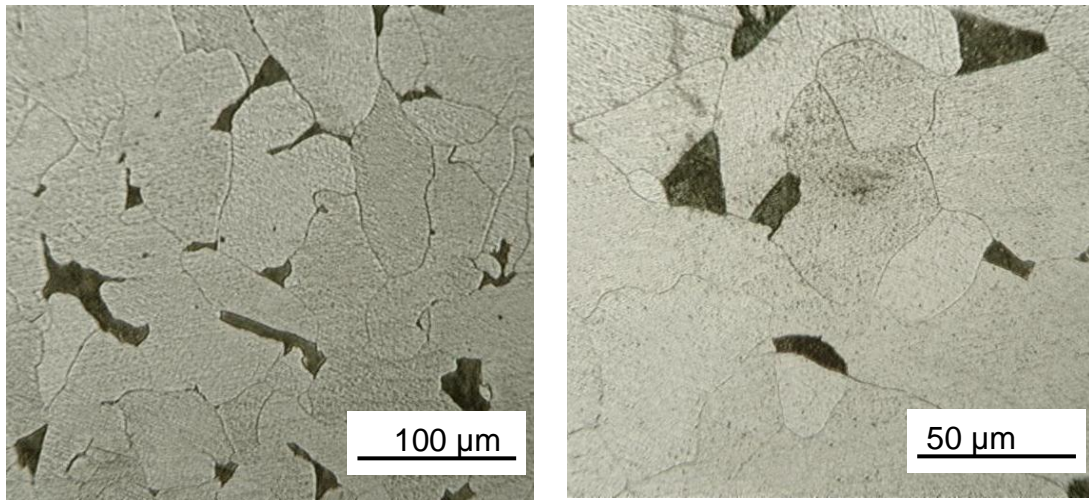
Fonte: Produzido pela autora.

**Figura 262: Microestrutura do aço 1010 após normalização a 920°C durante 180 minutos**



Fonte: Produzida pela autora.

**Figura 273: Microestrutura do aço AISI 1010 após recozimento a 920°C durante 360 minutos**

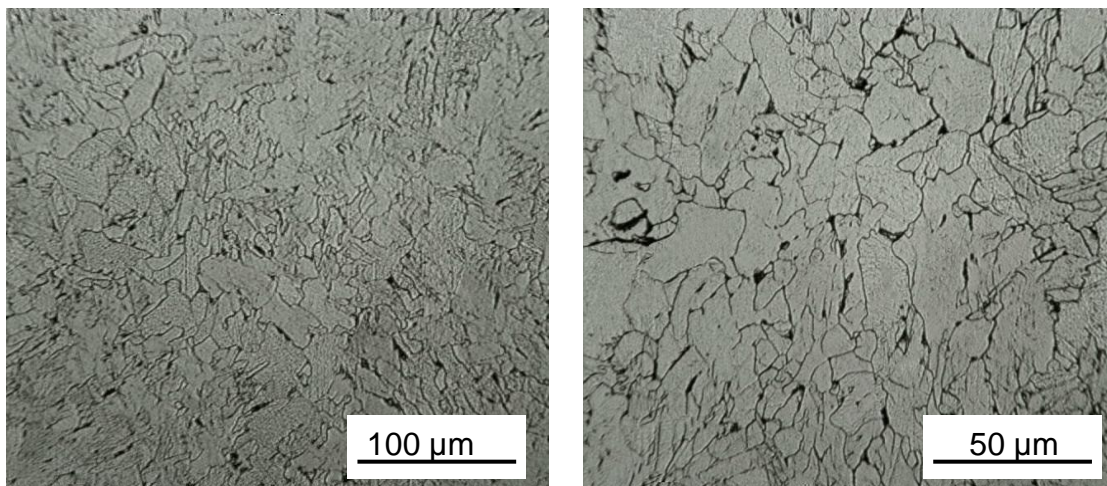


(a) Ampliação de 100x

(b) Ampliação de 200x

Fonte: Produzida pela autora.

**Figura 284: Microestrutura do aço AISI 1010 após normalização a 920°C durante 360 minutos**



(a) Ampliação de 100x

(b) Ampliação de 200x

Fonte: Produzida pela autora.

### 5.3 Medidas de tamanho de grão

Na Tabela 6 são mostrados os valores de tamanho médio de grão para cada uma das duas amostras de cada condição do aço AISI 1010 e os valores médios gerais. Nas Figuras 35 e 36

são apresentados os gráficos que comparam os valores do material no estado inicial e após os tratamentos, relacionando com os tempos de encharque.

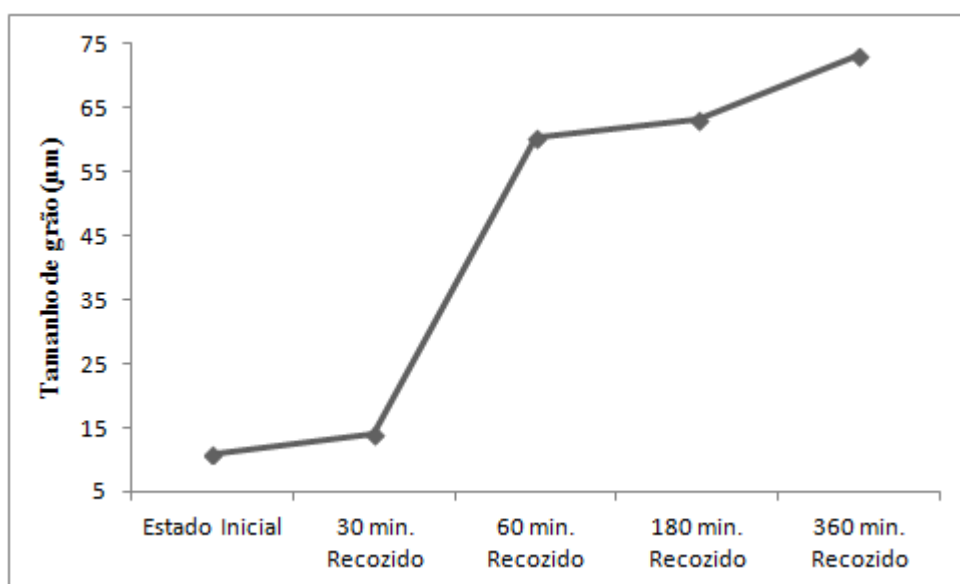
Considerando inicialmente o aço AISI 1010 recozido (Figura 35), verifica-se o tratamento levou a um aumento no tamanho de grão, que se tornou mais pronunciado à medida que o tempo de encharque foi elevado, estando de acordo com a análise qualitativa realizada anteriormente.

**Tabela 6: Tamanhos de grão do aço 1010 em diferentes condições**

Condição	Amostra 1 ( $\mu\text{m}$ )	Amostra 2( $\mu\text{m}$ )	Média ( $\mu\text{m}$ )
Estado Inicial	10,60	10,98	10,97
30 min. Forno	13,91	14,32	14,12
30 min. Ar	11,43	11,52	11,48
60 min. Forno	66,20	54,54	60,37
60 min. Ar	12,03	11,98	12,01
180 min. Forno	64,29	62,02	63,12
180 min. Ar	17,63	18,75	18,19
360 min. Forno	74,32	71,92	73,12
360 min. Ar	19,68	18,76	19,22

Fonte: Produzido pela autora.

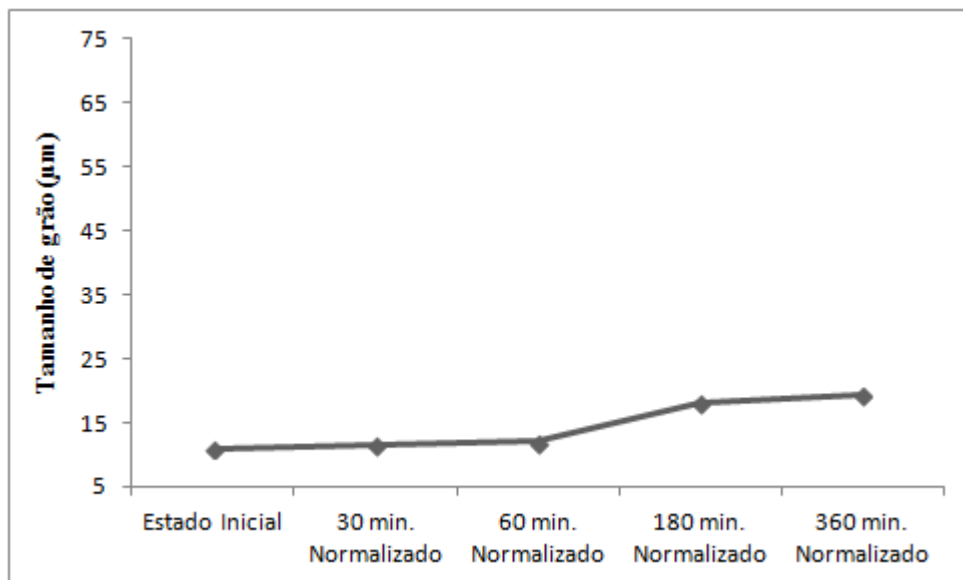
**Figura 295: Comparação entre tamanho de grão e diferentes condições de recozimento**



Fonte: Produzido pela autora

Por outro lado, em relação ao tratamento térmico de normalização (Figura 36), novamente de acordo com a análise qualitativa realizada anteriormente, as diferenças de tamanho médio de grão não foram tão significativas, sendo verificada uma elevação suave com o tempo de encharque, em comparação com os resultados da Figura 35. Por fim, comparando os dois tratamentos, verifica-se que o aumento do tamanho de grão foi maior no recozimento em todas as condições. Isto ocorre porque no recozimento o resfriamento se dá no forno, possibilitando um tempo maior para o crescimento de grão, que é um mecanismo difusional.

**Figura 306: Comparação entre tamanho de grão e diferentes condições de normalização**



Fonte: Produzido pela autora.

#### 5.4 Dureza

Na Tabela 7 são exibidos os resultados de dureza, individuais de cada ensaio e amostra e médios, determinados para o material no estado inicial e após os tratamentos térmicos. Nas Figuras 36e 37 são apresentados os resultados médios para o material recozido e normalizado em função do tempo de encharque.

Verifica-se que, em relação ao aço AISI 1010 recozido (Figura 37), o tratamento térmico reduziu o valor da dureza em comparação com o material como recebido. Isso se deu

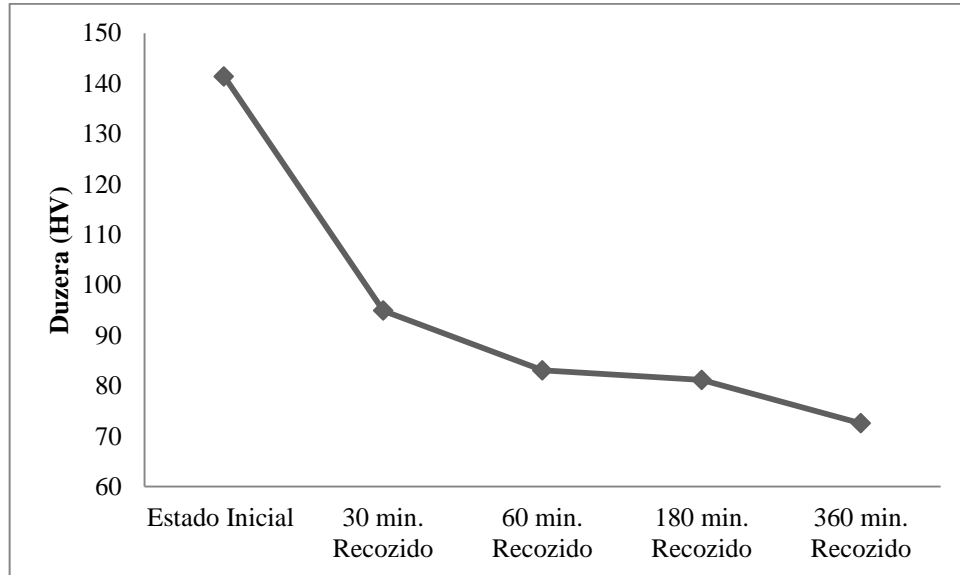
devido ao fato de que o material foi adquirido após laminação a frio, ou seja, encruado e o recozimento removeu os efeitos da deformação plástica anterior, além levar ao aumento no tamanho de grão, como observado no item anterior. Considerando o aumento no tempo de encharque, foi observado que a dureza diminui, estando também de acordo com o aumento no tamanho de grão, verificado qualitativamente e quantitativamente.

**Tabela 7: Durezas do aço AISI 1010 em diferentes condições**

Condição	A(HV)	B(HV)	C(HV)	D(HV)	E(HV)	Média(HV)
Estado Inicial Amostra 1	138,0	141,0	144,0	141,0	144,00	141,6
Estado Inicial Amostra 2	140,0	142,0	141,0	147,0	136,0	141,2
30 min. Forno Amostra 1	93,1	92,3	95,0	94,2	93,9	93,7
30 min. Forno Amostra 2	98,0	95,9	93,2	95,5	98,2	96,1
30 min. Ar Amostra 1	109,0	110,0	109,0	106,0	108,0	108,4
30 min. Ar Amostra 2	104,0	106,0	104,0	104,0	106,0	104,8
60 min. Forno Amostra 1	86,4	92,1	86,4	86,9	86,7	87,7
60 min. Forno Amostra 2	76,8	83,9	77,2	75,1	79,2	78,4
60 min. Ar Amostra 1	104,0	109,0	109,0	109,0	110,0	108,2
60 min. Ar Amostra 2	106,0	107,0	106,0	106,0	108,0	106,6
180 min. Forno Amostra 1	76,2	76,6	73,6	73,3	78,1	75,6
180 min. Forno Amostra 2	81,8	91,3	90,3	84,3	85,7	86,7
180 min. Ar Amostra 1	111,0	104,0	107,0	109,0	111,0	108,4
180 min. Ar Amostra 2	109,0	107,0	114,0	106,0	108,0	108,8
360 min. Forno Amostra 1	74,6	74,6	70,1	73,0	70,3	72,5
360 min. Forno Amostra 2	70,5	78,9	74,6	81,0	81,4	72,6
360 min. Ar Amostra 1	110,0	116,0	109,0	107,0	110,0	110,4
360 min. Ar Amostra 2	111,0	108,0	110,0	108,0	107,0	108,8

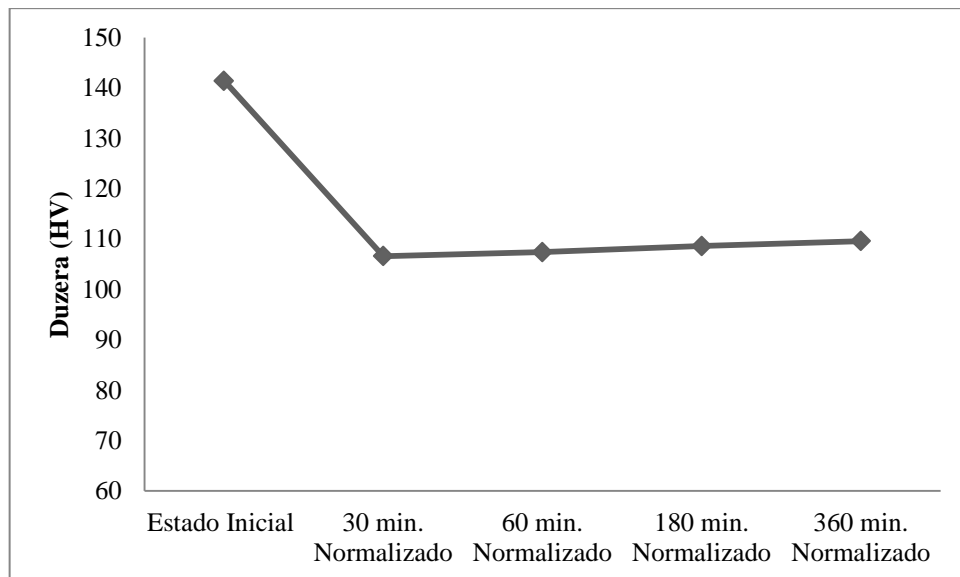
Fonte: Produzido pela autora.

**Figura 317: Comparação entre as durezas do material no estado inicial e recozido**



Fonte: Produzido pela autora

**Figura 328: Comparação entre as durezas e diferentes condições de normalização**



Fonte: Produzido pela autora

Para o aço normalizado (Figura 37), também é verificada uma queda nos valores de dureza em relação ao material como recebido. Novamente esse resultado é associado à remoção do encruamento devido ao processamento mecânico anterior. No entanto, observando os tempos de encharque, percebe-se que não ocorreu muita alteração na dureza,



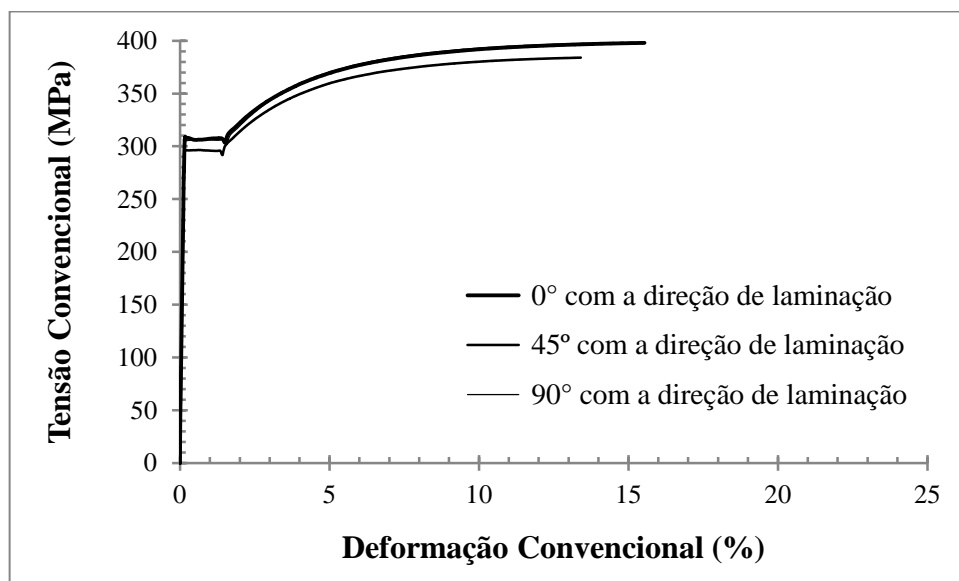
resultado que novamente está de acordo com a microestrutura, uma vez que não foi verificada uma mudança pronunciada. Quando analisadas as condições de tratamento térmico do aço AISI 1010 normalizado, ocorreu uma variação de 2,74% na dureza a medida que aumentou-se o tempo de encharque.

### 5.5 Propriedades Determinadas no Ensaio de Tração

Como havia sido comentado, os ensaios de tração foram realizados em corpos de prova confeccionados a 0°, 45° e 90° da direção de laminação, no material como recebido e em determinadas condições de tratamentos térmicos, descritas na Tabela 5. Nas Figuras 39 a 42 são mostradas as curvas tensão convencional deformação convencional até o início da estricção obtidas para o aço nas condições mencionadas.

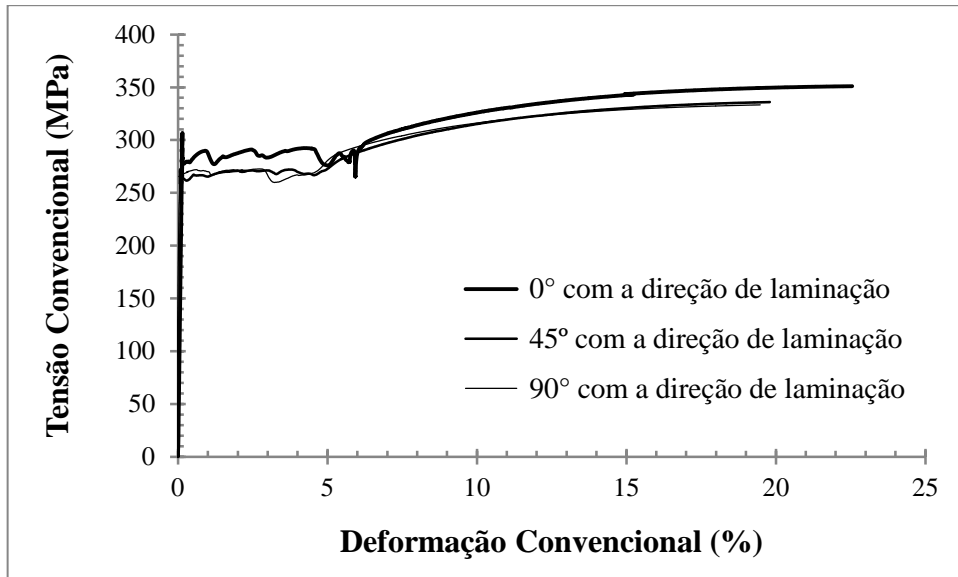
Em todas as situações verificou-se a ocorrência de patamar de escoamento, conforme esperado para o aço com essa composição química. Observa-se também, de forma qualitativa, a influência tanto da microestrutura do material como do sentido de deformação prévia, inclusive para as situações nas quais foram realizados tratamentos térmicos, mostrando que os mesmos não são capazes de remover os efeitos do processamento mecânico anterior em todos os âmbitos. Neste caso, verifica-se de maneira clara que o material a 0° com a direção de laminação exibiu maiores valores de tensão para uma mesma deformação.

**Figura 39: Curva tensão x deformação para o aço 1010 no estado inicial para as três direções**



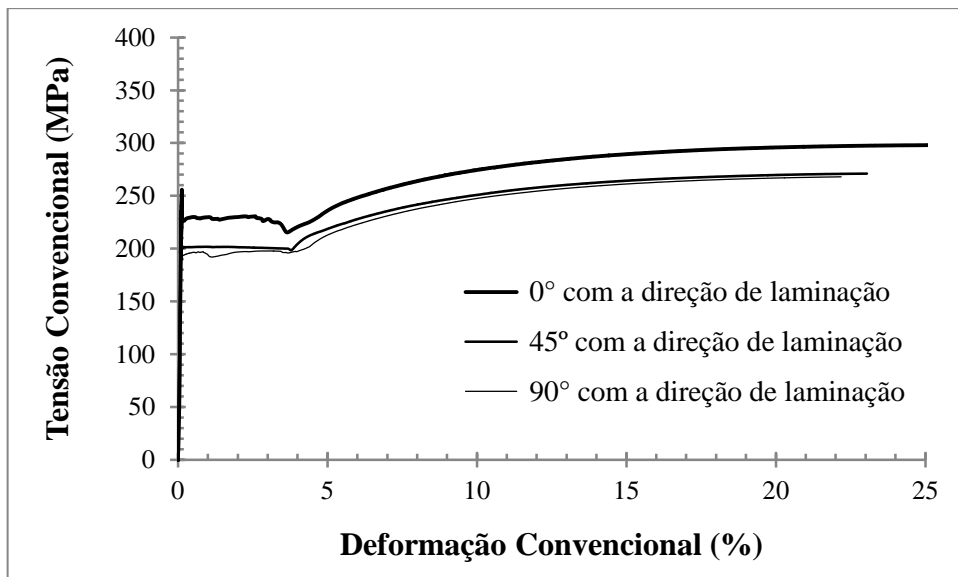
Fonte: Produzido pela autora.

**Figura 33: Curva tensão x deformação para o aço 1010 normalizado durante 30 minutos para as três direções**



Fonte: Produzido pela autora.

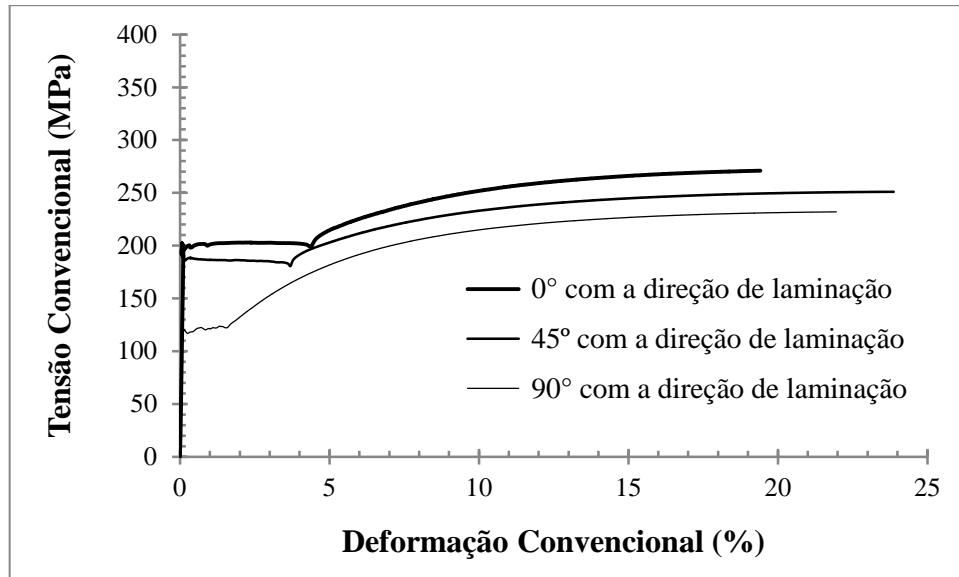
**Figura 34: Curva Tensão x Deformação para o aço AISI 1010 Normalizado durante 60 minutos para as três direções**



Fonte: Produzido pela autora.

Por meio das tabelas 8 a 11 podem ser verificados os limites de resistência e escoamento e o alongamento uniforme % do material.

**Figura 35: Curva tensão x deformação para o aço 1010 normalizado durante 180 minutos para as três direções**



Fonte: Produzido pela autora.

**Tabela 8: Propriedades do aço AISI 1010 no estado inicial (como recebido) nas diferentes direções**

Amostra no Estado inicial (como recebido)			
Direção	Limite de Escoamento(MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)
0°	308,38	396,85	15,00
45°	296,24	382,46	13,10
90°	305,21	398,02	13,50

Fonte: Produzido pela autora.

**Tabela 9: Propriedades do aço AISI 1010 Normalizado durante 30 minutos nas diferentes direções**

Amostra Normalizada durante 30 min.			
Direção	Limite de Escoamento(MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)
0°	267,67	397,81	22,02
45°	249,65	383,86	19,80
90°	255,70	397,44	19,20

Fonte: Produzido pela autora.

**Tabela 10: Propriedades do aço AISI 1010 Recozido durante 60 minutos nas diferentes direções**

Amostra Recozida durante 60 min			
	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)
0°	212,56	297,97	24,80
45°	187,35	271,05	23,90
90°	175,76	267,79	21,90

Fonte: Produzido pela autora.

**Tabela 11: Propriedades do aço AISI 1010 Recozido durante 180 minutos nas diferentes direções**

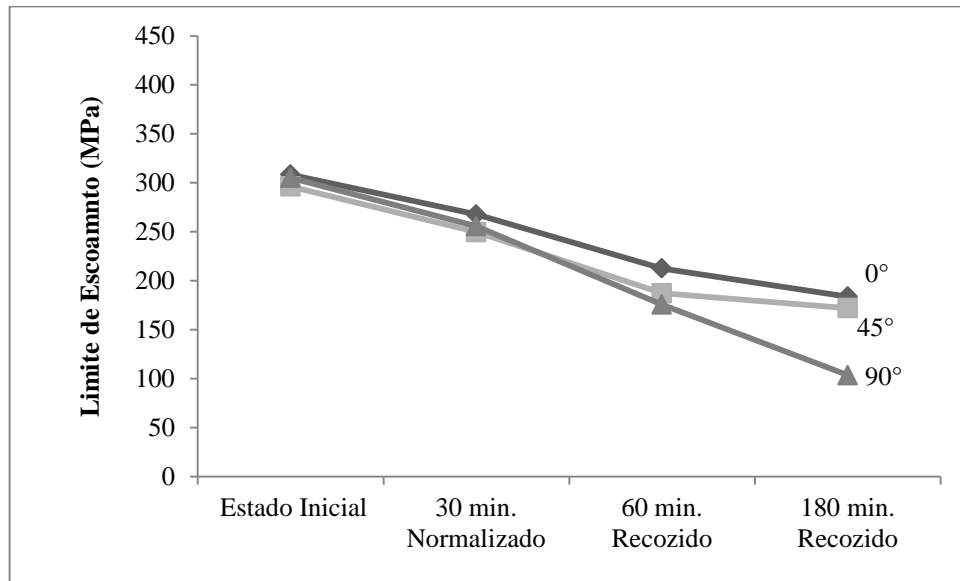
Amostra Recozida durante 180 min			
	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)
0°	183,82	270,43	19,20
45°	172,17	250,87	23,70
90°	103,67	231,8	21,90

Fonte: Produzido pela autora.

As Figuras 43, 44 e 45 mostram as curvas limite de escoamento, limite de resistência e alongamento em função de cada uma das condições: estado inicial, normalizado durante 30 minutos, recozido durante 60 minutos e recozido durante 180 minutos.

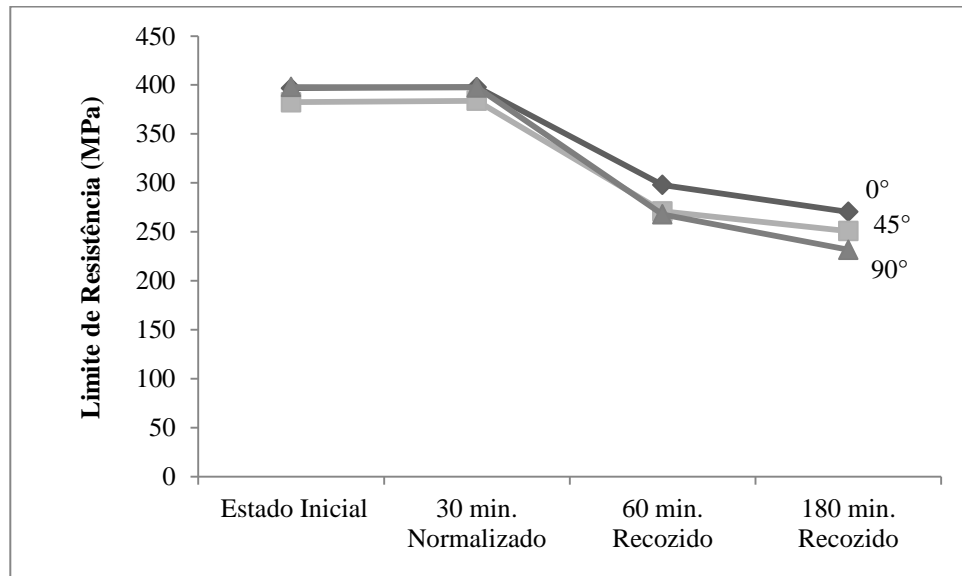
Por meio dos dados exibidos nas Tabelas 8 a 11 e análise das Figuras 43, 44 e 45, comprovou-se que os valores de limite de escoamento, de limite de resistência e de alongamento % uniforme das amostras a 0° com a direção de laminação são superior e àqueles obtidos para os demais ângulos para todas as condições analisadas, exceto para o alongamento a 0° na condição de recozimento em 180 minutos. Para os corpos de prova a 45° com a direção de laminação, na maioria das situações observadas, os limites de escoamento, limite de resistência mecânica e alongamento resultaram em valores intermediários às outras direções (0° e 90° com a direção de laminação). Os corpos de prova a 90° com a direção de laminação obtiveram resultados abaixo dos outros dois, na maioria das condições analisadas.

**Figura 363: Limite de escoamento em função das condições do aço AISI 1010**



Fonte: Produzido pela autora.

**Figura 374: Limite de resistência em função das condições do aço AISI 1010**



Fonte: Produzido pela autora.

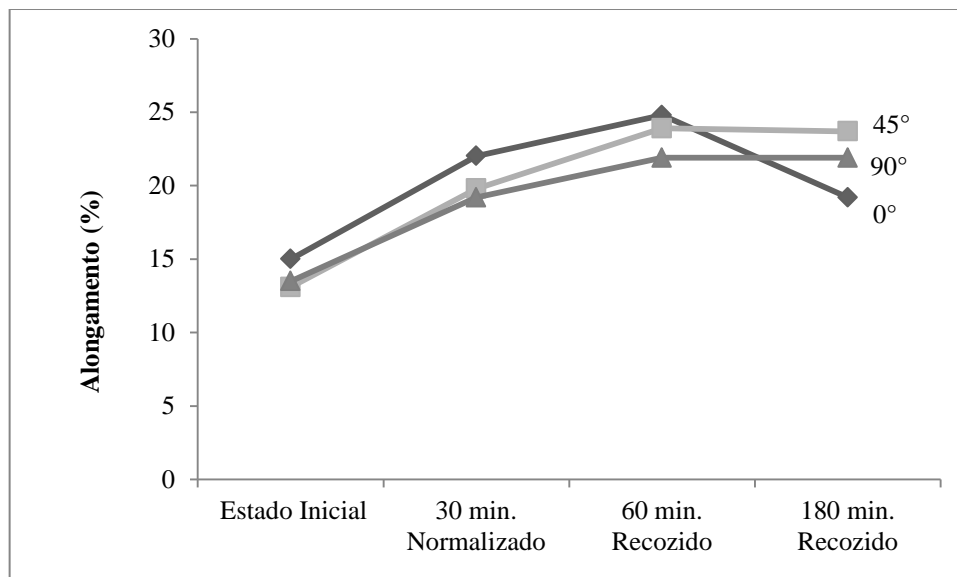
Observa-se que com o aumento do tempo de encharque, e consequentemente, o aumento do tamanho de grão, o limite de escoamento decresceu, ou seja, a deformação plástica do aço AISI 1010, é menor quando se aumenta o tamanho de grão. Este efeito é comprovado pela literatura, de acordo com a Equação de Hall- Petch (CALLISTER, 2008).

O mesmo efeito é observado com o limite de resistência. Com o aumento do tamanho de grão, e como comprovado em seções anteriores, a dureza do material também diminui, com isto, a resistência máxima também decresce.

O alongamento na maioria das situações aumentou com o aumento do tamanho de grão.

O efeito da orientação cristalográfica com a direção de laminação pode ser associado à textura cristalográfica, mostrando inclusive que a realização de tratamento térmico não é capaz de remover completamente os efeitos do processamento prévio em relação ao fenômeno, muito importante na estampagem de chapas.

**Figura 385: Alongamento em função das condições do aço AISI 1010**



Fonte: Produzido pela autora.

## 5.6 Anisotropia

Nas tabelas 12 a 14 são mostrados os resultados referentes a análise da anisotropia planar e da anisotropia normal média do material como recebido, recozido durante 60 minutos e recozido durante 180 minutos. No ensaio com as amostras normalizadas durante 30 minutos (resfriamento ao ar) não foi possível medir os valores de comprimentos e larguras finais devido ao fato das marcações que foram feitas nos corpos de prova para a medição da variação de comprimento e largura antes do ensaio de tração desaparecerem durante o ensaio (devido ao “desprendimento” de uma camada oxidada), impossibilitando a medição das mesmas.

Os valores da anisotropia normal média e planar apresentados para a condição de recozimento a 180° apresentados na Tabela 14, para o coeficiente de anisotropia, anisotropia planar e anisotropia normal média, estão muito acima do esperado.

**Tabela 12: Valores de anisotropia planar e normal média para a condição da amostra recebida**

Condição Inicial	0°	45°	90°
$t_1$	55,91	56,86	55,52
$t_2$	27,82	28,14	27,33
$w_1$	7,73	7,69	7,79
$W_2$	7,52	7,83	7,78
$W_3$	7,34	7,34	7,70
$\varepsilon_{t1}$	0,11172025	0,128569101	0,104720311
$\varepsilon_{t2}$	0,106879362	0,118316227	0,089109175
$\varepsilon_{w1}$	-0,034332679	-0,039520758	-0,026600682
$\varepsilon_{w2}$	-0,061875404	-0,021479032	-0,027885203
$\varepsilon_{w3}$	-0,086102699	-0,086102699	-0,038221213
Média $\varepsilon_t$	0,1093	0,123443	0,096915
Média $\varepsilon_w$	-0,06077	-0,04903	-0,0309
R	1,252232	0,658986	0,46813
$ \bar{R} $		0,759584	
$\Delta R$		0,201195	

Fonte: Produzido pela autora.

Os coeficientes de anisotropia do corpo de prova no estado inicial apresentaram diferenças de um tratamento para o outro. Quando analisado o coeficiente de anisotropia do aço AISI 1010 no estado inicial, verifica-se que este é maior a 0°, seguido do coeficiente a 45° e 90°. Já o coeficiente de anisotropia do aço recozido durante 60 minutos, apresentou o maior coeficiente na direção de 45°, seguido do coeficiente a 90° e 0°. E por fim, analisando o coeficiente de anisotropia do aço recozido durante 180 minutos apresentou o maior coeficiente na direção 90°, seguida dos coeficientes a 0° e 45°. Por esta razão, os resultados impossibilitaram retirar conclusões sobre o aumento de grão em relação ao coeficiente de anisotropia.

Nota-se que comparando as anisotropias planares ( $\Delta R$ ), com os tamanho de grão, a medida que o tamanho de grão aumenta, a anisotropia planar também aumenta.

Em relação a anisotropia normal média, com o aumento do tamanho de grão, a anisotropia normal média diminuiu, exceto para o caso de recozimento durante 180 minutos, em que o valor foi muito acima.

**Tabela 13: Valores de anisotropia planar e normal média para a condição de Recozimento durante 60 minutos**

60 min Forno	0°	45°	90°
$t_1$	56,19	55,86	56,06
$t_2$	28,15	28,52	28,51
$w_1$	7,56	-	7,51
$W_2$	7,53	7,47	7,57
$W_3$	7,67	7,4	7,53
$\varepsilon_{t1}$	0,1167158	0,110825555	0,11439954
$\varepsilon_{t2}$	0,11867153	0,131729771	0,131379078
$\varepsilon_{w1}$	-0,056570351	-	-0,063206076
$\varepsilon_{w2}$	-0,0605465	-0,068546543	-0,055248474
$\varepsilon_{w3}$	-0,042124926	-0,077961541	-0,0605465
Média $\varepsilon_t$	0,117694	0,121278	0,122889
Média $\varepsilon_w$	-0,05308	-0,07325	-0,05967
R	0,821515	1,525375	0,943765
$ \bar{R} $		1,204008	
$\Delta R$		-0,64274	

Fonte: Produzido pela autora.



**Tabela 14: Valores de anisotropia planar e normal para a Condição de recozimento durante 180 minutos**

<b>180 min Forno</b>	<b>0°</b>	<b>45°</b>	<b>90°</b>
$t_1$	57,24	56,21	55,17
$t_2$	28,99	28,39	22,87
$w_1$	7,66	7,63	11,38
$w_2$	7,49	7,68	11,35
$w_3$	7,45	7,76	11,35
$\varepsilon_{t1}$	0,135229949	0,117071672	0,098396322
$\varepsilon_{t2}$	0,148075118	0,127161146	0,108675017
$\varepsilon_{w1}$	-0,043429558	-0,047353696	-0,093871216
$\varepsilon_{w2}$	-0,065872744	-0,040821995	-0,0965109
$\varepsilon_{w3}$	-0,071227509	-0,030459207	-0,0965109
Média $\varepsilon_t$	0,141653	0,122116	0,103536
Média $\varepsilon_w$	-0,06018	-0,03954	-0,09563
<b>R</b>	0,738581	0,478918	12,09804
$ \bar{R} $		3,448617	
$\Delta R$		5,939397	

Fonte: Produzido pela autora.

## 6. CONCLUSÃO:

Em relação a influência do tamanho de grão no aço AISI 1010, verificou-se que com o aumento do tempo de encharque, o tamanho de grão aumentou. Este resultado foi mais claro nas amostras recozidas comparadas às amostras normalizadas.

Foi comprovado que com o aumento do tamanho de grão, a dureza do material diminuiu. Esta situação foi mais expressiva nos experimentos com as amostras recozidas.

Foi verificado que com o aumento do tamanho de grão, o limite de escoamento e o limite de resistência decresceram. Já a ductilidade do aço aumentou com a o aumento do tamanho de grão.

A análise da estampabilidade por meio da anisotropia observou-se que a anisotropia planar diminuiu com a elevação do tamanho de grão. Já a anisotropia normal média, aumentou com o aumento do tamanho de grão.

Em relação ao coeficiente de anisotropia não puderam ser retiradas conclusões.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM INTERNATIONAL. Metals Handbook: **Forming and forging**. 1998. V. 14.

ACESITA (Org.). **Cadernos de Assistência Técnica**. 2004. Disponível em: <[http://www.nucleoinox.com.br/upfiles/arquivos/downloads/ACESITA\\_CADERNO\\_2\\_JULHO.pdf#page=2&zoom=100,0,842](http://www.nucleoinox.com.br/upfiles/arquivos/downloads/ACESITA_CADERNO_2_JULHO.pdf#page=2&zoom=100,0,842)>. Acesso em: 01/02/2014.

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.

BATALHA, G. F. **Introdução a Manufatura Mecânica: Projeto 2 - Estampagem**. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/pmr/lefa/download/PMR2202-Estampagem.pdf>>. Acesso em 18/07/2012.

BATALHA, G. F. **Introdução a Manufatura Mecânica: Projeto 2 – Ensaio de Swift**. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/pmr/lefa/download/PMR2202-Estampagem.pdf>>. Acesso em 18/07/2012.

CALLISTER, W.J. **Ciência e Engenharia de Materiais. Uma Introdução**. 7ed. Rio de Janeiro. LTC, 2008. 672 p.

CARVALHIDO, C. A. **Influência da deformação na laminação de encruamento nas propriedades mecânicas do aço acalmado ao alumínio refosforado, galvanizado a quente, classe 220mpa de limite de escoamento**. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/MAPO-77KNK6>> Acesso em 21/10/2012.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 5 ed. São Paulo: ABM (1984) 518p.

CORASSINI, Eduardo. **Influência do grau de encruamento e tratamentos térmicos de recozimento nas propriedades mecânicas do aço ABNT 1006**. 2012. 75 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Centro Universitário da Fei, São Bernardo do Campo, 2012.

**CONFORMAÇÃO DAS CHAPAS**. Disponível em:<<http://www.cimm.com.br>>. Acesso em 06/07/2012.

FERRARINI, José Luiz. **Caracterização de Materiais para o Processo de Estampagem**. 2004. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

LANDGRAF, et al. **Tamanho de grão e textura dos aços elétricos de grão não-orientado**. 28 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MIRANDA, W. J. **Avaliação da estampabilidade do aços intersticial galvanizado aquecido por imersão (GA, GI), eletro galvanizado (EG), eletro galvanizado e pré-fosfatizado (EGP)**. Disponível em:<<http://www.mea.pucminas.br/dissert/willianjohny-completo.pdf>> Acesso em: 12/07/2012.

MORO, N.; AURAS, A. P. **Conformação mecânica II: extrusão, trefilação e conformação de chapas**. Disponível em: <[http://www.norbertocefetsc.pro.br/pfb\\_conformacaoii.pdf](http://www.norbertocefetsc.pro.br/pfb_conformacaoii.pdf)>. Acesso em: 14/07/2012.

PINTO, André Luiz. **ENGENHARIA DE CONTORNO DE GRÃO EM LIGAS METÁLICAS CFC**. 2004. 234 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2004.

SCHAEFFER, Lirio. **Conformação Mecânica**. 3 ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2009. 167 p.

SCHAEFFER, Lirio. **Conformação Mecânica**. Ed. Imprensa Livre, Porto Alegre, Brasil, 167 p. 1999.

SCHAEFFER, Lirio. **Fundamentos do projeto de ferramentas para o processo de Estampagem**. Porto Alegre. Março/Abril de 2006. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/ldtm/publicacoes/06%2001.pdf>. Acesso em 19/10/2012.