

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

ANA LUIZA GONÇALVES SALOMÉ PAOLINELLI

ANÁLISE DO RETORNO ELÁSTICO NO DOBRAMENTO DE CHAPAS DE AÇO
COM BAIXO TEOR DE CARBONO

BELO HORIZONTE

2017

ANA LUIZA GONÇALVES SALOMÉ PAOLINELLI

**ANÁLISE DO RETORNO ELÁSTICO NO DOBRAMENTO DE CHAPAS DE AÇO
COM BAIXO TEOR DE CARBONO**

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

Orientadora: Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Coorientador: Wellington Lopes

BELO HORIZONTE

2017

ANA LUIZA GONÇALVES SALOMÉ PAOLINELLI

**ANÁLISE DO RETORNO ELÁSTICO NO DOBRAMENTO DE CHAPAS DE AÇO
COM BAIXO TEOR DE CARBONO**

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

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa– Orientadora

Prof. Dr. Wellington Lopes - Coorientador

Prof. Dr. João Paulo Machado de Sousa

Eng. Ma. Rafaela Nepomuceno e Vidigal

BELO HORIZONTE

2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me acompanhar e permitir trilhar os caminhos que almejei sem desistir.

Aos meus pais, Luis Alberto e Maria do Rosário, pelo apoio, incentivo e, principalmente, por todo amor e atenção, que foram base para as minhas conquistas e motivação para meu crescimento.

Ao meu namorado Rodrigo, pelo carinho, companheirismo, paciência, prestatividade e apoio neste trabalho, os quais fizeram desta estrada uma caminhada mais doce.

À minha orientadora Professora Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa, pela orientação e auxílio imprescindíveis durante todo o desenvolvimento do trabalho. Agradeço ainda pela dedicação, atenção, empenho, incentivos e amizade construída.

Aos colegas, Marcelo Fonseca e Cíntia Braga, pela disponibilidade e auxílio durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Wellington Lopes, pela predisposição e auxílio nos momentos que precisei.

A todos que colaboraram para meu crescimento profissional.

“Tenha coragem de seguir o que seu coração e sua intuição dizem. Eles já sabem o que você realmente deseja. Todo resto é secundário”
(STEVE JOBS)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Operações típicas de conformação	17
Figura 2 – Corte por cisalhamento de metal em prensa.	18
Figura 3 – Operação de estiramento por tração.....	20
Figura 4 – Processo de embutimento de um copo cilíndrico.....	21
Figura 5 – Regiões do copo sob estampagem com diferentes estados de tensão.	21
Figura 6 – Operação de dobramento.....	23
Figura 7 – Denominações gerais dos diversos processos envolvendo dobramento.	24
Figura 8 – Definição dos termos empregados no dobramento.....	26
Figura 9 – Esforços atuantes e linha neutra no dobramento.	26
Figura 10 – Efeito da relação entre largura e espessura na razão de biaxialidade e na ductilidade em dobramento.....	29
Figura 11 – Efeito de mola no dobramento	31
Figura 12 – Efeito do ângulo de dobramento e espessura no retorno elástico de chapas com baixo teor de carbono.....	32
Figura 13 – Esquema geral do ensaio de dobramento.....	34
Figura 14 – Processo de dobramento guiado em V.....	35
Figura 15 – Etapas de desenvolvimento do trabalho.	36
Figura 16 – Corpo de prova empregado nos experimentos de dobramento.....	38
Figura 17 - Guilhotina da marca Newton modelo TM 10.....	39
Figura 18 – Forno elétrico da marca Magnus utilizado nos tratamentos térmicos.....	39
Figura 19 – Esquema geral do embutimento à frio.	40
Figura 20 – Lixadeiras semiautomáticas da marca Arotec, modelo Aropol 2V.	41
Figura 21 – Politrizes da marca Arotec modelo Aropol 2V e Panambra/Struers modelo DP-10.....	41
Figura 22 - Equipamentos utilizados na microscopia óptica.	42
Figura 23 – Microdurômetro da marca Shimadzu, modelo 2T.	43
Figura 24– Equipamentos utilizados para realização do ensaio de dobramento.....	44
Figura 25 – Cutelos de raios distintos.	44
Figura 26 – Imagens de corpos de prova do aço SAE 1010 normalizado dobrados.	45
Figura 27 – Etapas do processo de dobramento.....	46
Figura 28 – Goniômetro da marca Mitutoyo.....	47
Figura 29 – Imagens obtidas por microscopia óptica do Aço SAE 1010 no Estado Inicial, como adquirido.....	48
Figura 30 – Imagens obtidas por microscopia óptica do aço SAE 1010 tratado termicamente por normalização.	49
Figura 31 – Imagens obtidas por microscopia óptica do aço SAE 1010 tratado termicamente por	

recozimento_30 mim de encharque (Primeira condição).....	49
Figura 32 – Imagens obtidas por microscopia óptica do aço SAE 1010 tratado termicamente por recozimento_180 mim de encharque (Segunda condição).	50
Figura 33 – Valores de microdureza Vickers para as amostras do aço SAE 1010.	51
Figura 34 – Análise da influência do raio de dobramento no retorno elástico verificado durante o dobramento com ângulos diferentes em amostras submetidas à normalização.	54
Figura 35 – Análise da influência do raio de dobramento no retorno elástico verificado durante o dobramento com ângulos diferentes em amostras submetidas ao recozimento.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço SAE 1010	37
Tabela 2 – Condições gerais observadas no ensaio de dobramento.	44
Tabela 3 - Valores de microdureza Vickers para as amostras do aço SAE 1010.	51
Tabela 4 – Análise do retorno elástico na amostra tratada termicamente por normalização, à 900°C com tempo de encharque de 10 minutos e resfriada ao ar.	53
Tabela 5 – Análise do retorno elástico na amostra tratada termicamente por recozimento, à 900°C com tempo de encharque de 30 minutos e resfriada ao forno.....	53

RESUMO

O dobramento, dentre as operações de estampagem de chapas, é a mais comum, sendo uma etapa isolada do processamento do material ou uma das etapas de deformação plástica envolvida em outros processos de conformação mecânica. O retorno elástico é um fenômeno decorrente da operação de dobramento que pode ser considerado um empecilho para o processo de conformação. Dentro desse contexto, o presente trabalho consistiu na análise da operação de dobramento em V de chapas do aço baixo carbono SAE 1010, considerando as características microestruturais do material submetido a diversas condições de tratamento e diferentes condições de processamento, tais como três ângulos de dobramento e cinco raios do cutelo. O material foi avaliado qualitativamente por meio de microscopia óptica e quantitativamente em termos de microdureza e retorno elástico. De maneira geral, para as microestruturas consideradas nesse trabalho, o fenômeno de recuperação elástica aumentou com a redução do tamanho médio dos grãos e com o aumento do raio do cutelo e do ângulo de dobramento, sendo que nesse último caso, o fenômeno foi observado somente quando o ângulo variou de 30° para 60°. O tamanho médio dos grãos foi relacionado com o limite de escoamento por meio da equação de Hall-Petch e a análise do efeito mola foi realizada em relação ao limite de escoamento.

Palavras-chave: dobramento, aço baixo carbono, retorno elástico.

ABSTRACT

Bending is one of the most common sheet forming operations, performed as an isolated step of the material process or associated with other plastic deformation processes. As a result of the bending operation, the springback can be considered an obstacle to this conformation process. The aim of this work was the analysis of the V bending operation on SAE 1010, a low carbon steel sheet, considering the microstructural characteristics of the treated material and different process conditions, such as three bending angles and five bending radius. The material was qualitatively evaluated by optical microscopy and quantitatively evaluated in terms of microhardness and elastic recovery. In general, for the microstructures considered in this work, the phenomenon of springback increased with a decrease of the average grain size and with an increase of the bending radius and bending angle. For this last parameter, the phenomenon was observed only when the bending angle changes from 30 ° to 60 °. The grain size was related to the Yield value through the Hall-Petch equation and the elastic recovery analysis was done based in this relation.

Keywords: bending, low carbon steel, elastic recovery.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVOS	14
2.1.	Objetivo geral.....	14
2.2.	Objetivos Específicos.....	14
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1.	Aços Carbono.....	15
3.2.	Conformação de Chapas.....	16
3.2.1.	<i>Corte por cisalhamento</i>	17
3.2.2.	<i>Estiramento</i>	19
3.2.3.	<i>Embutimento</i>	20
3.2.4.	<i>Dobramento</i>	22
3.3.	Dobramento de Chapas Metálicas.....	23
3.3.1.	<i>Características Gerais</i>	23
3.3.2.	<i>Retorno elástico no dobramento</i>	29
3.3.3.	<i>Ensaio de Dobramento em V</i>	33
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1.	Material.....	37
4.2.	Tratamentos Térmicos: Reaquecimento e Normalização.....	39
4.3.	Caracterização Microestrutural.....	40
4.3.1.	<i>Preparação metalográfica</i>	40
4.3.2.	<i>Microscopia óptica</i>	42
4.4.	Ensaio de Microdureza.....	42
4.5.	Ensaio de dobramento.....	43
4.6.	Análise do retorno elástico no aço SAE 1010.....	46
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1.	Caracterização do Aço SAE 1010 no Estado Inicial.....	48
5.2.	Caracterização do Aço SAE 1010 Após Processamentos Térmicos.....	48

5.3.	Efeito do Tratamento Térmico no Comportamento Mecânico: Dureza <i>Vickers</i>.....	50
5.4.	Análise do Retorno Elástico do Aço SAE 1010 no Dobramento	52
6.	CONCLUSÕES.....	57
7.	REFERÊNCIAS.....	58

1. INTRODUÇÃO

O processo de conformação mecânica de chapas, no qual ocorre uma mudança específica na forma do material, é largamente utilizado para a produção e processamento de materiais metálicos e dentre esses processos de estampagem, os que mais se destacam são corte por cisalhamento, estiramento, embutimento e dobramento (DIETER, 1981).

O dobramento, como um processo específico de conformação de chapas, é definido também como um caso particular de conformação por flexão, no qual as modificações de forma são provocadas pela presença de um momento fletor, mediante a aplicação de tensões. Esse princípio é utilizado para dobrar chapas, barras e outros produtos (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

Durante as operações de dobramento pode ocorrer uma série de eventualidades, que podem ser tratadas como problemas para a realização desse processo, tais como o fenômeno de retorno elástico, que compreende a mudança dimensional provocada no material após a retirada dos esforços aos quais estava submetido, e a formação de trincas devido à distribuição não homogênea de tensão e de deformação plástica que passam a atuar como concentradores de tensão (DIETER, 1981).

O fenômeno do efeito mola está relacionado a diversos fatores, dentre eles os que mais se destacam são aqueles relacionados aos parâmetros de processo, como as características geométricas da operação, o atrito e as condições de lubrificação. Além desses parâmetros, também há aspectos relacionados às características estruturais dos materiais, tais como o arranjo microestrutural, o tamanho de grão e a possibilidade da ocorrência de transformações de fase durante o ciclo de estampagem (SALES, 2013).

Para a caracterização dos materiais por meio de esforços de dobramento, pode-se utilizar o ensaio de dobramento, que é amplamente utilizado nas indústrias e laboratórios, principalmente pelo fato de ser um ensaio de simples realização (SOUZA, 1982).

Neste trabalho foi investigado o comportamento do aço SAE 1010 tratado termicamente em diferentes condições no ensaio de dobramento e foi avaliado também o fenômeno de recuperação elástica nesse contexto.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Analisar o dobramento de chapas do aço SAE 1010 de baixo teor de carbono.

2.2. Objetivos Específicos

- a) Realizar uma caracterização microestrutural e mecânica do estado inicial do aço SAE 1010;
- b) Avaliar o efeito dos tratamentos térmicos na microestrutura e na dureza do material;
- c) Avaliar os efeitos dos parâmetros de dobramento (ângulo de dobramento, raio do cutelo e tamanho de grão) no fenômeno de recuperação elástica do aço SAE 1010;
- d) Analisar as influências das características microestruturais do aço com baixo teor de carbono no fenômeno de recuperação elástica.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Aços Carbono

Aço carbono é uma liga metálica formada essencialmente por ferro e carbono, em que a porcentagem em peso desse último elemento não deve ultrapassar 2,11%. Nessa liga, comumente encontram-se também outros elementos em baixas quantidades, com destaque para o manganês, silício, fósforo e enxofre. Demais elementos, existem apenas em quantidades residuais (SOUZA, 1989).

Nos aços carbono há uma presença maior de ferro em porcentagem de peso, no entanto, o carbono é um elemento de liga de grande importância, uma vez que influencia diretamente nas propriedades mecânicas dos aços. Quanto maior o teor de carbono maior será a dureza e os limites de resistência à tração e de escoamento de um aço, ao mesmo tempo que menor a ductilidade e tenacidade (CHIAVERINI, 1984).

Segundo Souza (1989), uma das formas de classificação dos aços carbono que leva em consideração apenas o teor de carbono está descrita abaixo:

- Aços de baixo carbono (0,10% a 0,30%C);
- Aços de médio carbono (0,30% a 0,85C%);
- Aços de alto carbono (0,85% a 1,50%);
- Aços com teor de carbono acima de 1,5%.

As limitações dos aços ao carbono, no geral, são baixa temperabilidade, baixa resistência mecânica, baixa resistência ao desgaste em altas temperaturas, baixa resistência à corrosão e baixa resistência à oxidação (SOUZA, 1989).

Os aços com baixo teor de carbono em específico possuem, normalmente, baixa resistência mecânica, e elevada tenacidade e ductilidade. Além disso, são usináveis e soldáveis, além de

apresentarem baixo custo de produção. Entre as suas aplicações típicas estão a utilização para produção de chapas automobilísticas, perfis estruturais e placas utilizadas na fabricação de tubos, construção civil, pontes e latas de folhas de flandres (SOUZA, 1989).

A classificação dos aços não obedece a um único critério, existindo classificações quanto à composição química, processamento, microestrutura, propriedades ou até mesmo quanto às aplicações a que se destinam (SILVA; MEI, 2010).

Uma das classificações mais generalistas é aquela que considera a composição química dos aços e dentre os sistemas de classificação mais conhecidos destacam-se: *American Iron and Steel Institute* (AISI) e *Society of Automotive Engineers* (SAE). Nesse tipo de classificação Normativa SAE/AISI é estabelecida uma chave numérica para a identificação dos aços, em que os dois últimos algarismos representam a quantidade em centésimos de porcentagem de carbono (CHIAVERINI, 1984).

O aço estudado nesse trabalho apresenta baixo teor de carbono e é denominado aço SAE 1010, que possui 0,1% de carbono nominal em sua composição.

3.2. Conformação de Chapas

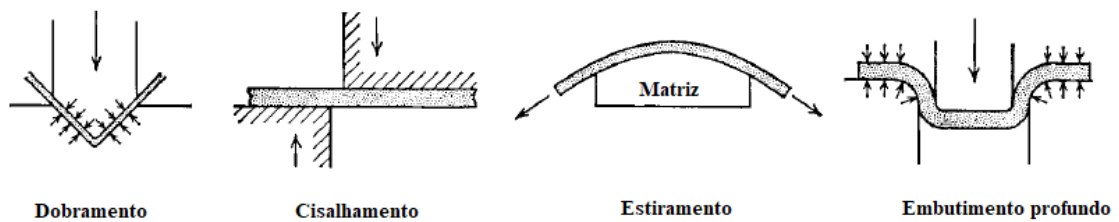
Em sua grande maioria, os materiais metálicos produzidos são submetidos, em algum estágio de seu processamento, ao processo de conformação, no qual ocorre uma mudança específica na forma do corpo metálico (DIETER, 1981).

O processo de conformação de chapas consiste na transformação mecânica de um disco plano (*blank*) no formato de uma matriz, pela aplicação de esforços transmitidos por um cutelo. Essa operação, em que a mudança de forma ocorre com a deformação plástica por meio da aplicação de forças externas, viabiliza a produção em grande escala e a baixos custos, de peças no estado sólido e com características controladas, tais como forma e dimensão, propriedades mecânicas e condições superficiais (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

Segundo Dieter (1981) a fabricação de perfis por meio da conformação de chapas metálicas finas é realizada pela extensão e contração em três direções perpendiculares, das dimensões de

todos os elementos de volume. Dessa maneira, o perfil obtido resulta da integração das distensões e contrações locais dos elementos de volume. Para o autor, uma das formas de classificar esse tipo de processo é relacioná-lo com o tipo de operação específica realizada, tal como dobramento, estampagem profunda, corte por cisalhamento e estiramento. Essas operações estão ilustradas na Figura 1.

Figura 1 – Operações típicas de conformação



Fonte: Dieter, 1981, p.453.

O método manual de conformação de folhas metálicas é atualmente utilizado como uma operação de acabamento para remoção de rugas e vincos deixados pelas máquinas ou como uma preparação de poucas peças idênticas para trabalhos experimentais. A produção em larga escala de perfis metálicos é executada por prensas hidráulicas e mecânicas, sendo que esta última apresenta, na maioria dos casos, uma ação rápida com pancadas de curta duração, enquanto as prensas hidráulicas são de ação lenta e podem aplicar pancadas mais longas (DIETER, 1981).

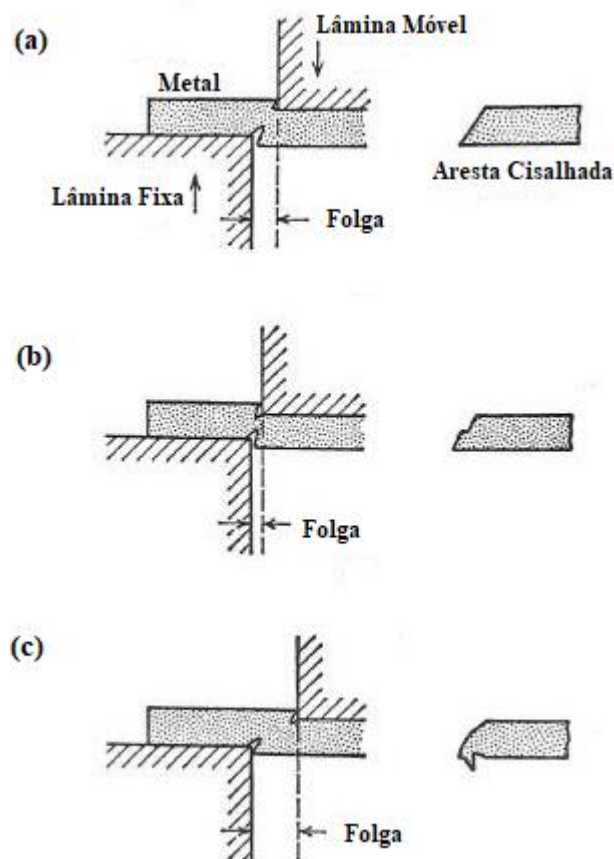
3.2.1. Corte por cisalhamento

O corte de chapas mediante cisalhamento do material é executado entre duas arestas cortantes, que se movimentam conforme mostrado na Figura 2a. Neste processo, uma tira metálica estreita se rompe na superfície em contato com a lâmina cortante mediante a propagação da fratura iniciada pela intensa deformação plástica. A ductilidade do material interfere diretamente na espessura de penetração do cutelo para o corte total da peça, sendo que em materiais dúcteis a penetração pode ultrapassar ligeiramente a espessura da chapa, enquanto que para materiais frágeis uma pequena fração da espessura penetrada pelo cutelo é suficiente para o corte total da chapa (DIETER, 1981).

A folga estabelecida entre as lâminas é outro parâmetro importante nas operações de corte,

responsável pela qualidade das superfícies obtidas. Uma folga adequada é capaz de promover a propagação das trincas das bordas para o centro da espessura da chapa, de maneira a garantir uma superfície de corte lisa como mostrado na Figura 2a. Caso a folga seja excessiva ou insuficiente será obtido uma distorção na aresta de corte e mais energia será dispendida na operação como mostrado na Figura 2b e c (RODRIGUES; MARTINS, 2005).

Figura 2 – Corte por cisalhamento de metal em prensa.



(a) Folga adequada; (b) Folga insuficiente; (c) Folga excessiva.
Fonte: Dieter, 1981, p.579.

Além da espessura, a folga também é determinada pelo tipo de material. No caso específico de chapas finas de aço de baixo carbono, a folga recomendada para o cisalhamento é de 3 a 5% da espessura da chapa (SCHAEFFER, 2009).

De acordo com Dieter (1981), diversos grupos de operações de prensas são definidos a partir do processo de corte, como citado abaixo:

— *Blanking* – consiste na preparação de discos planos (*blanks*) que servirão de matéria

prima para outros processos de conformação;

— *Piercing ou Punching* – consiste na fabricação de furos em prensas, em que o material removido não será aproveitado;

— *Notching* – consiste na fabricação de entalhes nas bordas de uma chapa;

— *Fendilhamento* - consiste no corte para estabelecimento de fendas;

— *Trimming e Shaving* – consiste, respectivamente, na rebarbação e alisamento da chapa, como um processo de acabamento para retirada de excessos.

3.2.2. *Estiramento*

O estiramento de chapas consiste em um processo de conformação que envolve a aplicação de forças trativas sob o material apoiado em uma ferramenta ou bloco modelo (PALMEIRA et al., 2017). Este processo tem origem no desempenho de chapas finas laminadas por tração e atualmente é muito utilizado na indústria aeronáutica para fabricação de peças com grandes raios de curvatura ou com dupla curvatura. Também é muito empregado na indústria automobilística, em que a maioria dos processos de estampagem envolve a técnica de estiramento (DIETER, 1981).

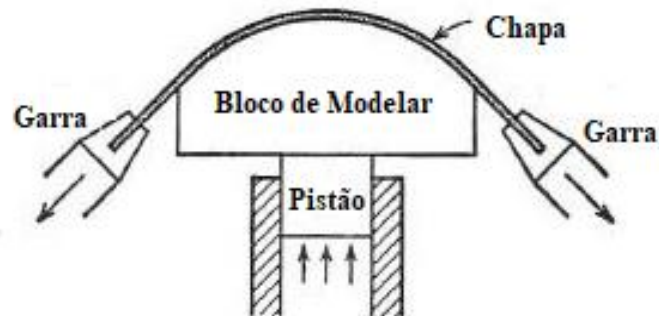
O estiramento refere-se à tração uniaxial em determinadas situações, entretanto, o estiramento biaxial é mais usual em manufatura de peças, em que ocorre deformações em todas as direções, no plano da chapa, e diminuição da espessura da mesma (HOSFORD et al., 1993).

O equipamento utilizado no estiramento consiste basicamente em um pistão, na maioria dos casos hidráulico, que movimenta o cutelo ou bloco modelo e duas garras, responsáveis por fixar as extremidades da chapa, como mostrado na Figura 3 (DIETER, 1981).

De acordo com Dieter (1981), durante o processo de estiramento, o blank metálico é primeiramente dobrado sobre o cutelo com um esforço de tração relativamente suave, as garras são aplicadas e o acionamento de carga é executado até que o material seja deformado

plasticamente para sua forma final. Neste processo, o gradiente de tensões é praticamente uniforme, o que garante uma eliminação quase total do efeito mola. No entanto, por envolver tensões trativas, o estiramento promove grandes deformações apenas em materiais muito dúcteis.

Figura 3 – Operação de estiramento por tração.



Fonte: Dieter, 1981, p.583.

Nesta operação, a magnitude da tensão de tração na superfície da chapa é relativamente baixa, o que contribui também para a redução do efeito do retorno elástico. No entanto, um inconveniente comum relacionado a esta técnica é a distribuição heterogênea da deformação plástica experimentada pelo material devido a ocorrência de deformação não uniforme (DIETER, 1981).

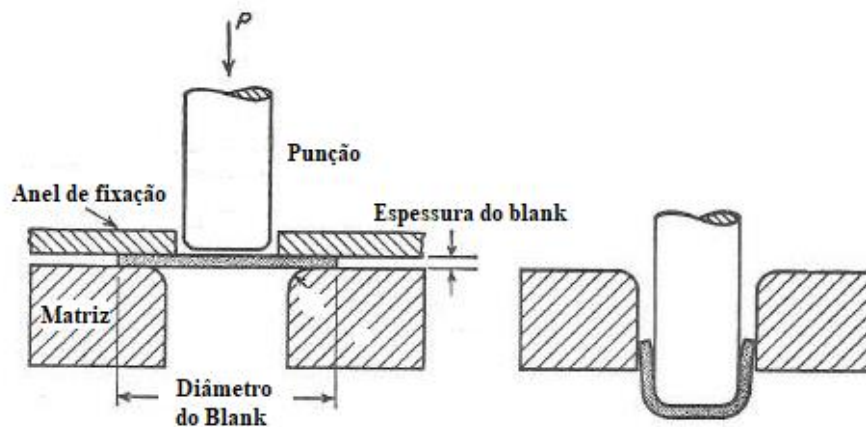
3.2.3. Embutimento

O embutimento ou estampagem profunda é o processo de conformação que consiste na fabricação de peças tridimensionais em forma de copo a partir de chapas, tais como banheiras, cápsulas e para-lamas de automóveis. Essa técnica permite a fabricação de corpos ocos com uma excelente relação entre tamanho e peso ou tamanho e consumo de matéria prima. A partir de chapas com superfícies acabadas é possível produzir peças também acabadas com poucas etapas de fabricação (SCHAEFFER, 2009).

Esse processo é executado por meio da compressão do blank para o interior da matriz de forma definida, como mostrado na Figura 4. Com o objetivo de evitar a formação de rugas na chapa é utilizado um dispositivo anti-rugas ou anel de fixação para que seja estabelecida uma compressão do blank contra a matriz por meio de uma pressão de fixação ou a ação de grampos

(SCHAEFFER, 2009).

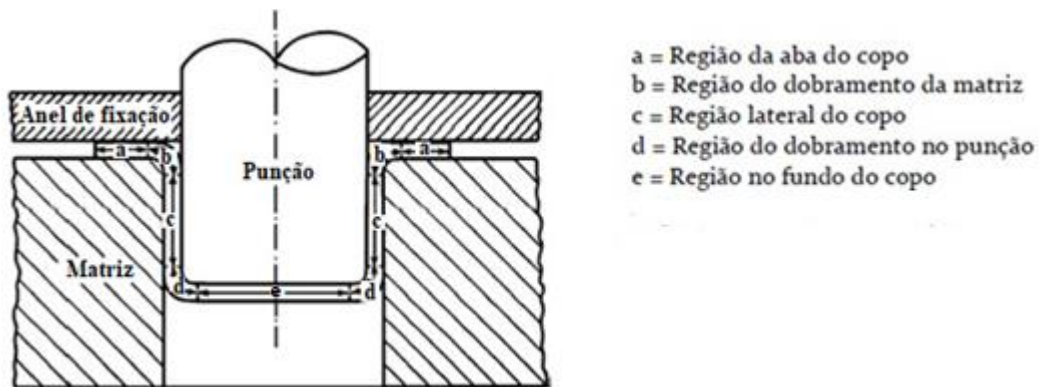
Figura 4 – Processo de embutimento de um copo cilíndrico



Fonte: Dieter, 1981, p.587.

À medida que o cutelo avança na cavidade da matriz, ocorre a redução gradativa da circunferência do disco na região da aba, como pode ser visto na Figura 5 (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

Figura 5 – Regiões do copo sob estampagem com diferentes estados de tensão.



Fonte: Bresciani Filho et al., 2011, p.65.

Durante a primeira parte do processo, em que a zona deformada é o fundo do copo e sua espessura é diminuída, há probabilidade de ocorrer rupturas devido ao enfraquecimento da região. Após a formação do fundo da peça e a conformação da mesma, também há probabilidade de ocorrer rupturas devido à força de conformação que tem que ser transmitida pelo fundo do copo (SCHAEFFER, 2009).

Dieter (1981) afirma que a melhoria da técnica de embutimento envolve o aumento da resistência da região da parede próxima ao fundo do copo em relação à região do topo da parede

que se deforma radialmente. A justificativa para esse fato está relacionada a propensão à ruptura oferecida pela região próxima ao fundo do copo. O deslocamento do potencial local de ruptura por meio de artifícios mecânicos como a pressão do copo em torno do cutelo é outra estratégia válida para a melhoria do embutimento. Processos como tornar a superfície do cutelo áspera ou impedir a lubrificação são outras alternativas. No entanto, a maior contribuição à melhoria do embutimento deve-se ao controle da textura cristalográfica da chapa a ser estampada, o que promove a orientação adequada dos sistemas de deslizamento de forma que a resistência na direção da espessura seja maior do que no plano da chapa.

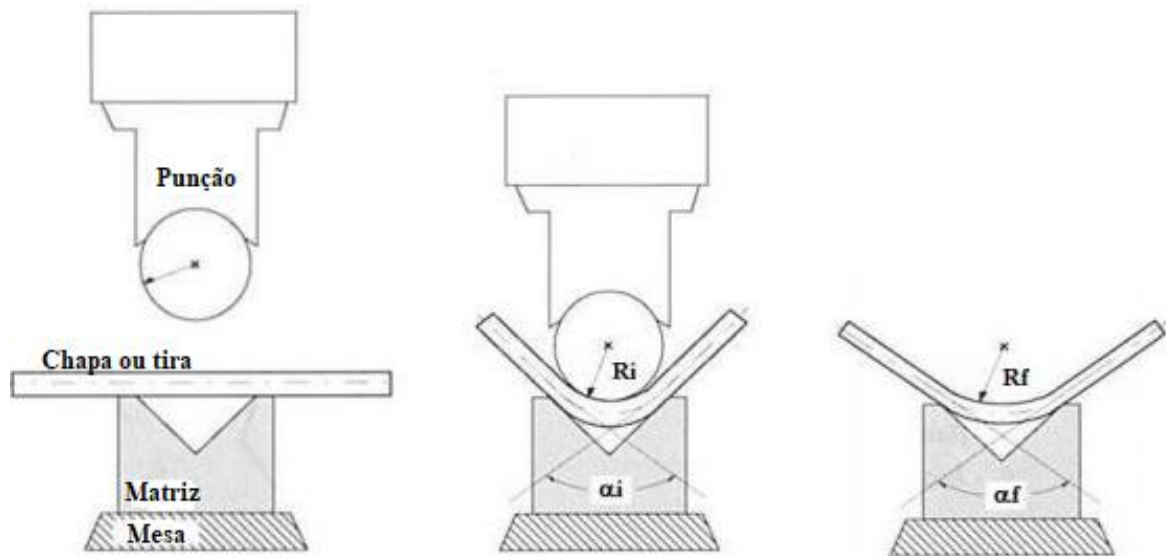
3.2.4. Dobramento

O dobramento pode ser definido como um caso particular de conformação por flexão, e é compreendido como a mudança de forma por meio da aplicação de esforços em direções opostas para provocar a flexão e a consequente deformação plástica, mudando a forma de uma superfície plana para duas concorrentes em ângulo, e formando na junção, um raio de concordância. Os esforços aplicados nesse tipo de operação se concentram na região de concordância das duas superfícies. Na parte interna dessa região de concordância surgem esforços de compressão e na parte externa, de tração. O possível enrugamento da peça ocorre na parte interna e a eventual fratura ocorre normalmente na parte externa (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

Durante o dobramento, quando o cutelo toca o material, a força de dobramento, medida na matriz, aumenta quase instantaneamente, decrescendo posteriormente até o nível zero, quando se completa o dobramento e o cutelo é retirado. A rápida queda de nível da tensão de compressão na matriz é seguida do surgimento de tensões de tração (BRESCIANI FILHO et al., 2011). Essa operação é ilustrada na Figura 6, em que R_i e R_f são, respectivamente, os raios de curvatura antes e depois da retirada dos esforços, e α_i e α_f representam, respectivamente, os ângulos de dobramento antes e após a remoção dos esforços.

Esse processo de conformação mecânica denominado dobramento será explorado nesse trabalho mais detalhadamente nos tópicos seguintes.

Figura 6 – Operação de dobramento.



Fonte: Sales, 2013, p.43.

3.3. Dobramento de Chapas Metálicas

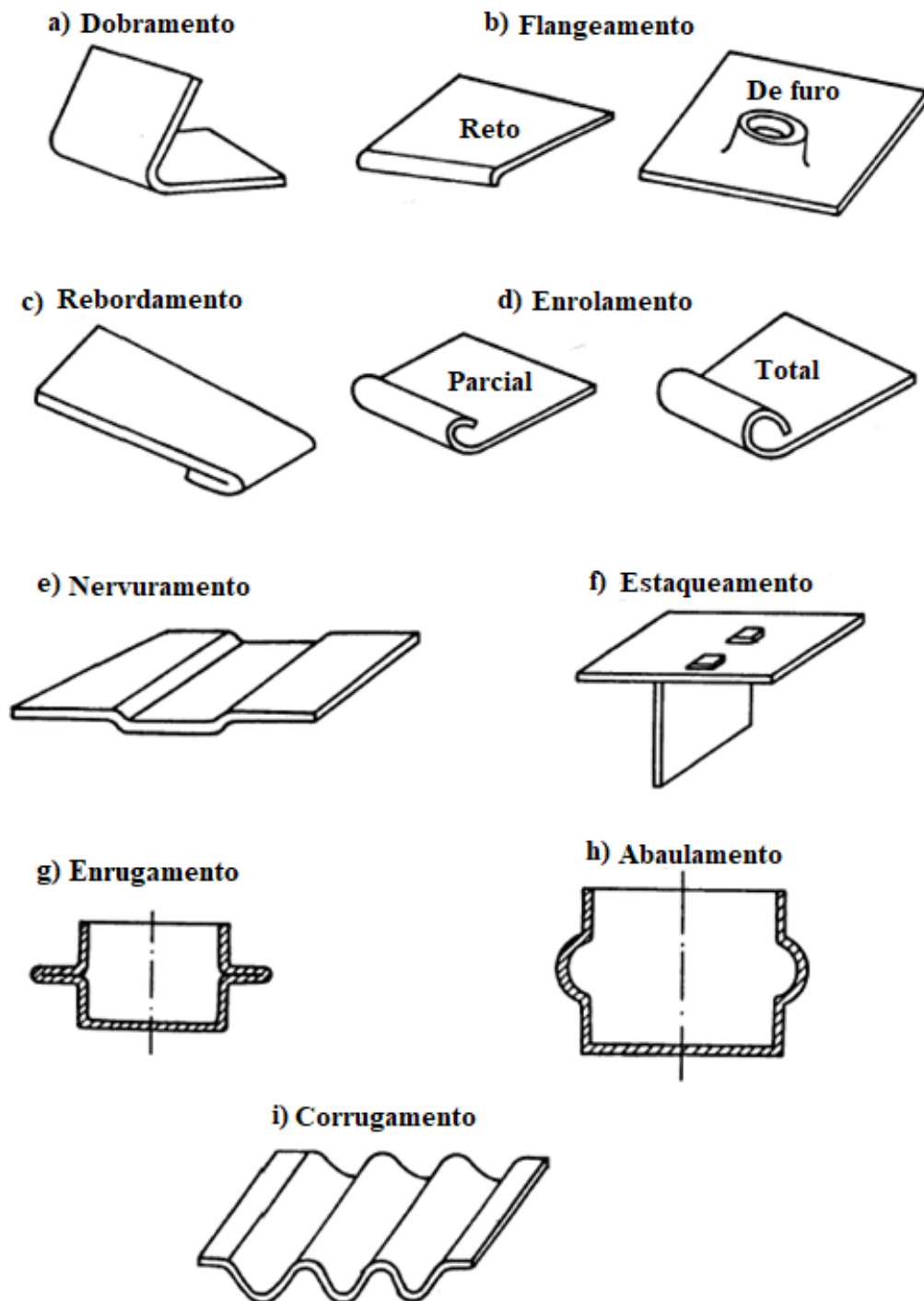
3.3.1. Características Gerais

Segundo Dieter (1981), o dobramento é uma operação de conformação que envolve a transformação de segmentos retos em curvos com o auxílio de ferramentas, como consequência desse processo tem-se a fabricação de calhas e tambores com o uso de chapas metálicas. Essa operação é a mais comum dentre as operações de estampagem de chapas, sendo uma etapa isolada do processamento do material ou uma das etapas de deformação plástica de outros processos de fabricação.

O dobramento, assim como os outros processos de estampagem destacam-se dentre os demais pela versatilidade das formas obtidas, pelo baixo tempo de processamento, pela alta produtividade, pelo controle dimensional simplificado e pelo consumo relativamente baixo de energia se comparado a outras operações envolvendo deformação plástica (SALES, 2013).

O dobramento está presente em diversos processos e pode ser realizado com diversos ângulos e raios de concordância e, portanto, recebe denominações diferentes, como ilustrado na Figura 7 (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

Figura 7 – Denominações gerais dos diversos processos envolvendo dobramento.



(a) Dobramento, (b) Flangeamento; (c) Rebordamento; (d) Enrolamento; (e) Nervuramento; (f) Estaqueamento; (g) Enrugamento; (h) Abaulamento; (i) Corrugamento.

Fonte: Bresciani Filho et al., 2011, p.63.

Essas diferentes denominações estão descritas, segundo Bresciani Filho et al. (2011) conforme abaixo:

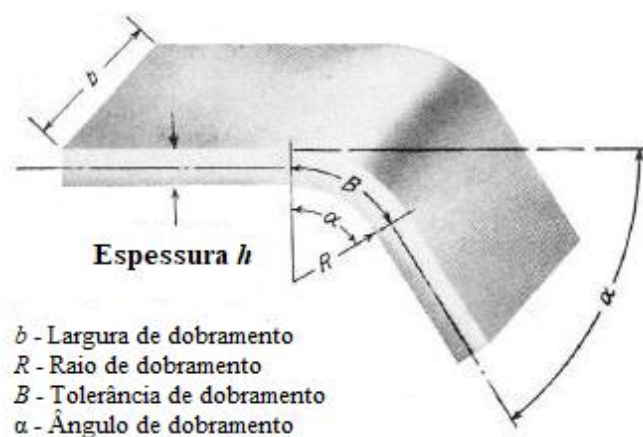
- a) Dobramento convencional em V
- b) Flangeamento, quando o dobramento é executado numa pequena parte ou dimensão da extremidade do esboço
- c) Rebordamento, quando ocorre o dobramento completo da borda de um esboço. Essa borda dobrada pode ser redobrada e unida à outra peça para formar uma junta agrafada.
- d) Enrolamento, quando ocorre o dobramento parcial ou total da ponta. É realizado para reforçar a borda da peça ou conferir o acabamento final a ela, de maneira que as bordas cortantes que impedem a sua manipulação desapareçam.
- e) Nervuramento é executado para dar à peça maior rigidez e também para lhe conferir aparência, de acordo com os conceitos do projeto.
- f) Estaqueamento é uma operação de dobramento visando a formação de duas ou mais peças.
- g) Enrugamento tem a finalidade, em geral, de permitir a montagem da peça em um conjunto.
- h) Abaulamento, realizado em tubos, tem a finalidade de conferir forma para fins funcionais da peça.
- i) Corrugamento é aplicado a chapas, principalmente para a fabricação de telhas metálicas onduladas ou serrilhadas.

Os parâmetros envolvidos no processo de dobramento estão ilustrados na Figura 8. O raio R consiste no raio de curvatura da superfície côncava. A tolerância de dobramento é representada por B , o ângulo de dobramento representado por α e a largura de dobramento por b (DIETER, 1981).

Na parte externa há presença de forças trativas e na interna de forças compressivas, portanto existe um ponto, ao longo de uma linha perpendicular à chapa em que as tensões são nulas. Esse

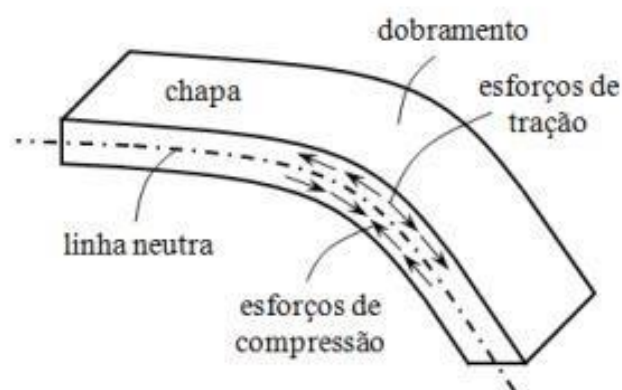
ponto é denominado ponto neutro e a linha neutra é estabelecida por meio da união de todos os pontos neutros ao longo da chapa, como pode ser ilustrado na Figura 9. Essa linha é utilizada como referência e como mecanismo de verificação do desenvolvimento da peça conformada, uma vez que seu comprimento não varia durante o processo. No entanto, as linhas entre as superfícies externa e interna e o plano transversal, não se mantêm inalteradas: a linha referente à superfície externa tem seu comprimento aumentado após o dobramento e a linha referente à superfície interna tem seu comprimento diminuído (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

Figura 8 – Definição dos termos empregados no dobramento.



Fonte: Dieter, 1981, p.580.

Figura 9 – Esforços atuantes e linha neutra no dobramento.



Fonte: Sales, 2013, p.43.

Dieter (1981) considera que na operação de dobramento os esforços predominantes de flexão são responsáveis pelo dobramento elástico, abaixo do limite elástico em que a deformação passa por zero na linha neutra (metade da espessura da chapa), e pelo dobramento plástico, acima do limite elástico em que a deformação plástica é proporcional à distância da linha neutra. Nesse

último caso, a linha neutra se aproxima da superfície interna de dobramento a medida que o processo ocorre. Assim, as fibras da superfície externa são mais deformadas que as fibras da superfície interna que são contraídas.

A deformação plástica existente no dobramento provoca uma redução na espessura da chapa, decorrente da ação de tensões de tração, em contrapartida, a largura da chapa tende a aumentar sob esforços de compressão. O efeito dessa deformação concentra-se ao longo da espessura, uma vez que a largura é muito maior que a espessura, causando pequenas distorções na seção transversal da chapa. Quando os esforços de tensão na superfície externa ultrapassam o limite de resistência à tração do material da chapa, há possibilidade de fissuramento dessa região, no entanto, na parte interna há possibilidade de enrugamento devido aos esforços de compressão aplicados (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

Fatores como a redução do raio de curvatura do dobramento, aumento da espessura da chapa e do ângulo de dobramento favorecem a obtenção de maiores níveis de deformação plástica, de maneira que o ângulo de dobramento deve ser maior do que o determinado para a peça deformada durante a operação de conformação, devido ao fenômeno observado de recuperação da deformação elástica, que será maior quanto maior for o limite de escoamento do material da chapa, maior for o ângulo de dobramento e quanto mais espessa for a chapa (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

De acordo com Dieter (1981), esses parâmetros que envolvem a deformação plástica podem ser explicados pela teoria do dobramento que afirma exatamente que a deformação aumenta com a diminuição do raio de curvatura, de acordo com a Equação 1:

$$e_a = -e_b = \frac{1}{(2R/h)+1} \quad (1)$$

Em que e_a é a deformação trativa circunferencial, e_b é a contração na superfície inferior do material e h é a espessura. Sendo assim, a equação demonstra que a deformação convencional que ocorre na superfície interna e externa, caso seja desconsiderada a variação na espessura e considerada a permanência da linha neutra sob a fibra central, é dada por $e_a = -e_b$ (DIETER, 1981).

Dieter (1981) afirma ainda que por meio de análises experimentais percebeu-se que para grandes valores da razão h/R , a deformação circunferencial na superfície de tração é maior do que aquela calculada na equação 1, em contrapartida, a deformação na superfície de contração não difere do valor expresso pela mesma equação.

Os esforços aplicados nessa operação promovem um estado de tensões capaz de causar fissuramento na parte externa da peça. A eventual fratura é consequência da superação do limite de resistência do material pelas forças trativas atuantes, como afirmado anteriormente (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

Diante desse cenário, no processo de conformação, o raio de curvatura assume um valor mínimo para que não ocorra trinca na superfície externa, de modo que essa variável é expressa geralmente em múltiplos da espessura da chapa. Dessa forma, o raio mínimo de dobramento é um limite de conformação, que varia de acordo com o material utilizado e sempre aumenta com a prévia deformação a frio do metal. Com o objetivo de evitar danos no cutelo ou na matriz, o raio de curvatura usualmente aplicado é inferior a $1/32$, mesmo que, alguns materiais muito dúcteis apresentem o raio de curvatura mínimo igual à zero indicando que podem ser achatados sobre si mesmos (DIETER, 1981).

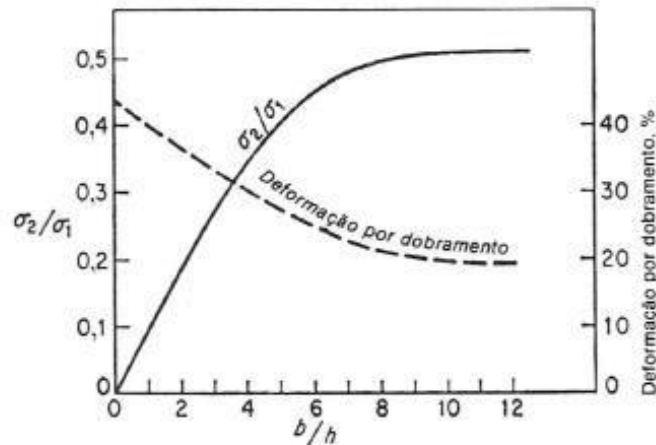
Dieter (1981) ainda considera que:

A ductilidade da fibra externa no dobramento é função do estado de tensões que atua na superfície. O fato de um estado biaxial de tração diminuir a ductilidade do metal está bem definido. A razão de biaxialidade σ_2/σ_1 , entre tensão transversal e a tensão circunferencial, aumenta com o aumento da relação da largura para a espessura, b/h . A Figura 10 indica que para valores pequenos de b/h a biaxialidade é baixa porque o estado de tensões é praticamente tração pura. No entanto, à medida que a largura da chapa aumenta em relação à sua espessura, a razão σ_2/σ_1 aumenta até que, em torno de $b/h = 8$, a biaxialidade atinge um valor de saturação aproximadamente igual à $1/2$. Correspondentemente, a deformação necessária para produzir fratura no dobramento é uma função inversa da relação largura-espessura. (DIETER, 1981).

Um ponto relevante está relacionado à não ocorrência do dobramento de forma linear e à não planicidade da chapa a ser conformada. Caso o dobramento se enquadre em algumas dessas situações, deformações plásticas irão ocorrer na dobra e nas juntas das chapas (MARCINIAK;

et al., 2002).

Figura 10 – Efeito da relação entre largura e espessura na razão de biaxialidade e na ductilidade em dobramento.



Fonte: Dieter, 1981, p.582.

A força P_b necessária no processo de dobramento para conformar uma peça de comprimento L , de raio R sob um ângulo α de dobramento, pode ser calculada por meio da Equação 2, em que σ_0 é a tensão limite de escoamento determinada no ensaio de tração e h é a espessura (DIETER, 1981):

$$P_b = \frac{\sigma_0 L h^2}{2(R + \frac{h}{2})} \tan \frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

No dobramento, dois pontos são de extrema importância para o controle do processo: a possibilidade de ruptura e controle da forma final. Para a ruptura considera-se importante manter o controle sobre o raio de curvatura e a ductilidade do material, enquanto que para o controle sobre a forma final tem-se que estar atento ao retorno elástico, que irá depender da propriedade elástica de cada material e dos estados de tensão e deformação gerados durante essa operação (MAEDA, 2009).

3.3.2. Retorno elástico no dobramento

O retorno elástico ou efeito mola e a ocorrência de trincas na superfície sob tração são fenômenos decorrentes da operação de dobramento que podem ser considerados um empecilho

para o processo de conformação. O retorno elástico é denominado como a variação dimensional da peça deformada decorrente da retirada dos esforços impostos pela ferramenta. Quando o esforço é retirado, ocorre variações na deformação, ou seja, a deformação total é reduzida, devido a recuperação elástica (DIETER,1981).

Esse fenômeno depende além do comportamento de deformação elástica e plástica do material, da espessura e largura da chapa e da geometria da ferramenta utilizada na operação. O encruamento decorrente da formação dos metais também tem uma grande influência na relação de recuperação elástica (GUSEL, 2011). Outros aspectos relacionados ao material que também desempenham um importante papel no efeito mola é a anisotropia e efeito Bauschinger (OLIVEIRA et al., 2007).

Dieter (1981) considera que o efeito mola será maior quanto maior for o limite de escoamento, menor o módulo elástico e maior a deformação plástica. Esse fenômeno também é dependente da razão entre as dimensões laterais da chapa e sua espessura. Tekaslan et al. (2006) acrescenta que parâmetros do processo como temperatura, força aplicada e o tempo que ela permanece aplicada sobre o material também influenciam no retorno elástico. Esse fenômeno aumenta com o aumento do raio do cutelo utilizado, com a distância das faces opostas da matriz e com a relação R/h (TEKASLAN et al., 2006).

Os fatores de influência mais estudados em relação ao retorno elástico estão associados ao processo, tais como características geométricas da operação, atrito e condições de lubrificação. No entanto, as características estruturais dos materiais, tais como tamanho de grão, arranjo microestrutural, possibilidade da ocorrência de mudanças de fase também podem influenciar a ocorrência desse fenômeno (SALES, 2013).

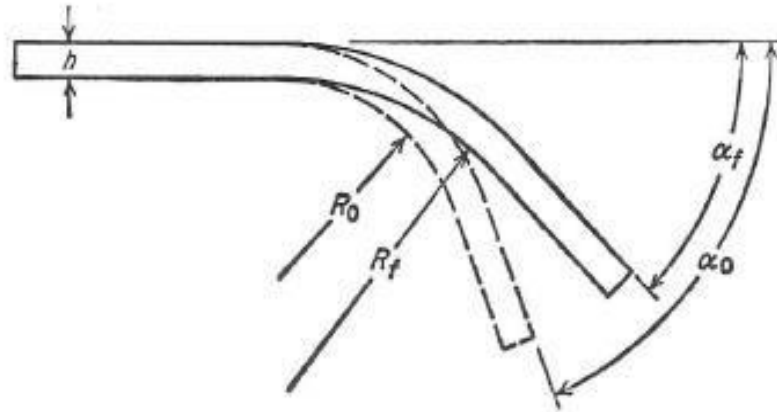
Por fim, o efeito mola pode ser calculado como a razão entre o ângulo de dobramento depois (α_f) e antes (α_0) da retirada da carga como mostrado pela Equação 3 (DIETER, 1981).

$$K = \frac{\alpha_0}{\alpha_f} = \frac{R_0 + h/2}{R_f + h/2} \quad (3)$$

Em que R_0 é o raio de curvatura antes da liberação da carga e R_f é o raio de curvatura após a liberação da carga. Dessa forma R_0 é menor que R_f e o efeito mola nessa equação depende

apenas da razão entre raio de curvatura e espessura. Essas variáveis estão explicitadas na Figura 11.

Figura 11 – Efeito de mola no dobramento



Fonte: Dieter, 1981, p.582.

Outra maneira para se calcular o efeito mola no dobramento está mostrada na Equação 4, na qual fica evidente que quanto maior for a razão R/h e o limite de escoamento (L_e), e menor o módulo de elasticidade (E), maior será o efeito mola (TEKINER, 2004).

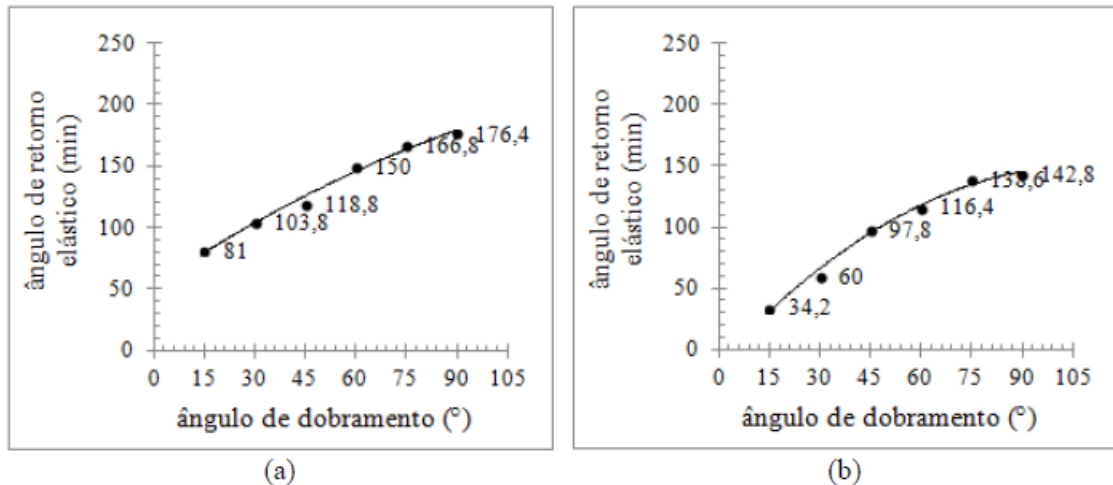
$$\frac{R_0}{R_f} = 4 \left(\frac{R_0 L_e}{Eh} \right)^3 - 3 \frac{R_0 L_e}{Eh} + 1 \quad (4)$$

Um exemplo de trabalho em que foi observado o fenômeno de recuperação elástica está ilustrado na Figura 12. Nesse caso, foi avaliados fatores de influência, tais como o efeito de diferentes ângulos de dobramento (15° , 30° , 45° , 60° , 75° e 90°) e diferentes espessuras (0,5 mm e 1 mm) em chapas de aço com baixo teor de carbono. Como resultado, percebe-se que, o aumento no ângulo de dobramento proporciona à elevação no ângulo de retorno elástico e o aumento da espessura proporciona a redução desse efeito (TEKINER, 2004).

Para compensar o efeito mola, o método mais comumente usado é dobrar a peça até um raio de curvatura menor do que o desejado, de maneira que se atinja o raio adequado com a variação de dimensão provocada pelo efeito mola (BRESCIANI FILHO et al., 2011). Outro método utilizado para minimizar os efeitos desse fenômeno é o aumento do período de aplicação das

cargas durante o dobramento (TEKASLAN et al., 2006).

Figura 12 – Efeito do ângulo de dobramento e espessura no retorno elástico de chapas com baixo teor de carbono.



(a) Chapa de 0,5 mm de espessura; (b) Chapa de 1 mm de espessura.
Fonte: Sales, 2013, p.50.

De acordo com Dieter (1981), o perfil da matriz adequado para corrigir os efeitos da recuperação elástica pode ser calculado por meio da utilização da Equação 4, que se refere ao método das tentativas. No entanto, este cálculo não tem resultados muito precisos e é válido somente para valores de limites de escoamento muito pequenos.

Bresciani Filho et al. (2011) afirmam ainda que durante as operações de conformação, a aplicação de uma intensidade de dobramento maior, ou seja, a adoção de um ângulo de dobramento maior é uma maneira usual para compensar a recuperação elástica.

Para tanto, existem outros métodos de correção do efeito de mola tais como a realização do processo de conformação a elevadas temperaturas e a técnica de calcar o cutelo no fundo da matriz. Essas medidas visam, respectivamente, diminuir o limite de escoamento e redistribuir o estado de tensões na peça (DIETER, 1981).

A utilização dos programas de análise de retorno elástico por elementos finitos é uma técnica mais recente para prever esse fenômeno. Esses programas baseiam-se em informações das propriedades mecânicas dos materiais e podem auxiliar no projeto do sistema de dobramento

antes da operação. Dessa forma, é evidenciado a importância da medida da quantidade de recuperação elástica nos processos de conformação de chapas metálicas na indústria para que o resultado final seja alcançado de forma satisfatória, com maior confiabilidade, evitando problemas de qualidade do produto, como rupturas e enrugamentos, além da dificuldade na montagem do material (MAGALHÃES, 2015).

3.3.3. *Ensaio de Dobramento em V*

O ensaio de dobramento, como um caso particular do ensaio de flexão, consiste basicamente na aplicação de esforços sob determinado material de geometria definida com o intuito de obter um gráfico de carga versus deformação máxima. Os resultados mais observados por meio desse ensaio são módulo de ruptura na flexão, módulo de elasticidade, módulo de resiliência e módulo de tenacidade (GARCIA et al., 2000). Esse ensaio também fornece uma indicação qualitativa da ductilidade do material (SOUZA, 1982).

O corpo de prova para o ensaio pode ser obtido de um produto acabado ou, no caso de possuir dimensões adequadas, pode ser o próprio produto. Especificamente para chapas, é necessário a obtenção de corpo de prova de tamanho adequado por meio da retirada de partes do produto acabado (SOUZA, 1982).

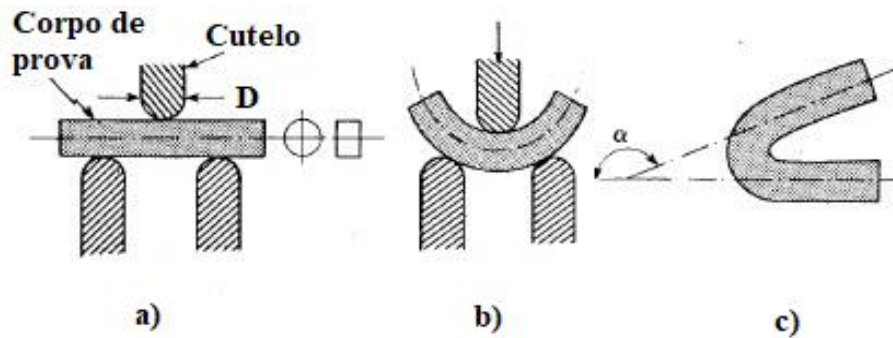
Segundo Souza (1982) durante esse ensaio o corpo de prova, que está apoiado em suportes calculadamente distanciados entre si, é dobrado por intermédio de um cutelo, capaz de flexionar o centro do corpo de prova até que este atinja um ângulo de dobramento especificado α , usualmente 90° , 120° ou 180° . O diâmetro D do cutelo varia de acordo com as dimensões do corpo de prova e da severidade do ensaio. O ensaio é ilustrado nas Figuras 13a e 13b e a medição do ângulo é realizada conforme mostrado na Figura 13c.

Esse ensaio termina quando o ângulo especificado é atingido, e a primeira análise é realizada à olho nu para verificar a presença de trincas, fissuras ou fendas na área tracionada do corpo. Caso o material apresente esses defeitos ou se rompa antes que o ensaio termine, o corpo de prova não atende à especificação do ensaio. Esse tipo de dobramento geralmente é o mais utilizado na prática e pode ser denominado de dobramento guiado (SOUZA, 1982).

Parâmetros como temperatura, velocidade de aplicação da carga, defeitos superficiais,

características microscópicas e geometria da seção transversal da amostra podem influenciar nos resultados obtidos pelo ensaio de dobramento (GARCIA et al., 2000).

Figura 13 – Esquema geral do ensaio de dobramento.



(a) e (b) Esquema do ensaio de dobramento; (c) Corpo de prova dobrado até um ângulo α .
 Fonte: Souza, 1982, p.138.

Garcia e colaboradores (2000) afirmam ainda que o corpo de prova é submetido a esforços normais e tangenciais na seção transversal durante o ensaio, o que provoca um complexo estado de tensões no seu interior. Para a simplificação desse estado, considera-se que:

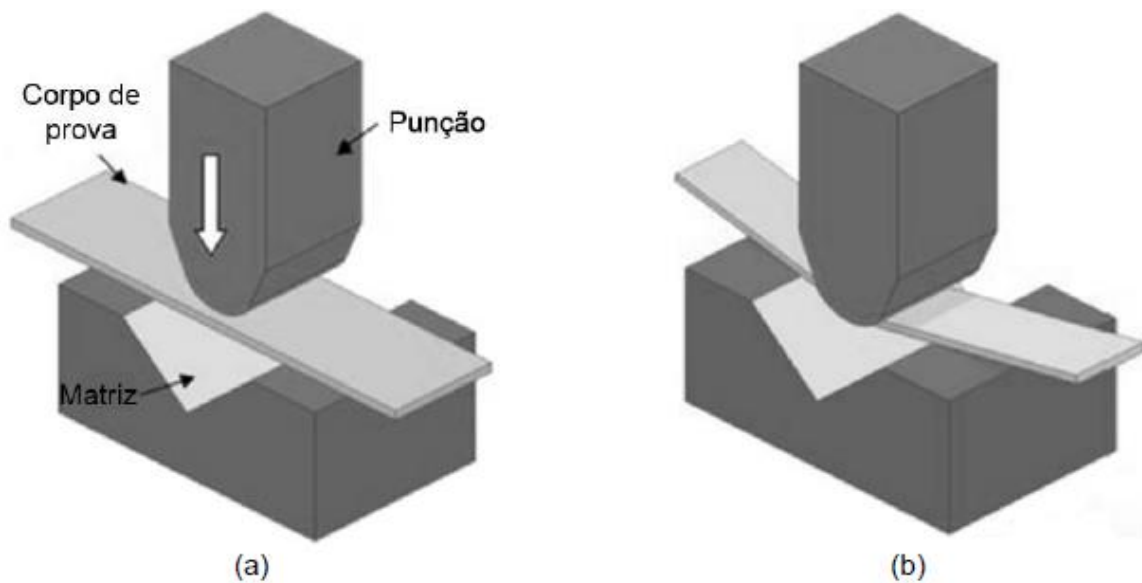
- O corpo de prova seja inicialmente retilíneo;
- O material seja homogêneo e isotrópico;
- A lei de Hooke é válida para materiais elásticos;
- As seções planas permanecem planas – Lei Bernoulli;
- A linha neutra existe;
- A distribuição linear da tensão normal ocorra na seção transversal, com a máxima compressão na superfície interna do corpo de prova e a máxima tração na superfície externa.

O processo de dobramento assume duas variantes chamadas de dobramento livre e dobramento semi guiado, em que na primeira ocorre a aplicação de esforços nas extremidades do material sem que seja atingida a zona tracionada, na segunda uma extremidade é fixada e o dobramento ocorre na outra (SOUZA, 1982).

Nesse trabalho, foi realizado o ensaio de dobramento guiado em V, que tem início quando um corpo de prova é apoiado em uma matriz com abertura de um ângulo. Em seguida, o processo de compressão ocorre com o deslocamento do cutelo na direção do corpo de prova até que a chapa entre em contato com os lados da cavidade interna da matriz e atinja o ângulo especificado. Nesse estágio do ensaio, a curvatura da chapa tende a ser igual ao raio do cutelo (MAGALHÃES, 2015).

Na Figura 14 está representado o esquema do ensaio de dobramento.

Figura 14 – Processo de dobramento guiado em V.



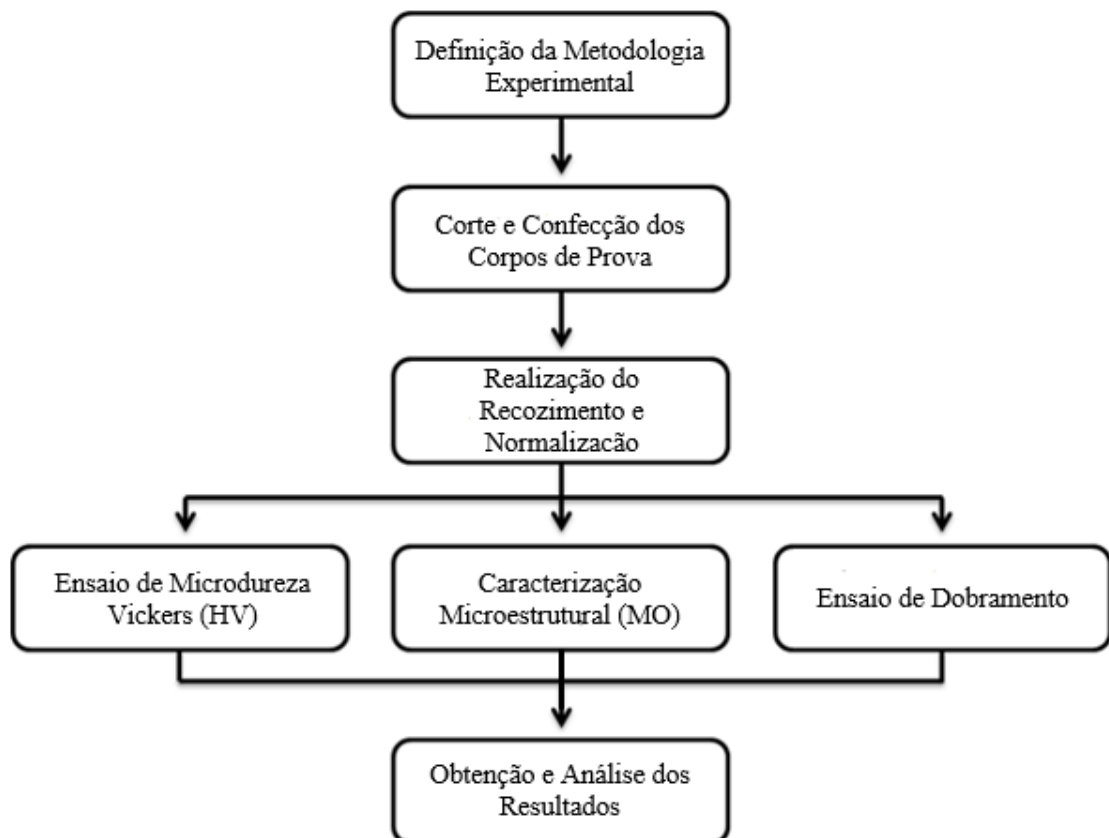
(a) Estágio inicial do dobramento (b) Dobramento em andamento
Fonte: Magalhães, 2015, p.46.

No dobramento, a velocidade do ensaio não é considerada um fator importante uma vez que o ensaio não seja realizado sob velocidades extremamente altas que o caracterize como ensaio dinâmico (SOUZA, 1982).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O foco principal deste trabalho foi avaliar o comportamento do fenômeno de recuperação elástica no dobramento por meio da variação do ângulo e do raio do cutelo aplicados ao ensaio. Também foi avaliada a influência das características microestruturais do aço SAE 1010 submetido aos tratamentos térmicos de normalização e recozimento nesse processo de conformação mecânica. A seguir, no fluxograma representado pela Figura 15, são apresentadas, de forma esquemática, as etapas de desenvolvimento do trabalho.

Figura 15 – Etapas de desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Próprio autor.

Primeiramente, a determinação da metodologia experimental foi conduzida por meio da escolha dos parâmetros dos tratamentos térmicos de recozimento e normalização que seriam realizados com o intuito de obter formação de três tamanhos de grãos diferentes. Em seguida, determino u-se as análises que seriam executadas para a caracterização do material após o tratamento térmico de acordo com as principais alterações microestruturais e de propriedades mecânicas esperadas para o aço utilizado.

Após a realização dos tratamentos térmicos de normalização e recozimento, empregando dois tempos de encharque para esse último, foi dado início a avaliação microestrutural dos corpos de prova com a análise qualitativa das imagens obtidas por microscopia óptica (MO) e em seguida realizou-se o ensaio de microdureza Vickers (HV).

Após a análise por MO percebeu-se que as amostras recozidas com tempos diferentes de encharque não apresentaram diferença expressiva quanto ao tamanho de grão, portanto, foi selecionada apenas uma das amostras recozidas para dar continuidade ao trabalho. Essa escolha teve como objetivo minimizar os efeitos da intensa oxidação presente na amostra recozida com maior tempo de encharque.

Por fim, tendo atingido as três microestruturas distintas, com tamanhos de grãos diferentes como foi proposto no início da metodologia, cortou-se as chapas no tamanho especificado para a realização do dobramento, procedeu-se com os mesmos tratamentos térmicos e em seguida foi realizado o ensaio de dobramento a partir de três condições distintas de ângulo e cinco tamanhos diferentes de raio do cutelo, com intuito de avaliar o retorno elástico em aços com baixo teor de carbono.

4.1. Material

O material utilizado para realização deste trabalho foi o aço SAE 1010. A amostra foi adquirida comercialmente na forma de chapas quadradas com 2 mm de espessura e 1200 mm de largura. A composição química do material no estado como adquirido foi informada pelo fornecedor e está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do aço SAE 1010

Elemento	C	Si	Mn	P	Al	Cr
% em peso	0,10	0,011	0,406	0,011	0,026	0,012

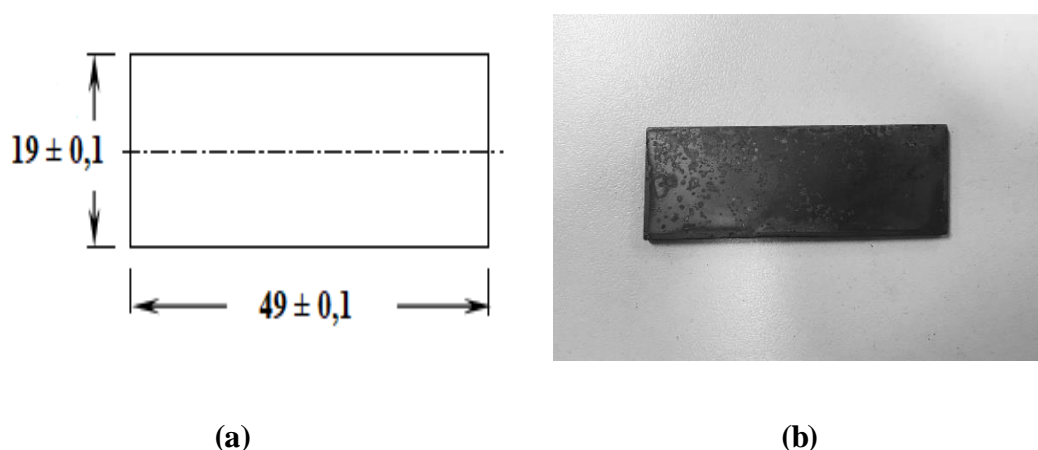
Fonte: Arcelormittal, 2014.

Inicialmente, foram preparadas amostras para análise metalográfica e testes de microdureza. Nesse caso, foram empregadas amostras com aproximadamente 10 mm x 10 mm x 2 mm. No total, doze amostras foram preparadas para atender as quatro condições de análise propostas no trabalho (estado inicial, normalização, recozimento com tempo de encharque de 30 min e

recozimento com tempo de encharque de 180 min), de forma que para cada condição foram produzidas três amostras. Portanto, a cada três dessas amostras destinadas à uma condição, duas foram conduzidas à análise metalográfica e uma ao ensaio de dureza.

Os corpos de prova foram produzidos a partir da chapa original com dimensões definidas de acordo com o procedimento de dobramento que foi realizado. As amostras tinham dimensões aproximadas de 49 mm de comprimento por 19 mm de largura e 2 mm de espessura, conforme mostrado pelo desenho esquemático na Figura 16. Essas medidas foram estabelecidas de modo que as amostras atendessem as especificações do aparato de apoio utilizado durante o dobramento.

Figura 16 – Corpo de prova empregado nos experimentos de dobramento.



(a) Desenho esquemático do corpo de prova, com as medidas representadas em mm; (b) Imagem real do corpo de prova.

Fonte: Próprio autor.

Os cortes dos corpos de prova foram executados na guilhotina da marca Newton modelo TM 10, mostrada na Figura 17. Foram confeccionados sessenta corpos de prova para atender aos parâmetros definidos para o dobramento: as duas condições de tratamento térmico selecionadas (normalização e recozimento com tempo de encharque de 30 min), três ângulos de dobramento, 30°, 60° e 90° e cinco raios diferentes do cutelo, sendo eles de 2, 4, 6, 8, 10 mm. O corte foi realizado na mesma direção do sentido de laminação, para garantir a obtenção uma resistência mecânica adequada para as amostras.

Figura 17 - Guilhotina da marca Newton modelo TM 10



Fonte: Próprio autor

4.2. Tratamentos Térmicos: Recozimento e Normalização

Os tratamentos térmicos realizados nesse trabalho foram recozimento e normalização. Dessa forma, condições diferentes de operação foram estabelecidas, envolvendo um valor de temperatura, três tempos de encharque e dois tipos distintos de resfriamento, ao forno e ao ar, para recozimento e normalização, respectivamente. Esses tratamentos foram realizados em um forno elétrico da marca Magnus, o qual continha um sistema de controle digital de temperatura conforme é mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Forno elétrico da marca Magnus utilizado nos tratamentos térmicos.



Fonte: Próprio autor.

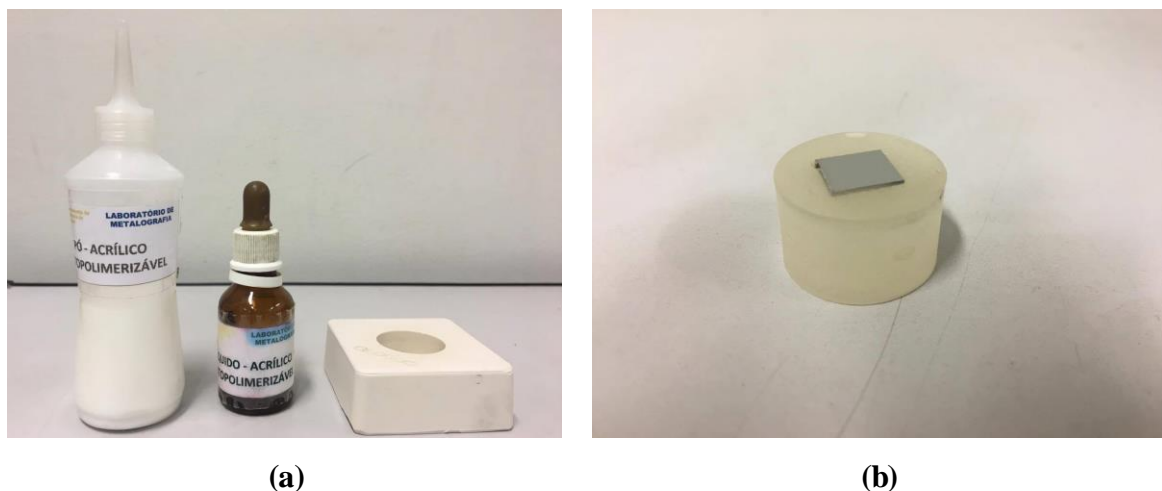
A temperatura escolhida foi 900°C visando a austenitização do aço SAE 1010 e consequente homogeneização da microestrutura. Os tempos de encharque utilizados no processo foram 10, 30 e 180 minutos, para os quais o resfriamento se deu ao ar para o primeiro e ao forno para dois últimos tempos citados. Essa variação foi estabelecida com o intuito de obter a formação de três microestruturas distintas em relação ao tamanho de grão formado para avaliar sua influência no retorno elástico.

4.3. Caracterização Microestrutural

4.3.1. Preparação metalográfica

A análise microestrutural dos materiais, no estado inicial e após os tratamentos térmicos, foi executada de maneira qualitativa. Para viabilizar essa análise, inicialmente foi realizada a preparação metalográfica de modo convencional, onde as amostras que foram cortadas em tamanhos de 10 mm por 10 mm, foram também embutidas, lixadas, polidas e por fim realizou-se o ataque com reagente químico. O embutimento foi executado à frio com resina acrílica autopolimerizável. Na Figura 19 estão ilustrados os materiais utilizados no embutimento a frio bem como uma das amostras embutida.

Figura 19 – Esquema geral do embutimento à frio.



(a) Material utilizado no embutimento à frio; (b) Representação de uma das amostras embutidas.
Fonte: Próprio autor.

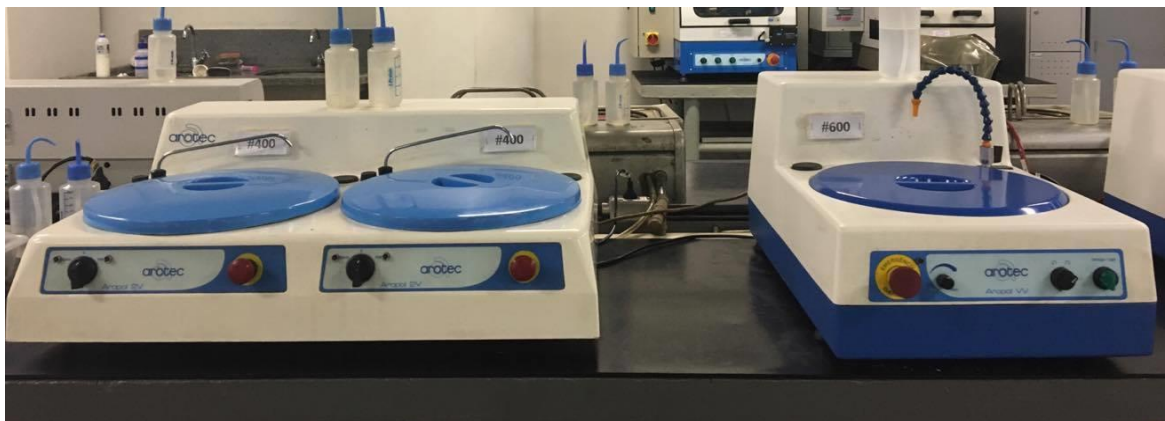
Em seguida, o lixamento das amostras foi realizado em lixadeiras semiautomáticas da marca Arotec e modelo Aropol 2V, conforme mostrado na Figura 20. Utilizou-se lixas d'água de granulometrias distintas e água como fluido refrigerante, de maneira que a sequencia das lixas

nas quais as amostras foram preparadas foi #240, #320, #400, #600 e #1200. Para limpeza das amostras durante a troca da utilização das lixas foi necessário lavá-las com água. Para limpeza final, utilizou-se detergente, em seguida o álcool e por último foi realizada a secagem da amostra.

Por fim, as amostras foram polidas em politrizes da marca Panambra/Struers modelo DP-10 e Arotec modelo Aropol 2V, utilizando-se pasta de diamante de $3\mu\text{m}$ e $9\mu\text{m}$ como material abrasivo e álcool etílico para lubrificação. As politrizes são mostradas na Figura 21.

Após o polimento, as amostras foram atacadas através do método de imersão com o reagente Nital 3% (composição de 97 ml de álcool etílico para 3 ml de ácido nítrico concentrado). O Nital foi utilizado para a revelação dos contornos de grão.

Figura 20 – Lixadeiras semiautomáticas da marca Arotec, modelo Aropol 2V.



Fonte: Próprio autor.

Figura 21 – Politrizes da marca Arotec modelo Aropol 2V e Panambra/Struers modelo DP-10.

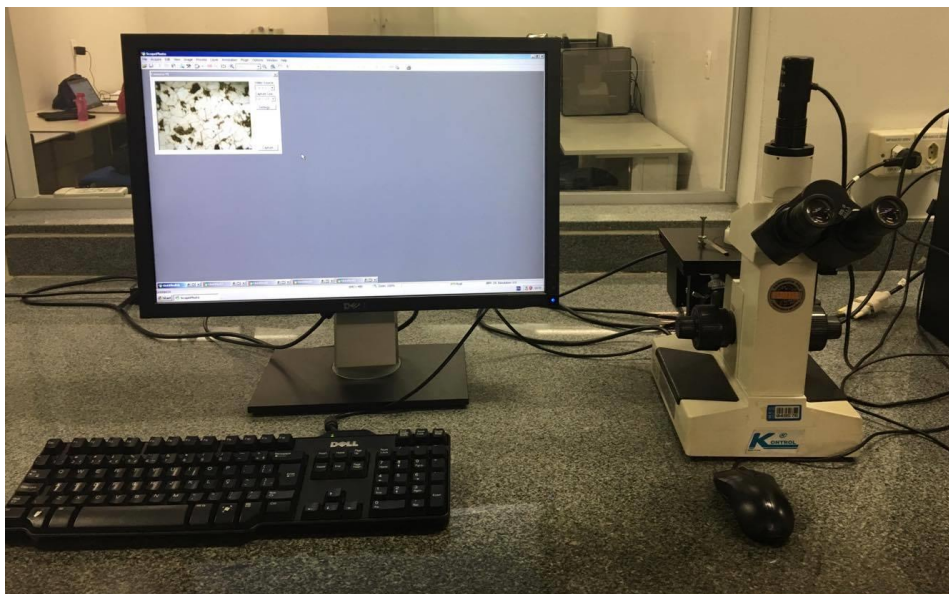


Fonte: Próprio autor.

4.3.2. *Microscopia óptica*

Após a preparação metalográfica descrita, essas amostras foram analisadas por microscopia óptica no microscópio Kontrol modelo IM713 e suas imagens foram capturadas por meio da câmera MDCE-5A USB 2.0 acoplada ao equipamento. No software Scope Photo foi possível a visualização das imagens nas resoluções estabelecidas de 200x e 400x. Os equipamentos podem ser visualizados por meio da Figura 22.

Figura 22 - Equipamentos utilizados na microscopia óptica.



Fonte: Próprio autor.

4.4. Ensaio de Microdureza

O ensaio de microdureza foi realizado em um microdurômetro da marca Shimadzu modelo 2T, com penetrador Vickers, empregando carga de 1kgf e tempo de aplicação de 15s. A carga foi criteriosamente escolhida para que pudesse obter valores de dureza do material como um todo e não apenas da parte interna do grão. O equipamento está ilustrado na Figura 23.

Para esse ensaio, as amostras foram preparadas por meio do mesmo processo utilizado na microscopia óptica, por meio de embutimento, lixamento, polimento e ataque químico. Foram realizadas 10 medidas para cada amostra, o que possibilitou o cálculo da média e desvio padrão desses valores.

Figura 23 – Microdurômetro da marca Shimadzu, modelo 2T.



Fonte: Próprio autor.

4.5. Ensaio de dobramento

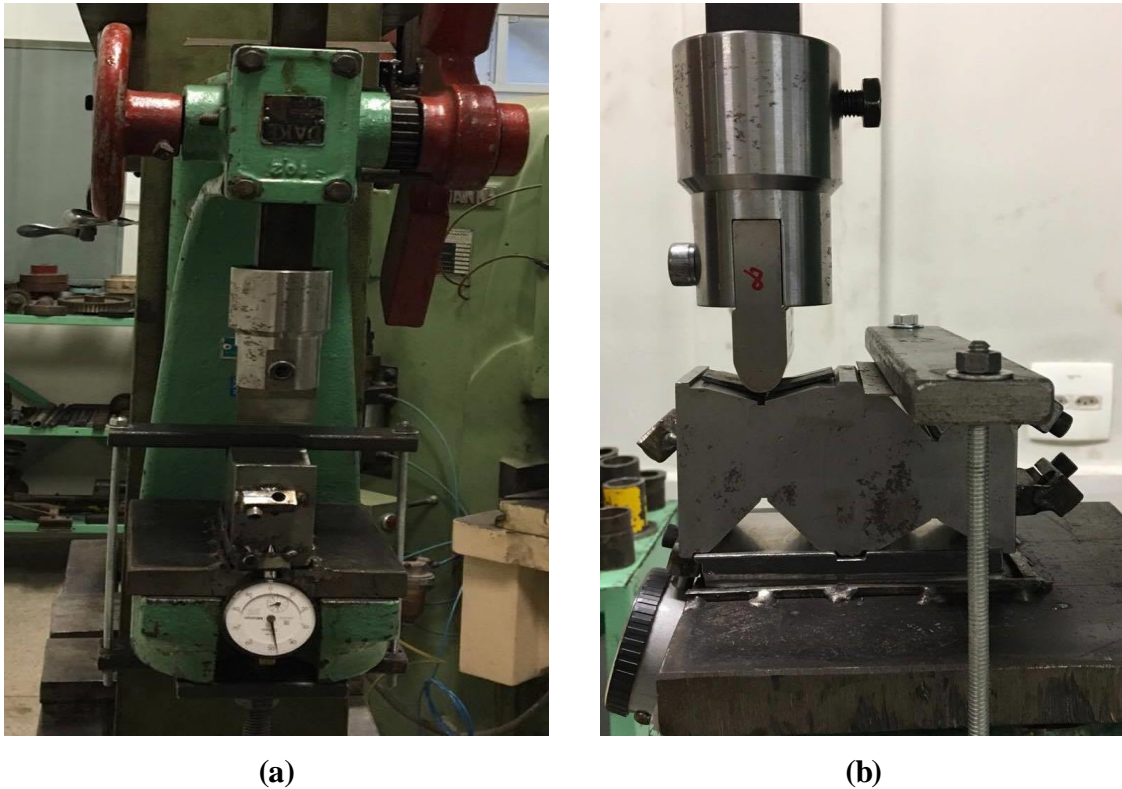
Para o ensaio de dobramento em V foi utilizado uma matriz contendo ângulos de 30°, 60° e 90° acoplada a uma prensa manual da marca Dake Engine Modelo 1-3/4, com capacidade de 3 Ton (29,4 kN), conforme mostrado na Figura 24. Para realização desse teste também foram utilizados um suporte para o cutelo, cutelos de raios distintos e um relógio comparador.

A metodologia do ensaio foi baseada no contato dos corpos de prova com a superfície interna das regiões em V da matriz. Após esse contato aguardava-se 10s e então era realizado o alívio dos esforços aplicados. Junto a todo esse equipamento encaixava-se um relógio comparador analógico Mitutoyo Modelo 2046F para garantir a mesma condição de deformação durante os dobramentos, com maior precisão dos níveis de esforços aplicados. Quando os esforços eram retirados, o material era removido da matriz para posterior análise.

Nesse trabalho, durante o ensaio de dobramento, os parâmetros foram alternados conforme mostrado na Tabela 2.

Na Figura 25 estão representados os cutelos e seus respectivos raios e na Figura 26 estão representados os corpos de prova já dobrados nos ângulos de 30°, 60° e 90°.

Figura 24– Equipamentos utilizados para realização do ensaio de dobramento



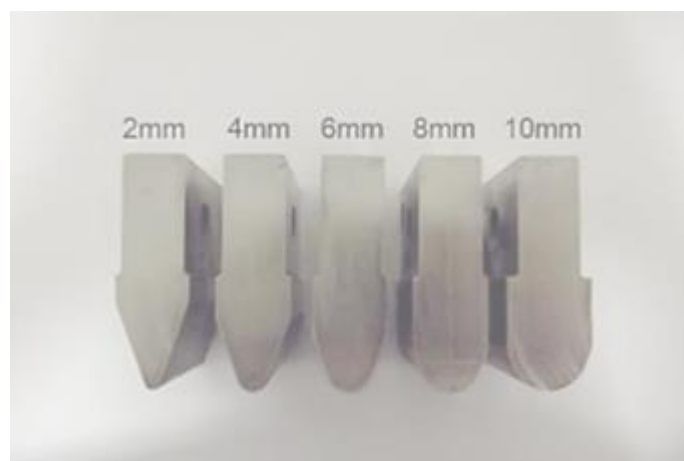
(a) Representação dos equipamentos utilizados no ensaio de dobramento; (b) Demonstração do dobramento de uma chapa na matriz com ângulo de 30° e raio do cutelo igual à 8 mm.
 Fonte: Próprio autor.

Tabela 2 – Condições gerais observadas no ensaio de dobramento.

Ângulo de dobramento	Raio de dobramento	Tamanho de grão
30°, 60° e 90°	2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm e 10 mm	2 tamanhos de grão diferentes

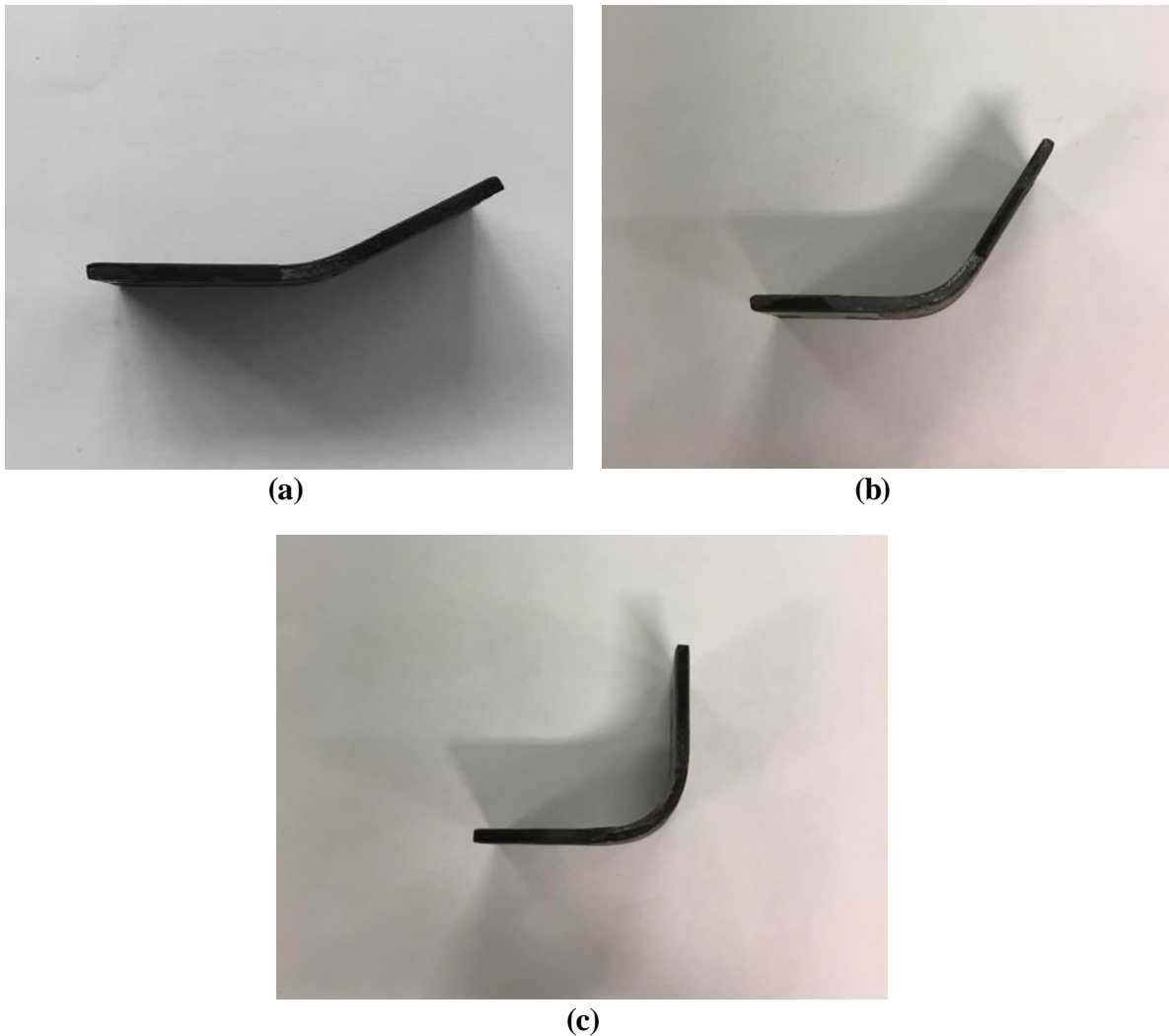
Fonte: Próprio autor

Figura 25 – Cutelos de raios distintos.



Fonte: Magalhães, 2015, p. 76.

Figura 26 – Imagens de corpos de prova do aço SAE 1010 normalizado dobrados.



(a) Dobramento em ângulo de 30°; (b) Dobramento com ângulo de 60°; (c) Dobramento com ângulo de 90°. Fonte: Próprio autor.

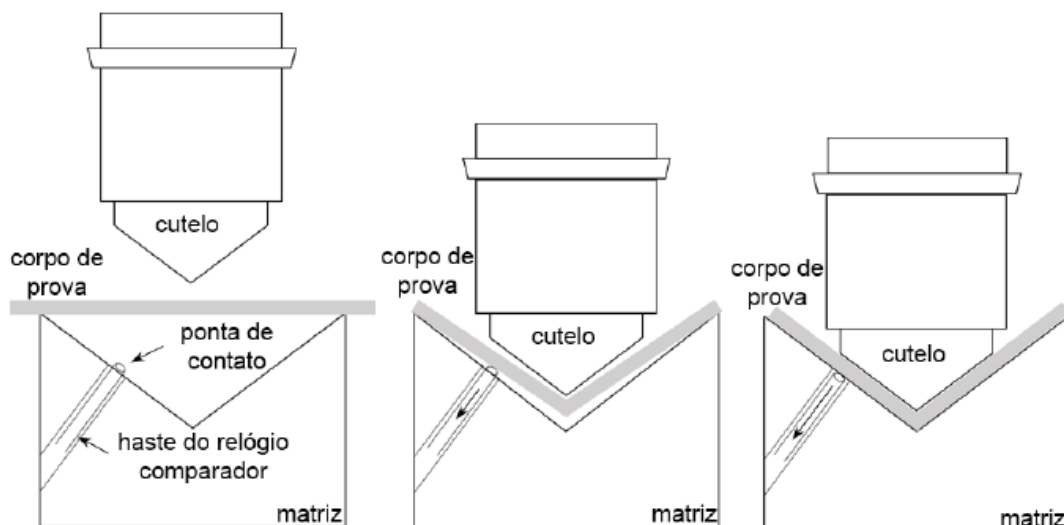
Foram dobrados 60 corpos de prova, uma vez que a análise envolveu trinta condições de ensaio, como resultado do emprego de três ângulos, cinco raios do cutelo e dois tamanhos de grão. Esses últimos foram selecionados criteriosamente visando minimizar os efeitos de oxidação intensa presente no tratamento térmico com maior tempo de encharque. Para cada situação, dois corpos de prova foram submetidos ao dobramento.

Na Figura 27 está detalhado o processo de dobramento realizado nesse trabalho, em que primeiramente, o corpo de prova foi apoiado sobre a matriz em V e o cutelo foi deslocado na direção desse sistema a fim de iniciar a deformação. Em consequência do deslocamento, o corpo de prova entrou em contato com a ponta do dispositivo de medição, causando o deslocamento da haste do relógio comparador até que fosse estabelecido o contato completo entre o corpo de

prova e a matriz. Nesse estágio, foi realizada a leitura do relógio comparador ao mesmo tempo que iniciou-se a contagem do tempo.

Após aguardar em média 10s, os esforços foram removidos. Esse mesmo procedimento foi realizado para as outras amostras submetidas a mesma condição de tratamento até que fosse atingida a medição final estipulada no relógio comparador.

Figura 27 – Etapas do processo de dobramento.



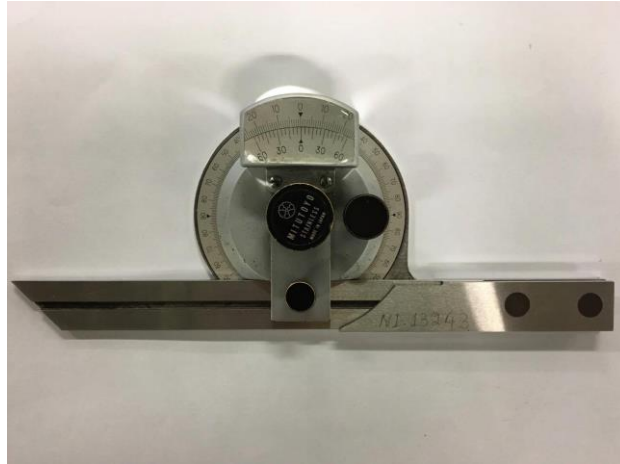
Fonte: Magalhães, 2015, p.78.

4.6. Análise do retorno elástico no aço SAE 1010

O retorno elástico foi avaliado de acordo com o ângulo obtido após cada experimento, de forma que ele foi calculado a partir da diferença entre o ângulo de dobramento utilizado (30°, 60° e 90°) e o ângulo final obtido.

Esses ângulos finais de dobramento dos corpos de prova submetidos a diferentes tratamentos foram medidos empregando um goniômetro da marca Mitutoyo, conforme mostrado na Figura 28. Foram conduzidas medições nos dois corpos de prova de cada condição estabelecida, de forma que o ângulo final foi determinado por meio da média dos dois valores de cada uma dessas medições.

Figura 28 – Goniômetro da marca Mitutoyo.



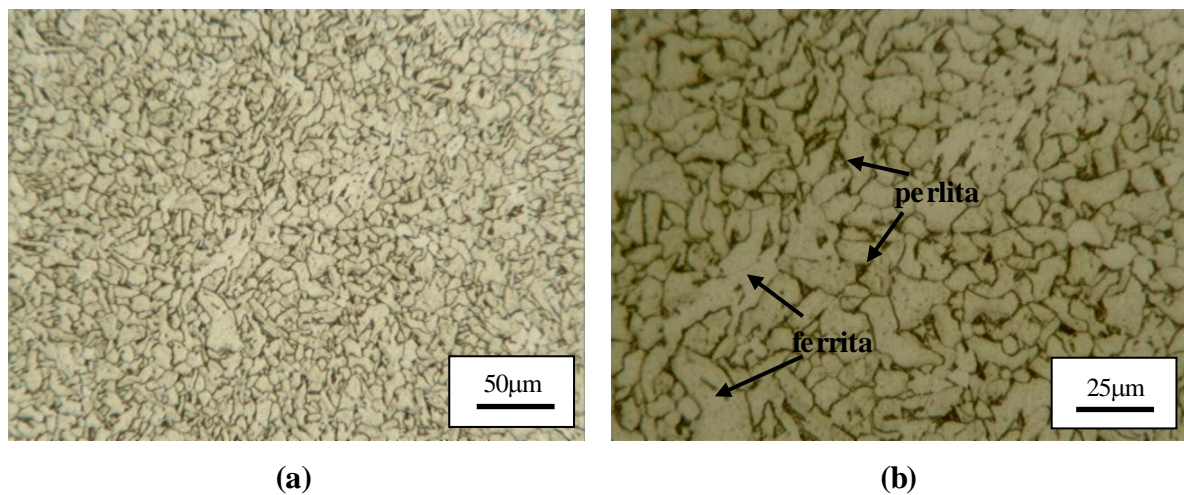
Fonte: Próprio autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização do Aço SAE 1010 no Estado Inicial

Os resultados relacionados à caracterização microestrutural do aço SAE 1010 no estado inicial estão apresentados na Figura 29. Para obtenção desses resultados foram utilizadas técnicas de metalografia conforme explicado anteriormente.

Figura 29 – Imagens obtidas por microscopia óptica do Aço SAE 1010 no Estado Inicial, como adquirido.



(a) e (b) Ampliações distintas.
Fonte: Próprio autor.

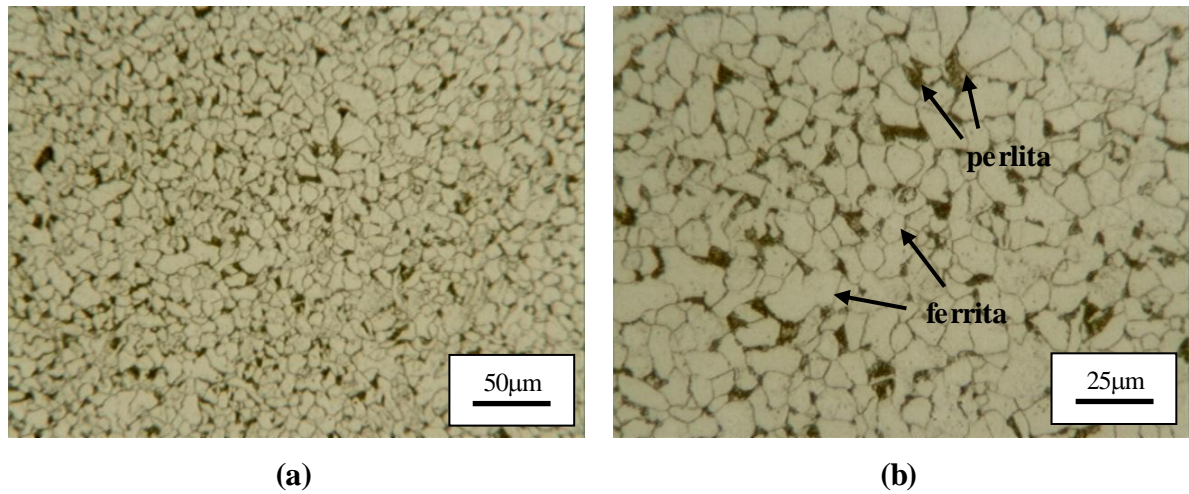
Elas refletem a microestrutura do aço SAE 1010 conforme esperado, de modo que há uma presença maior de ferrita em relação à perlita (PONTES, 2013).

5.2. Caracterização do Aço SAE 1010 Após Processamentos Térmicos

Após os tratamentos térmicos realizados, assumindo uma temperatura de 900°C, três tempos de encharque e dois tipos de resfriamento foram obtidas microestruturas com a presença de grãos de ferrita e perlita. No entanto, a diferença entre as imagens se deu pelo tamanho dos grãos formados em cada tipo de processamento, conforme será mostrado a seguir.

No processo de normalização, em que foi considerado um tempo de encharque de 10 minutos e o resfriamento se deu ao ar, obteve-se a microestrutura mostrada na imagem da Figura 30.

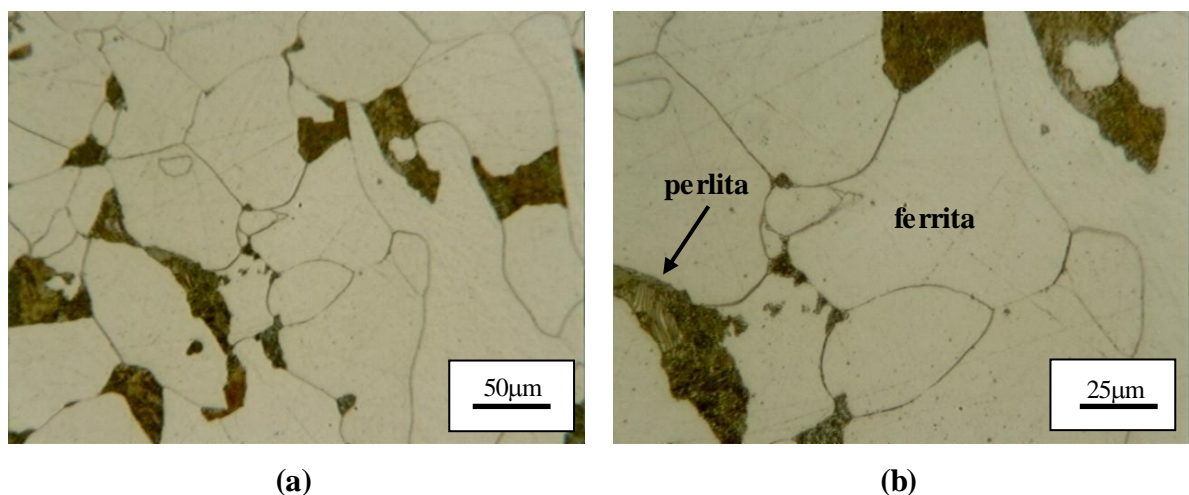
Figura 30 – Imagens obtidas por microscopia óptica do aço SAE 1010 tratado termicamente por normalização.



(a) e (b) Ampliações distintas.
Fonte: Próprio autor.

Na primeira condição de recozimento, foi utilizado um tempo de encharque de 30 minutos e o resfriamento se deu no forno. Nesse caso, as imagens da microestrutura obtida estão apresentadas na Figura 31.

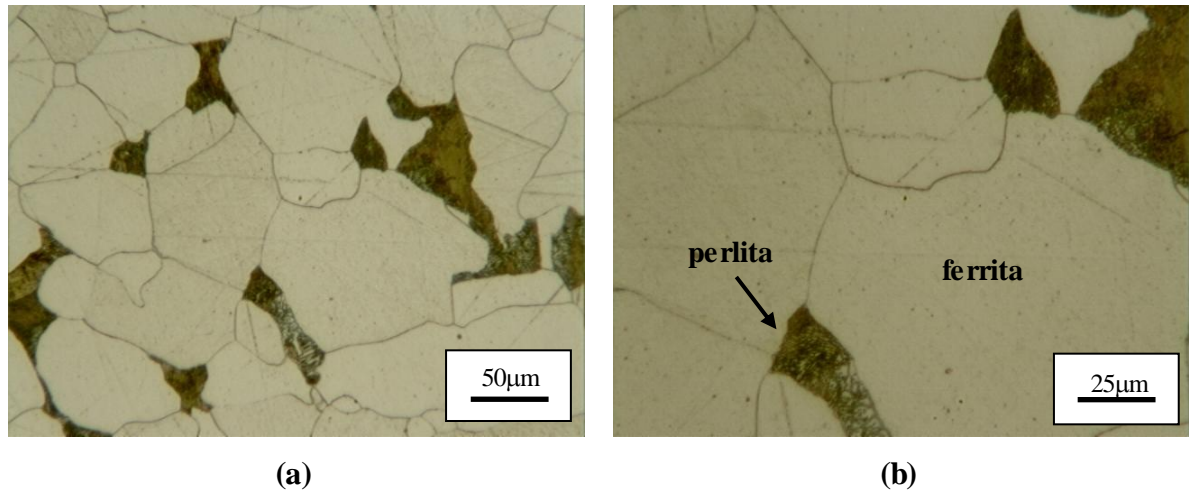
Figura 31 – Imagens obtidas por microscopia óptica do aço SAE 1010 tratado termicamente por recozimento_30 mim de encharque (Primeira condição).



(a) e (b) Ampliações distintas.
Fonte: Próprio autor.

Na segunda condição de recozimento, foi utilizado um tempo de encharque de 180 minutos e o resfriamento também se deu no forno. As imagens da microestrutura obtida nesse tipo de processamento térmico estão apresentadas na Figura 32.

Figura 32 – Imagens obtidas por microscopia óptica do aço SAE 1010 tratado termicamente por recozimento_180 min de encharque (Segunda condição).



(a) e (b) Ampliações distintas.
Fonte: Próprio autor.

Analisando as imagens, pode-se perceber a diferença entre os tamanhos de grão das estruturas obtidas após diferentes condições de processamento térmico. Esse resultado, analisado de maneira qualitativa por meio das imagens de microscopia óptica, deve-se à diferença entre os tempos de encharque e de resfriamento empregados nos tratamentos. Após análise, ficou evidente que um maior tempo de encharque levou à formação de grãos de tamanho maiores, tanto em termos de ferrita quanto de perlita, fato relacionado à difusão no material (SILVA; MEI, 2010). Em relação ao resfriamento, ressalta-se que velocidades de arrefecimento maiores, ainda considerando transformações de fase no equilíbrio, levam a um crescimento de grão menos acentuado.

Mediante as análises qualitativas realizadas a partir da microscopia óptica, também verificou-se que os tamanhos de grão entre as amostras recozidas não apresentaram diferença significativa. Dessa maneira, optou-se por dar continuidade ao trabalho apenas com as amostras que passaram pelo processo de normalização (10 minutos e resfriamento ao ar) e recozimento com tempo de encharque de 30 minutos. Essa escolha visou minimizar os efeitos de oxidação intensa presentes nas amostras que permaneceram 180 minutos no forno.

5.3. Efeito do Tratamento Térmico no Comportamento Mecânico: Dureza *Vickers*

Após a avaliação microestrutural das amostras por microscopia óptica, realizou-se a

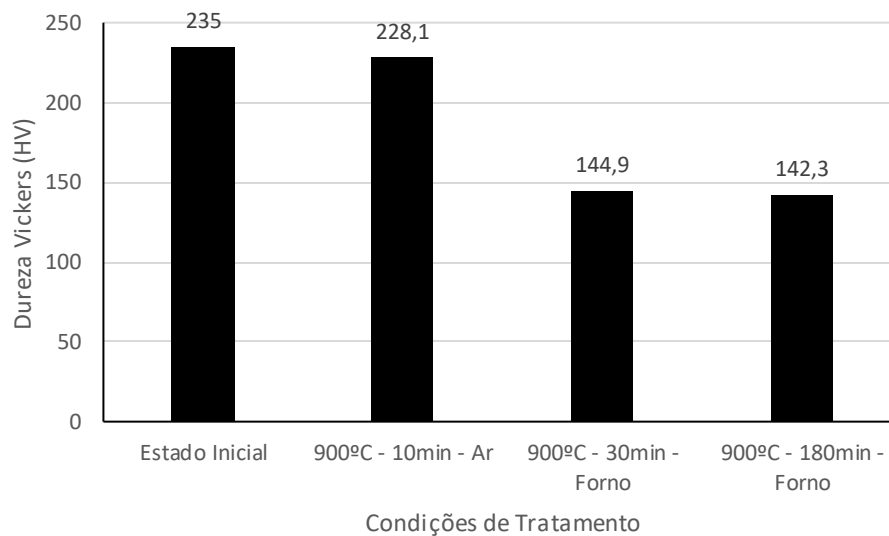
investigação do comportamento mecânico em termos de microdureza Vickers. Os resultados obtidos de dureza e desvio padrão com um número de medições realizadas igual a dez ($n=10$) para as amostras do aço SAE 1010 estão apresentados na Tabela 3. Na Figura 33 é possível observar graficamente estes resultados.

Tabela 3 - Valores de microdureza Vickers para as amostras do aço SAE 1010.

Condição de Tratamento	Microdureza Vickers (HV)	Desvio Padrão (σ)
Térmico		
Estado Inicial	235	11
900°C _ 10min _ Ar	228,1	5,9
900°C _ 30min _ Forno	144,9	10,1
900°C _ 180min _ Forno	142,3	10

Fonte: Próprio autor.

Figura 33 – Valores de microdureza Vickers para as amostras do aço SAE 1010.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados de microdureza Vickers das amostras do aço SAE 1010 tratadas termicamente, mostram que quanto maior o tempo de encharque, menor a dureza do material. Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato de que quanto maior o tempo de encharque, maior é o tempo para a difusão atômica e conseqüentemente maior será o crescimento dos grãos.

E um material com granulação grosseira (que possui grãos grandes) é menos duro e menos

resistente mecanicamente se comparado a um material com granulação fina porque o primeiro possui uma área total menor de contornos de grão, que atua como uma barreira ao movimento de discordâncias e conseqüente deformação plástica (CALLISTER, 2008). Em adição a esse fato, menciona-se ainda que os contornos de grão são considerados fontes emissoras de discordâncias, regiões nas quais segregações e precipitações se dão com maior frequência e, por fim, sítios nos quais uma maior quantidade de sistemas de deslizamento relacionados a grãos adjacentes estão atuando se comparado ao interior do grão durante a deformação plástica pelo mecanismo de deslizamento de planos atômicos (DIETER, 1981).

Dieter (1981) explica que o tamanho de grão influencia diretamente na densidade de discordâncias, de forma que quanto maior o tamanho do grão, menor será a densidade de discordâncias. Essa relação é estabelecida pela função: $\rho = 1/d$, onde ρ representa a densidade de discordâncias e d representa o tamanho de grão. A baixa densidade de discordâncias em estruturas com granulação grosseira, leva à um estado de encruamento reduzido sob deformação, e conseqüentemente a uma menor dureza, considerando-se o encruamento como o endurecimento provocado pela interação dessas discordâncias.

O fato de a amostra no estado como adquirido apresentar maior dureza pode ser explicado também pela fina estrutura granulométrica e pela ocorrência do fenômeno de encruamento durante o processo de laminação na fabricação das chapas.

5.4. Análise do Retorno Elástico do Aço SAE 1010 no Dobramento

A análise da influência de parâmetros distintos de dobramento no retorno elástico, tais como raio e ângulo de dobramento, foi conduzida de forma quantitativa e expressa nas Tabelas 4 e 5. O retorno elástico foi medido em minutos por meio da diferença entre a média dos ângulos de retorno elástico obtidos para cada amostra e o ângulo inicial, estabelecido pela matriz.

A representação gráfica nas Figuras 34 e 35 ilustram a análise da influência do raio do cutelo utilizado no dobramento sobre o retorno elástico analisado nas amostras submetidas à matriz com ângulos de 30°, 60° e 90° e à duas condições de tratamento térmico consideradas para esse ensaio. Sendo que, na Figura 34, são apresentados os valores de retorno elástico para as amostras tratadas por normalização e, na Figura 35 são mostrados os valores desse fenômeno

para as amostras tratadas por recozimento com tempo de encharque de 30 minutos. Para ambos os casos, os resultados foram associados a uma linha de tendência polinomial que se aproximou mais dos dados encontrados, e auxiliou na análise dos resultados apresentados.

De acordo com a literatura, os parâmetros utilizados no processo de dobramento desempenham grande influência sobre o fenômeno de recuperação elástica, de forma que Inamdar et al., 2002 afirma que o efeito mola depende fortemente do ângulo de dobramento e da largura da abertura da matriz. Tekiner, 2004 acrescenta que esse fenômeno é influenciado também pelo raio de dobramento. Há ainda a influência do tamanho de grão, conforme citado por Sales, 2013, e do limite de escoamento, conforme explicitado por Dieter, 1981 e Bresciani Filho e colaboradores, 2011.

Tabela 4 – Análise do retorno elástico na amostra tratada termicamente por normalização, à 900°C com tempo de encharque de 10 minutos e resfriada ao ar.

Raio de dobramento (mm)	Retorno Elástico (minutos)		
	30° (1800')	60° (3600')	90° (5400')
2	150 ± 30	202,5 ± 72,5	182,5 ± 12,5
4	222,5 ± 27,5	320 ± 10	315 ± 45
6	270 ± 30	370 ± 0	345 ± 15
8	275 ± 5	385 ± 25	360 ± 60
10	292,5 ± 32,5	390 ± 30	375 ± 15

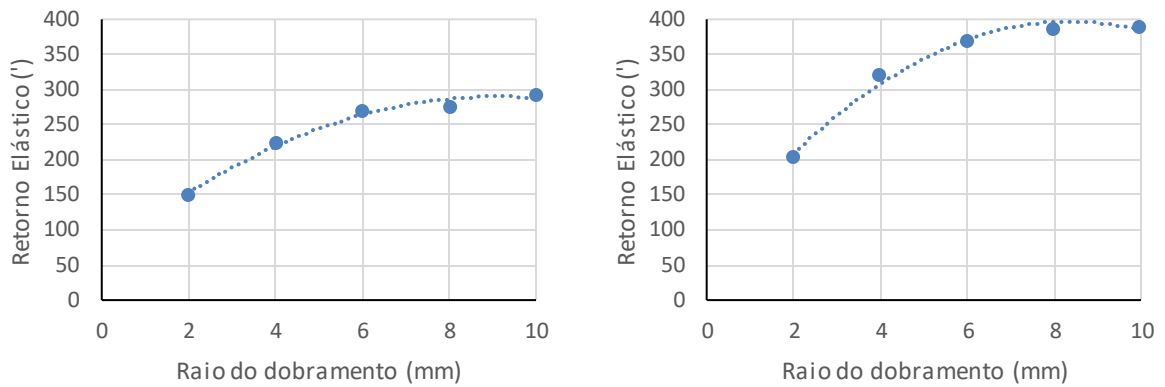
Fonte: Próprio autor.

Tabela 5 – Análise do retorno elástico na amostra tratada termicamente por recozimento, à 900°C com tempo de encharque de 30 minutos e resfriada ao forno.

Raio de dobramento (mm)	Retorno Elástico (minutos)		
	30°	60°	90°
2	120 ± 0	157,5 ± 22,5	65 ± 5
4	157,5 ± 7,5	205 ± 35	167,5 ± 12,5
6	190 ± 5	257,5 ± 17,5	200 ± 5
8	232,5 ± 7,5	260 ± 20	242,5 ± 2,5
10	265 ± 5	312,5 ± 37,5	295 ± 5

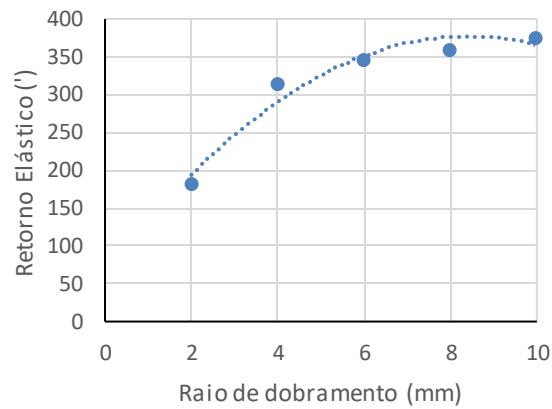
Fonte: Próprio autor.

Figura 34 – Análise da influência do raio de dobramento no retorno elástico verificado durante o dobramento com ângulos diferentes em amostras submetidas à normalização.



(a)

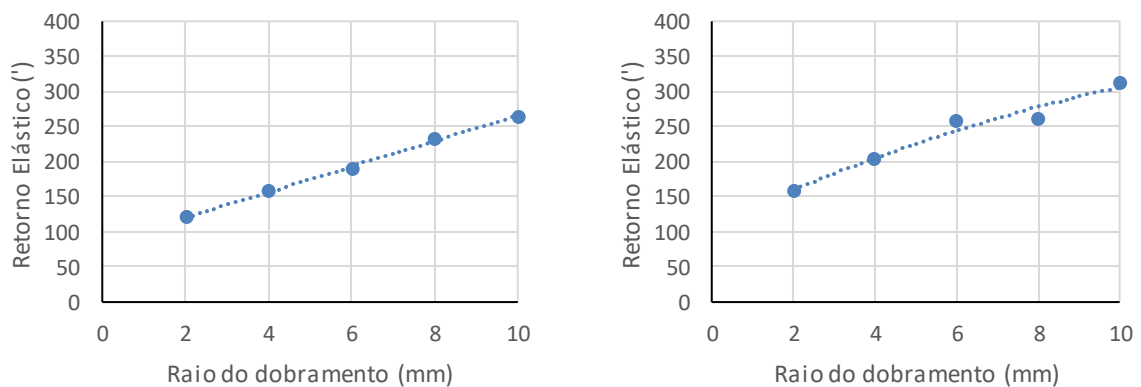
(b)



(c)

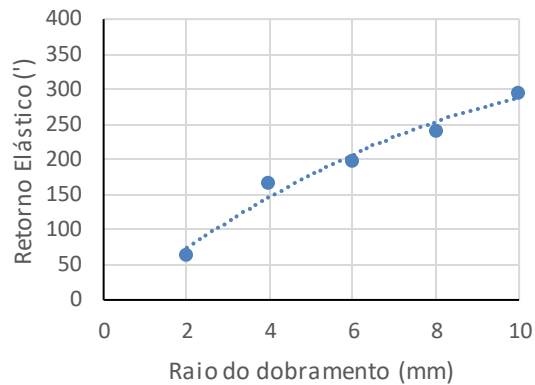
(a) Dobramento sob o ângulo de 30°; (b) Dobramento sob o ângulo de 60° (c) Dobramento sob o ângulo de 90°.
Fonte: próprio autor.

Figura 35 – Análise da influência do raio de dobramento no retorno elástico verificado durante o dobramento com ângulos diferentes em amostras submetidas ao recozimento.



(a)

(b)



(c)

(a) Dobramento sob o ângulo de 30°; (b) Dobramento sob o ângulo de 60° (c) Dobramento sob o ângulo de 90°.
Fonte: Próprio autor.

Considerando a abordagem do presente trabalho, além do raio de dobramento e ângulo de dobramento utilizados como parâmetros para avaliar o efeito mola, o tamanho de grão também foi avaliado. De maneira geral, os resultados obtidos em relação ao raio do cutelo estão de acordo com a literatura, uma vez que foi observado, em ambas condições de tratamento, que o aumento no raio do cutelo levou à elevação na recuperação elástica, similarmente aos estudos apresentados anteriormente (TEKASLAN et al., 2006).

Por outro lado, os resultados obtidos, quando analisados em termos do ângulo de dobramento, não permitiram verificar a tendência geral de aumento do ângulo de retorno elástico com a elevação do ângulo de dobramento inicial, conforme a relação direta evidenciada por Tekiner, 2004. Para ambas amostras, foi verificado que o retorno elástico aumentou apenas quando ocorreu o aumento do ângulo de dobramento de 30° para 60°, no entanto, quando aumentou-se o ângulo de 60° para 90° foi observado que ocorreu uma queda no retorno elástico ou, para algumas situações, considerando o desvio padrão dos resultados, a alteração não seria acentuada.

Em relação às características microestruturais do material conformado, verificou-se que aquele que foi recozido e apresentou, portanto, maior tamanho de grão, obteve um retorno elástico menos acentuado se comparado com a amostra que foi normalizada e apresentou uma estrutura granulométrica mais fina. Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato de que uma estrutura mais grosseira dos grãos leva à um menor limite de escoamento e, portanto, a um retorno elástico menos acentuado.

De acordo com a literatura, esse resultado é explicado com base na premissa de que para muitos materiais, a tensão limite de escoamento σ_1 varia de acordo com o tamanho de grão, conforme a relação evidenciada na Equação 5 (DIETER, 1981; BRESCIANI FILHO et al., 2011).

$$\sigma_1 = \sigma_0 + k_1 d^{-1/2} \quad (5)$$

Nessa expressão, denominada Equação de Hall-Petch, d é o diâmetro médio do grão, enquanto σ_0 e k_1 são constantes para cada material específico.

Mediante essa equação percebe-se que quanto maior for o diâmetro médio dos grãos, ou seja, quanto mais grosseira for a microestrutura do material, menor será o limite de escoamento. Dessa forma, verifica-se que as amostras submetidas ao recozimento apresentam, portanto, menor limite de escoamento.

Em relação a essa característica do material, o limite de escoamento pode ser considerado como um dos parâmetros mais significativos que afetam o fenômeno de retorno elástico no dobramento (TEKINER, 2004; TEKASLAN et al., 2006). Os trabalhos sugerem que uma diminuição na tensão limite de escoamento levaria a uma redução no efeito mola (DIETER, 1981; TEKINER, 2004).

Assim, a amostra submetida ao recozimento e com maior tamanho de grão deve apresentar um menor limite de escoamento e, portanto, menor retorno elástico conforme foi constatado nos resultados apresentados nesse trabalho.

6. CONCLUSÕES

— As microestruturas obtidas após os tratamentos térmicos realizados apresentaram grãos de ferrita e perlita. No entanto, a diferença entre elas se deu por meio do tamanho de grão formado em cada tipo de processamento (normalização, recozimento com tempo de encharque de 30 min e recozimento com tempo de encharque de 180 min).

— Granulometrias mais finas foram observadas nas amostras submetidas à normalização e granulometrias mais grosseiras foram identificadas nas amostras submetidas ao recozimento, de forma que quanto maior o tempo de encharque e mais lento o resfriamento maior o tamanho dos grãos formados.

— A dureza variou de modo inversamente proporcional ao tamanho de grão, de forma que quanto mais grosseira a estrutura granulométrica, menor os valores de dureza obtidos. Esse fenômeno deve-se, conforme verificado na literatura, a presença de uma área total menor de contornos de grão para impedir o movimento das discordâncias e a ocorrência de encruamento em menor intensidade, uma vez a densidade de discordâncias é menor.

— De maneira geral, para ambas as microestruturas analisadas, o fenômeno de recuperação elástica aumentou com o aumento do raio do cutelo. No entanto a tendência de aumento do fenômeno com o acréscimo do ângulo de dobramento não pode ser verificada de forma ampla quando o ângulo foi alterado de 60° para 90°.

— Em relação às características microestruturais do material conformado, verificou-se que aquele que foi recozido, e apresentou portanto, maior tamanho de grão, obteve um retorno elástico menos acentuado se comparado com a amostra que foi normalizada. Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato de que uma estrutura mais grosseira dos grãos leva à um menor limite de escoamento segundo a equação de Hall –Petch e, portanto, a um retorno elástico menos acentuado.

7. REFERÊNCIAS

- BRESCIANI FILHO, Ettore et al. **Conformação Plástica Dos Metais**. 6. ed. Campinas: Epusp, 2011. 254 p.
- CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7 ed. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos Editorial S.A, 2008. 705p.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 5 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1984. 518p.
- DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2. ed. Carnegie: Guanabara Dois, 1981. 653 p. Tradução de: Antonio Sergio de Souza e Silva, Luiz Henrique de Almeida, Paulo Emílio Valadão de Miranda.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: Ltc, 2000. 247 p.
- GUSEL, L. Analysis of elastic recovery phenomena in bending process. **DAAAM International**, v. 22, p. 39-40, 2011.
- HOSFORD, W. F.; CADDELL, R. M. **Metal Forming: Mechanics and Metallurgy**. 2. ed. Cambridge University Press. 1993. 344p.
- INAMDAR, M. V.; DATE, P. P.; SABNIS, S. V. On the effects of geometric parameters on springback in sheets of five materials subjected to air vee bending. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 123, p. 459-463, 2002.
- MAEDA, D. A. **Modelagem da estampagem profunda de chapas metálicas via o método dos elementos finitos associado ao critério de escoamento não-quadrático de Hill**. 2009. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- MAGALHÃES, A. S. **Efeito da temperatura intercrítica na microestrutura e no comportamento de aços bifásicos**. 2015. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Centro Federal Tecnológico de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- MARCINIÁK, Z.; DUNCAN, J. L.; HU, S. J. **Mechanics of sheet metal forming**. 2. ed. Massachusetts: Butterworth-Heinemann, 2002. 211p.
- OLIVEIRA, M. C.; ALVES, J. L.; CHAPARRO, B. M.; MENEZES, L. F. Study on the influence of work-hardening modeling in springback prediction. **International Journal of Plasticity**, v. 23, p. 516-543, 2007.
- PALMEIRA, A. A.; HABIBE, A. F.; JACOME, P. A. **Técnicas de modelagem de conformação de chapas por elementos finitos**. Cadernos UniFOA, v. 1, n. 1, p. 41-54, 2017.
- PONTES, T. O. **Caracterização da microestrutura e microdureza de um aço SAE 1010 laminado a quente em planta industrial**. 2013. 47 f. Monografia - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

RODRIGUES, J.; MARTINS, P. **Tecnologia Mecânica – Tecnologia da Deformação Plástica - Vol II – Aplicações Industriais**. Lisboa: Escolar Editora, 2005, 741p.

SALES, V. **Análise do comportamento dos aços inoxidáveis AISI 304 e SAF 2205 em diferentes condições de dobramento**. 2013. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Centro Federal Tecnológico de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

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

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

SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**: Fundamentos teóricos e práticos. 5. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1982. 286 p.

SOUZA, S. A. **Composição química dos aços**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda. 1989. 134p.

TEKASLAN, O.; SEKER, U.; OZDEMIR, A. Determining springback amount of steel sheet metal has 0.5mm thickness in bending dies. **Materials and Design**, v. 27, p. 251-258, 2006.

TEKINER, Z. An experimental study on the examination of springback of sheet metals with several thicknesses and properties in bending dies. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 145, p. 109-117, 2004.