

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

VINÍCIUS MEIRELLES MENDONÇA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO LATÃO Cu-Zn 34 SOB
DIFERENTES ROTAS DE PROCESSAMENTO MECÂNICO**

BELO HORIZONTE

2015

VINÍCIUS MEIRELLES MENDONÇA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO LATÃO Cu-Zn 34 SOB
DIFERENTES ROTAS DE PROCESSAMENTO MECÂNICO**

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.

Orientador: Wellington Lopes

Coorientadora: Elaine Carballo Siqueira Corrêa

BELO HORIZONTE

2015

VINÍCIUS MEIRELLES MENDONÇA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO LATÃO Cu-Zn 34 SOBRE
DIFERENTES ROTAS DE PROCESSAMENTO MECÂNICO**

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.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wellington Lopes - Orientador

Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa - Coorientadora

Prof. Dr. Frederico de Castro Magalhães

Mestranda Eng. Grazielle Gianini Braga Maria

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Técnicas de ensaio de dureza	27
Tabela 2 - Medidas obtidas para o ensaio de microdureza Vickers no estado inicial	38
Tabela 3 - Medidas obtidas para o ensaio de microdureza Vickers no estado final.....	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curvas tensão-deformação para um caso de inversão no sentido de deformação do material: (a) encruamento isotrópico, (b) encruamento cinemático	16
Figura 2 - Desenho esquemático do ensaio de cisalhamento	17
Figura 3 - Equipamento utilizado no ensaio de cisalhamento planar simples (esquerda) e aspecto de corpo de prova após o ensaio (direita)	17
Figura 4 - Curvas tensão cisalhante e deformação cisalhante para material com e sem deformação prévia por laminação.....	19
Figura 5 - Modelo de calandra automática	20
Figura 6 - Calandra de chapas com três rolos.....	21
Figura 7 - Diagrama do sistema Cu-Zn	22
Figura 8 - Micrografia do latão 70/30	23
Figura 9 - Variação da dureza do latão com os tratamentos térmicos de recozimento e de têmpera	25
Figura 10 - Guilhotina da marca PEXTO modelo U-136-D utilizada para cortar os corpos de prova.....	30
Figura 11 - Corpos de prova de latão Cu-Zn 34	31
Figura 12 - Equipamentos utilizados para o lixamento e o polimento dos corpos de prova	32
Figura 13 - Microscópio óptico Kontrol modelo IM713.....	32
Figura 14 - Microdurômetro Vickers da marca Shimadzu e modelo 2T.....	33
Figura 15 - Dispositivo acoplado à máquina de ensaios universais Instron 5582 para a realização de cisalhamento planar	34
Figura 16 - Calandra da marca Imag	35
Figura 17 - Forno elétrico da marca <i>Magnus</i> modelo N1040 usado para promover tratamento térmico de recozimento	36
Figura 18 - Micrografia do latão Cu-Zn 34 no estado inicial, com aumento de 200X.....	37
Figura 19 - Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva das amostras de 0°, 90° e 135° em cisalhamento direto para a rota 1.....	40
Figura 20 - Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva das amostras de 0°, 90° e 135° em cisalhamento direto para a rota 2.....	40
Figura 21 - Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva das amostras de 0°, 90° e 135° em cisalhamento direto para a rota 3.....	41

Figura 22 - Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva para as amostras de 0° da rota 1.....	42
Figura 23 - Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva para as amostras de 90° da rota 1.....	42
Figura 24 - Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva para as amostras de 135° da rota 1.....	43
Figura 25 - Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva para as amostras de 0° da rota 2.....	44
Figura 26 - Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva para as amostras de 90° da rota 2.....	44
Figura 27 - Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva para as amostras de 135° da rota 2.....	45
Figura 28 - Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva para as amostras de 0° da rota 3.....	46
Figura 29 - Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva para as amostras de 90° da rota 3.....	47
Figura 30 - Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva para as amostras de 135° da rota 3.....	47
Figura 31 - Gráficos do Efeito Bauschinger na rota 1 para todos os ângulos em cada uma das quantidades de deformação.....	48
Figura 32 - Gráficos do Efeito Bauschinger na rota 2 para todos os ângulos em cada uma das quantidades de deformação.....	49
Figura 33 - Gráficos do Efeito Bauschinger na rota 3 para todos os ângulos em cada uma das quantidades de deformação.....	50
Figura 34 - Gráficos de Taxa de encruamento normalizada(MPa) x Deformação efetiva para a amostra de 0° da rota 1.....	51
Figura 35 - Gráficos de Taxa de encruamento normalizada(MPa) x Deformação efetiva para a amostra de 90° da rota 1.....	51
Figura 36 - Gráficos de Taxa de encruamento normalizada(MPa) x Deformação efetiva para a amostra de 135° da rota 1.....	52
Figura 37 - Gráficos de Taxa de encruamento normalizada(MPa) x Deformação efetiva para a amostra de 0° da rota 2.....	52

Figura 38 - Gráficos de Taxa de encruamento normalizada(MPa) x Deformação efetiva para a amostra de 90° da rota 2.....	53
Figura 39 - Gráficos de Taxa de encruamento normalizada(MPa) x Deformação efetiva para a amostra de 135° da rota 2.....	53
Figura 40 - Gráficos de Taxa de encruamento normalizada(MPa) x Deformação efetiva para a amostra de 0° da rota 3.....	54
Figura 41 - Gráficos de Taxa de encruamento normalizada(MPa) x Deformação efetiva para a amostra de 90° da rota 3.....	54
Figura 42 - Gráficos de Taxa de encruamento normalizada(MPa) x Deformação efetiva para a amostra de 135° da rota 3.....	55
Figura 43 - Expoentes de encruamento calculados para cada ângulo em cisalhamento direto e reverso na rota 1	56
Figura 44 - Expoentes de encruamento calculados para cada ângulo em cisalhamento direto e reverso na rota 2	56
Figura 45 - Expoentes de encruamento calculados para cada ângulo em cisalhamento direto e reverso na rota 3	57

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Justificativa	13
1.2. Objetivo	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. Processos de Deformação Plástica	15
<i>2.1.1. Carregamento Cíclico</i>	15
<i>2.1.1.1. Cisalhamento Planar Simples</i>	16
<i>2.1.2. Calandragem</i>	19
2.2. Latão	21
2.3. Tratamentos Térmicos	23
2.4. Técnicas de Caracterização de Materiais	25
<i>2.4.1. Ensaio de Dureza</i>	26
<i>2.4.1.1. Ensaio de Microdureza Vickers</i>	27
3. MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1. Descrição Geral do Trabalho	29
3.2. Material	30
3.3. Corpos de Prova	30
3.4. Caracterização do Material no Estado Inicial	31
3.5. Rotas de Processamento Mecânico	33
<i>3.5.1. Material como recebido / Cisalhamento Direto e Reverso</i>	33
<i>3.5.2. Calandragem / Cisalhamento Direto e Reverso</i>	34
<i>3.5.3. Recozimento / Cisalhamento Direto e Reverso</i>	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1. Caracterização do Material no Estado Inicial	37
4.2. Caracterização do Material no Estado Final	38
<i>4.2.1. Ensaio de Dureza</i>	38
<i>4.2.2. Anisotropia</i>	39
<i>4.2.3. Efeito da Quantidade de Deformação no Comportamento Mecânico do latão Cu-Zn</i> <i>34</i>	41
<i>4.2.3.1. Material como recebido / Cisalhamento Direto e Reverso</i>	41
<i>4.2.3.2. Calandragem / Cisalhamento Direto e Reverso</i>	43

4.2.3.3. <i>Recozimento / Cisalhamento Direto e Reverso</i>	46
4.2.4. <i>Efeito Bauschinger</i>	48
4.2.5. <i>Encruamento</i>	50
5. CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS	59

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar a oportunidade de vir a esse mundo e evoluir com a experiência humana.

Aos meus pais e à minha irmã, por me apoiarem sempre e me ajudarem de todas as formas possíveis a atingir meus objetivos.

Ao meu orientador Wellington Lopes pela paciência e dedicação, me auxiliando na execução deste trabalho e sendo um mestre e amigo.

Aos meus amigos, aos profissionais do Departamento de Engenharia de Materiais e a todas as demais pessoas que de uma forma ou de outra possibilitaram que esse trabalho fosse realizado.

RESUMO

Este trabalho teve por finalidade avaliar o comportamento mecânico do latão Cu-Zn 34 quando submetido às seguintes rotas de processamento mecânico: rota 1 (Cisalhamento Direto e Reverso); rota 2 (Calandragem/Cisalhamento Direto e Reverso); rota 3 (Recozimento/Cisalhamento Direto e Reverso). As variáveis escolhidas para monitorar o desempenho do material foram a quantidade de deformação, o ângulo formado pelo corpo de prova com a direção de laminação e o modo de carregamento. Realizou-se ensaio de microdureza Vickers, como também a confecção de curvas de comportamento mecânico em cisalhamento, efeito Bauschinger e encruamento. Dessa forma, foi possível constatar uma condição de anisotropia dos corpos de prova, advinda do estado de conformação da chapa laminada a frio utilizada como matéria-prima para o corte das amostras. Observou-se que um aumento no ângulo em relação à direção de laminação resultou em um maior efeito Bauschinger nas rotas 1 e 3, e uma menor resistência mecânica nas rotas 1 e 2. Ademais, as amostras da rota 2 apresentaram maior efeito Bauschinger e encruaram mais se comparadas às amostras da rota 1. Isso se deve à presença de etapa extra de pré-deformação por calandragem na rota 2.

Palavras-chave: Latão Cu-Zn 34. Efeito Bauschinger. Encruamento. Carregamento Cíclico.

ABSTRACT

This work was aimed to evaluate the mechanical behavior of Cu-Zn 34 brass when subjected to the following mechanical processing routes: Route 1 (Direct and Reverse Shear); Route 2 (Calendering/Direct and Reverse Shear); Route 3 (Annealing/Direct and Reverse Shear) . The variables chosen for monitoring the performance of the material were the amount of deformation, the angle formed by the test specimen with the rolling direction, and the charging mode. Vickers hardness test as well as the production of mechanical behavior in shear curves, Bauschinger effect curves and work hardening curves. Thus, there has been a condition of anisotropy of the specimens, coming from the cold rolled sheet used as raw material for cutting the samples. It was observed that an increase in the angle with the rolling direction resulted in a greater Bauschinger effect on the routes 1 and 3, and a lower mechanical strength in routes 1 and 2. Furthermore, route 2 samples showed higher Bauschinger Effect and higher hardening compared to samples from route 1. This is due to the presence of extra step of pre-deformation by calendering in route 2.

Keywords: Cu -Zn 34 Brass. Bauschinger Effect. Hardening. Cyclic Loading.

1. INTRODUÇÃO

Ligas de cobre-zinco são produzidas desde o quinto milênio a.C. na China, e foram amplamente usadas no leste e no centro da Ásia no segundo e no terceiro séculos a.C. Entretanto, acredita-se que a produção intencional de ligas similares ao latão moderno só teve início no século I a.C., quando os romanos usavam cobre e um minério rico em óxido de zinco, chamado calamina. Entretanto, só no século XIV, na Índia, que foi introduzida a redução no processo. Sendo que passou-se a usar o zinco metálico diretamente e não o seu minério, o que permitiu controlar melhor o teor de zinco na liga (BELL, 2014).

Com o passar dos séculos, o latão foi se tornando um metal de renomada importância no mercado. O que o diferencia de seus concorrentes é sua única combinação de propriedades quando se trata de uma aplicação a longo prazo, na qual a relação custo-benefício seja fundamental (CALLCUT, 2014).

Portanto, o presente trabalho analisa o comportamento mecânico do latão sob diferentes rotas de processamento mecânico, com o intuito de melhor entender os fenômenos envolvidos e as respostas apresentadas pelo latão Cu-Zn34.

1.1. Justificativa

O estudo contribuirá para a melhor compreensão de como o latão Cu-Zn 34 se comporta mediante conformação mecânica em diferentes rotas de processamento. O latão é uma liga muito utilizada comercialmente devido à sua conformabilidade, resistência à corrosão e boa relação custo-benefício, entre outras propriedades. Sendo assim, com este trabalho pretende-se promover uma reflexão sobre os eventos envolvidos na deformação do latão, como também, das variações observadas em suas propriedades.

1.2. Objetivo

Objetivo geral: estudar o comportamento mecânico do latão Cu-Zn 34 após mudanças nas rotas de processamento mecânico.

Objetivos específicos:

- a) investigar a influência da condição de solicitação mecânica (cisalhamento direto e cisalhamento reverso) no comportamento mecânico do latão Cu-Zn 34;
- b) avaliar o efeito da quantidade de deformação plástica na evolução do encruamento do latão Cu-Zn 34;
- c) estudar a influência do efeito Bauschinger no comportamento mecânico do latão Cu-Zn 34.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Processos de Deformação Plástica

2.1.1. Carregamento Cíclico

Em operações de conformação mecânica com múltiplos estágios de deformação, o material normalmente se submete a deformações cíclicas, que são aquelas onde existe a aplicação repetitiva de esforços em sentidos alternados. Sequências de carregamento desta natureza, levam o material a apresentar comportamentos de encruamento atípicos (LOPES, 2009).

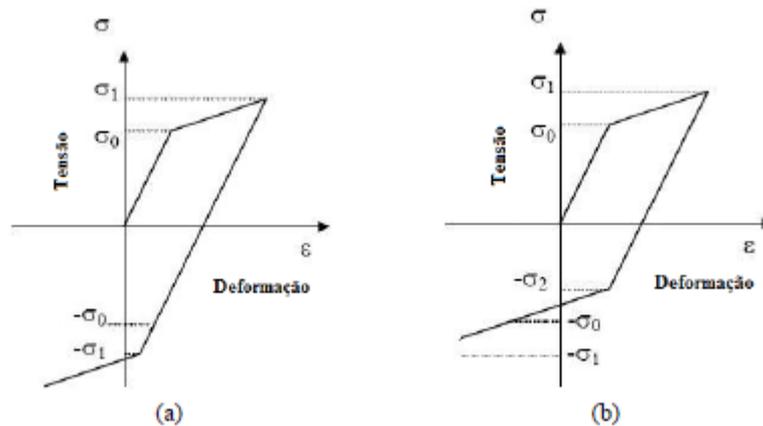
Quando deformado ciclicamente, um metal pode sofrer aumento ou diminuição de sua dureza de acordo com os seguintes fatores: tipo de mudança na trajetória de deformação, estado inicial do material e amplitude da deformação cíclica (SAKHAROVA e FERNANDES, 2006; VAN BOXEL, 2010).

Lopes (2009) menciona que quando da aplicação de esforços cíclicos, o endurecimento ou amaciamento do material, de modo geral, ocorre principalmente devido à sua condição inicial, sendo que quando pré-deformado, ocorre amaciamento do material, e quando recozido, há o endurecimento do material.

Ao promover-se uma inversão no sentido de deformação, caracterizando um caso de deformação reversa, é possível notar uma mudança no comportamento de encruamento do material após a mudança da trajetória de deformação (MNIF et al, 2011; VAN BOXEL, 2010).

Na Figura 1 são apresentados dois tipos diferentes de comportamentos quanto à resistência ao escoamento de um material após a imposição de um carregamento com reversão no sentido da deformação. Durante o carregamento direto, em ambos os casos, os materiais apresentaram uma tensão de escoamento σ_0 . O carregamento reverso teve início para uma tensão σ_1 .

Figura 1- Curvas tensão-deformação para um caso de inversão no sentido de deformação do material: (a) encruamento isotrópico, (b) encruamento cinemático.



Fonte: LOPES, 2009.

Em (a), durante o carregamento reverso, o metal passa a escoar sob a ação da tensão de módulo σ_1 , maior que σ_0 . Sendo assim, o material deformado apresentará sob deformação reversa um aumento da resistência mecânica com a deformação plástica, sendo o encruamento classificado como isotrópico.

Por outro lado, em (b), o módulo da tensão limite de escoamento durante o carregamento reverso é σ_2 , inferior a σ_0 e a σ_1 . Nessa situação, o encruamento acarretará em uma diminuição da resistência ao escoamento, este fenômeno é denominado efeito Bauschinger. O encruamento que ocorreu no material de (b), é classificado como encruamento anisotrópico ou cinemático e os mecanismos que controlam a plasticidade no carregamento direto e no carregamento reverso, são distintos (LOPES, 2009).

2.1.1.1. Cisalhamento Planar Simples

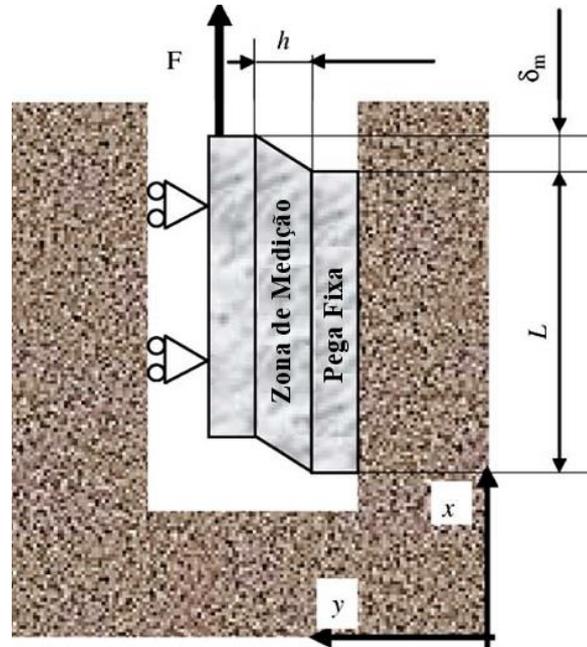
Ao se conformar um material, pode-se gerar uma distribuição heterogênea de deformação, além de aumentar a sua anisotropia. Isto se deve por alguns processos envolverem sequências e rotas de deformação complexas (BOUVIER et al, 2006).

Tipicamente, há duas técnicas de ensaio de cisalhamento: o ensaio de torção e o ensaio de cisalhamento puro. Este último, utilizando a técnica cisalhamento planar simples, é o mais utilizado, por melhor indicar as condições de esforços complexas, como na laminação (CALLISTER JÚNIOR, 2008; LOPES, 2009; BOUVIER et al, 2006).

O dispositivo para este ensaio consiste basicamente em uma zona fixa e uma zona móvel. O material é fixado nestas duas partes, deixando uma região na qual será cisalhada. A zona

móvel, assim, move-se paralelamente, causando deformações cisalhantes. A figura 2 apresenta um desenho esquemático do ensaio, em que L representa a altura, h a largura efetiva e δ_m o deslocamento da parte móvel (BOUVIER et al, 2006).

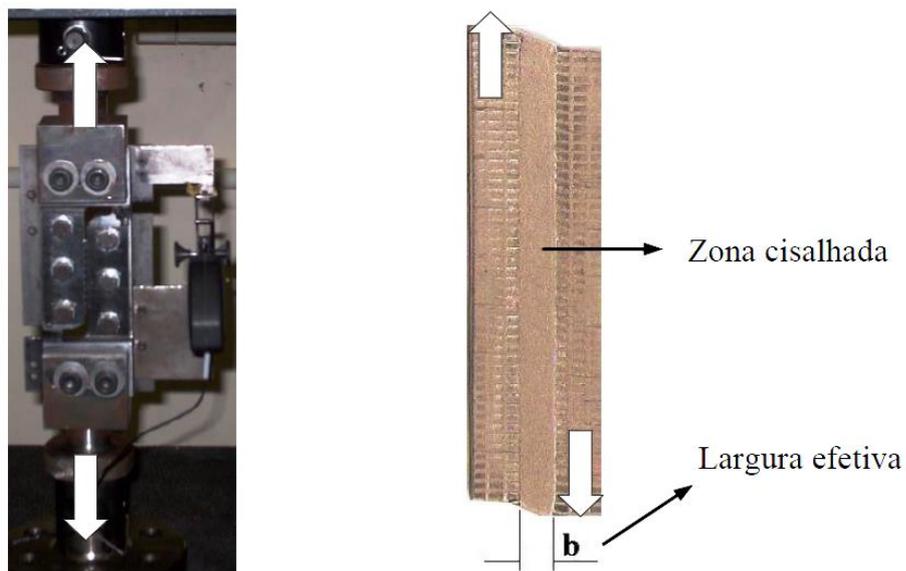
Figura 2- Desenho esquemático do ensaio de cisalhamento.



Fonte: BOUVIER et al, 2006.

A Figura 3 mostra um exemplo de dispositivo adotado para a realização do ensaio de cisalhamento e o aspecto do corpo de prova após o ensaio.

Figura 3- Equipamento utilizado no ensaio de cisalhamento planar simples (esquerda) e aspecto de corpo de prova após o ensaio (direita).



Fonte: LOPES, 2009

Pela Figura 3, percebe-se que, devido ao sistema de fixação, o material sofre marcações nas extremidades. Deve-se então, atentar-se para que este sistema não cause trincas e efeitos indesejáveis (BOUVIER et al, 2006; LOPES, 2009).

Para se calcular a tensão cisalhante convencional, deve-se ignorar os efeitos de fixação do corpo de prova no equipamento, como também as deformações de compressão nas extremidades do corpo de prova (BOUVIER et al, 2006; RAUCH, 1998). A equação 1 evidencia esse cálculo.

$$\tau = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

Nela, τ representa a tensão cisalhante convencional média [MPa], F a força aplicada [N] e A_0 é a área inicial da zona de deformação [mm²].

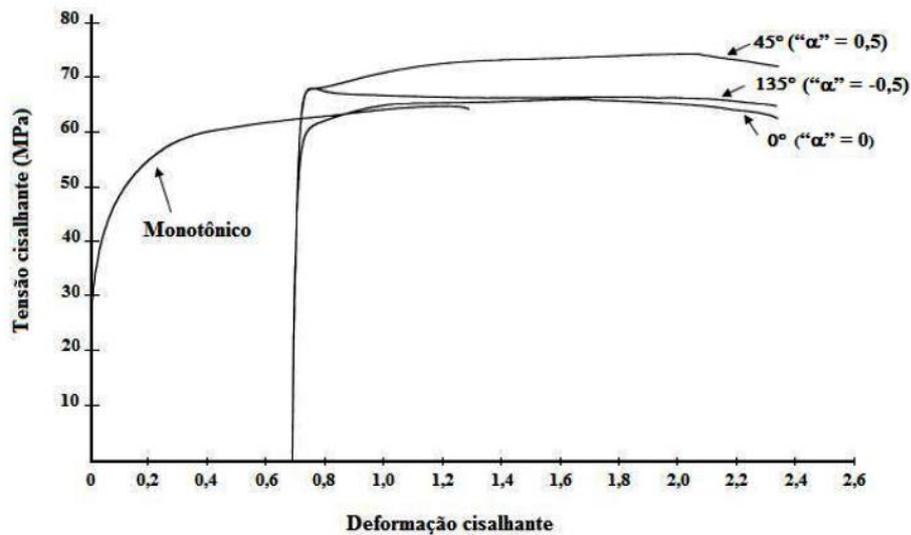
Para o cálculo da deformação cisalhante convencional, utiliza-se aproximações com o critério de escoamento de Von Mises e tensores tensão. Para esse cálculo, relaciona-se o deslocamento da parte móvel com a largura efetiva (equação 2). Não se utiliza a altura do corpo de prova (L), uma vez que ela será constante em todo o processo.

$$\gamma = \frac{\delta_m}{h} \quad (2)$$

Em relação ao ensaio de tração, o ensaio de cisalhamento possui algumas vantagens como: a confecção dos corpos de prova é mais simples (no formato retangular), permite a análise mais efetiva do efeito Bauschinger, invertendo a direção do esforço e possibilita atingir grandes valores de deformação plástica uniforme (LOPES, 2009).

Os resultados deste ensaio podem ser expressos numa curva parecida com a curva resultante de um ensaio de tração, onde nos lugares de tensão convencional e deformação convencional, utiliza-se tensão cisalhante média convencional (τ), e deformação cisalhante média convencional (γ). A Figura 4 representa o resultado de um ensaio de cisalhamento realizado após o processo de laminação, em diferentes ângulos em relação à direção de laminação.

Figura 4- Curvas tensão cisalhante e deformação cisalhante para material com e sem deformação prévia por laminação.



Fonte: LOPES, 2009.

Para gerar um gráfico mais claro e com melhor interpretação dos dados nele contidos, uma alternativa seria expressar o mesmo gráfico em função da tensão efetiva (τ_e) e da deformação efetiva (γ_e), como foi feito no presente trabalho. As equações 3 e 4 mostram os cálculos que devem ser realizados para obter as grandezas mencionadas.

$$\tau_e = 1,84\tau \quad (3)$$

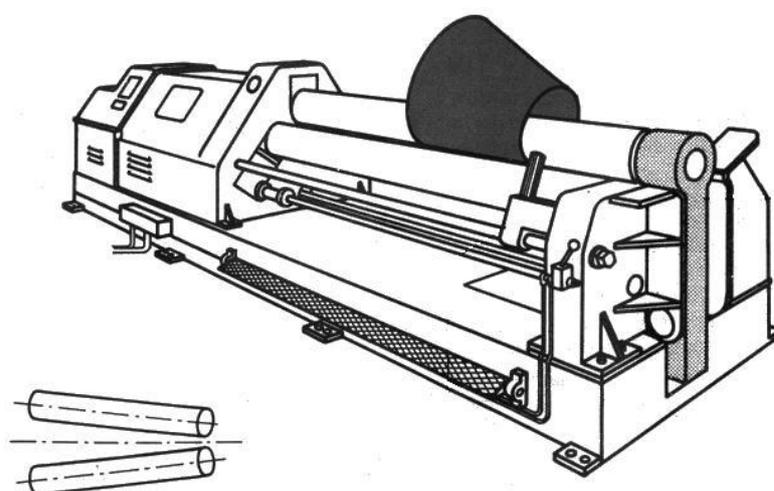
$$\gamma_e = \frac{\gamma}{1,84} \quad (4)$$

2.1.2. Calandragem

A calandragem é uma técnica de conformação mecânica utilizada para promover o curvamento de chapas, resultando em peças chamadas virolas. O equipamento empregado para tal finalidade é denominado calandra, sendo composto de um conjunto de rolos/cilindros, com movimento giratório e pressão regulável, similarmente à laminação. O movimento dos cilindros é feito por engrenagens, as quais giram e impelem força de acordo com a geometria, dimensões e parâmetros metalúrgicos do material calandrado. Em geral, trata-se de uma operação realizada a frio. As calandras podem ser tanto manuais quanto motorizadas. As

calandras manuais somente são empregadas quando a produção é limitada a pequenas quantidades e a espessura da chapa a ser conformada não passa de 2,5 mm, não havendo necessidade de grande controle dimensional. As calandras motorizadas, por sua vez, podem calandrar chapas de até 40 mm de comprimento, com maior controle da deformação e das dimensões da chapa (PEREIRA, 2012). Uma calandra motorizada, similar à usada neste trabalho, pode ser vista na Figura 5, a seguir.

Figura 5 – Modelo de calandra automática.



Fonte: PEREIRA, 2012.

Ao passar por este processo, o material está submetido a esforços compressivos, de atrito e de cisalhamento, de modo análogo à laminação. Na fabricação de tubos com costura, a calandragem pode ser utilizada em uma das etapas do processo para curvar as chapas, dando a elas o formato do produto final. Para tal, os equipamentos utilizados podem ter de dois a quatro rolos, paralelos uns aos outros, facilitando a deformação e o controle do processo. O volume e a massa do metal são conservados e o processo tem como vantagens redução de desperdícios de material, facilidade e rapidez de execução, além de poder servir como etapa delimitante das propriedades mecânicas do material, devido ao encruamento gerado no processo a frio (PEREIRA, 2012).

Uma calandra de três rolos pode ser vista na Figura 6.

Figura 6 - Calandra de chapas com três rolos.



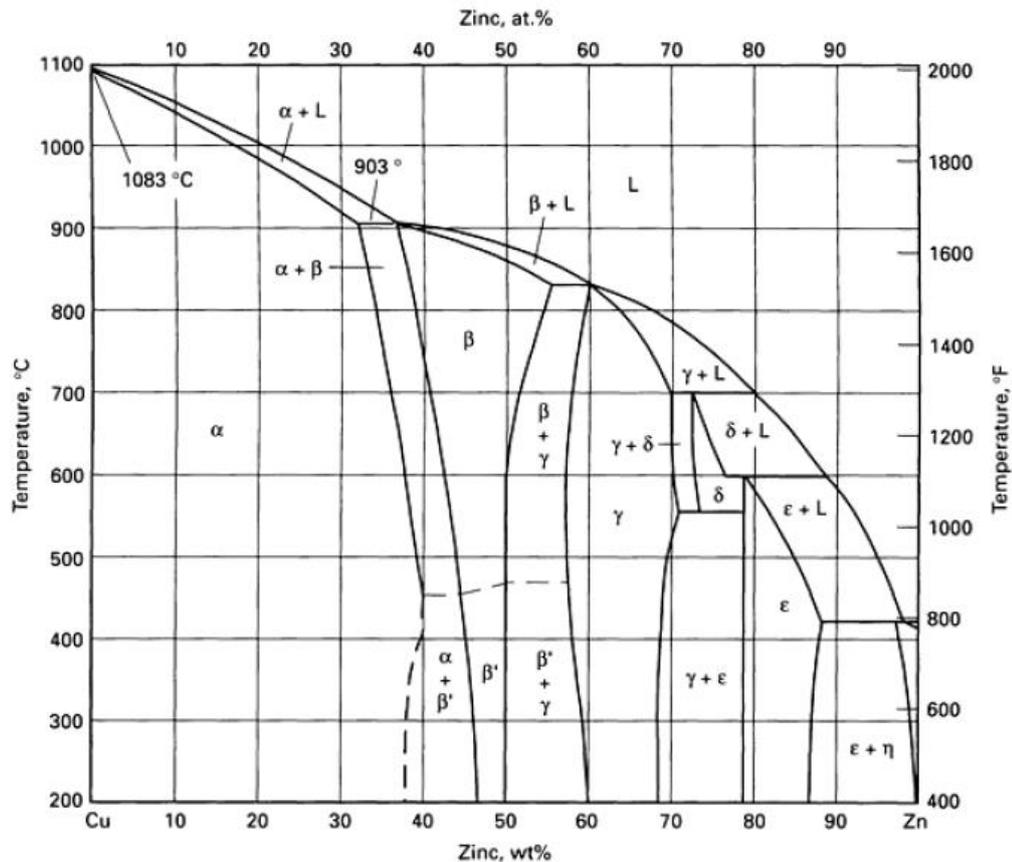
Fonte: PEREIRA, 2012.

2.2. Latão

O latão é uma liga de cobre e zinco que tem o seu uso muito difundido desde os tempos mais remotos. Os valores de zinco variam de cerca 5% a 45%, sendo que os mais interessantes comercialmente apresentam alto teor de zinco, como o Muntz Metal, que possui 45% de zinco em sua composição (ROMÁN, 2010).

Como mencionado, o latão utilizado neste trabalho se trata do latão Cu-Zn 34, liga C26800, também conhecido como latão amarelo. (ROMÁN, 2010). A seguir, a Figura 7 mostra o diagrama de fases do sistema Cu-Zn, no qual se encontram os latões. A fase α possui estrutura cúbica de face centrada (CFC), enquanto a fase β possui estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), com os átomos de cobre e zinco ocupando posições randômicas na rede (ROMÁN, 2010). As duas fases possuem densidades iguais. Como os latões mais comercialmente usados têm suas composições oscilando entorno de 40%, estas ligas encontram-se na fase de estabilidade α - β (ASM HANDBOOK, 2002).

Figura 7 – Diagrama do sistema Cu-Zn.



Fonte: ASM HANDBOOK, 2002.

Ao resfriar o material abaixo da linha tracejada, que se encontra por volta de 450°C, os átomos de cobre e de zinco assumem posições específicas, formando uma estrutura ordenada ou super-rede. Essa fase formada recebe o nome de β' . Se a composição é de exatamente 50% de zinco, então a estrutura ordenada é CCC com átomos de zinco no centro e de cobre nos vértices. Ligas β' não encontram uso comercial, pois sua estrutura é frágil. Entretanto, ligas nas quais a fase β' existe conjuntamente com a dúctil fase α são muito úteis (ASM HANDBOOK, 2002).

A Figura 8 mostra uma micrografia de um Latão 70/30, ou seja, com composição de 70% de cobre e 30% de zinco, próxima à do material utilizado neste trabalho.

Figura 8 – Micrografia do latão 70/30.



Fonte: SHAEFFER et al., 2011.

É possível notar a matriz α do latão, como esperado para esta liga após análise do diagrama do sistema Cu-Zn.

2.3. Tratamentos Térmicos

Segundo Chiaverini (1988), tratamento térmico é todo o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os metais em que são controladas condições como temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento visando-se alterar suas propriedades ou permitir características determinadas. Colpaert (2008) afirma que a utilização dos tratamentos térmicos pode ser considerada como o método mais comum de conseguir a alteração das propriedades mecânicas, físicas e mesmo químicas.

A estrutura do metal define as suas propriedades e os tratamentos térmicos visam permitir a modificação em maior ou menor grau da estrutura resultando na alteração de suas propriedades e características (CHIAVERINI, 1988).

O emprego de tratamentos térmicos é de importância fundamental e alguns objetivos essenciais deste emprego foram definidos por Chiaverini (1988): remoção de tensões (oriundas do resfriamento desigual, trabalho mecânico ou outra causa); aumento ou diminuição da dureza; aumento da resistência mecânica; melhora da ductilidade; melhora da usinabilidade; melhora da resistência ao desgaste; melhora das propriedades de corte; melhora

da resistência à corrosão; melhora da resistência ao calor; e modificação das propriedades elétricas e magnéticas. Diante de tais objetivos percebe-se a importância e a necessidade do emprego dos tratamentos térmicos.

De maneira geral, percebe-se que o emprego dos tratamentos térmicos visando a melhora de uma propriedade ou propriedades específicas acaba resultando no decréscimo de outras. Isso pode ser verificado, por exemplo, nos casos em que a melhora da ductilidade com o emprego de tratamentos térmicos acaba resultando em perdas de outras propriedades como dureza e resistência à tração. Diante disso, faz-se necessária a verificação e aplicação criteriosa do melhor tratamento térmico de modo a se atingir as propriedades desejadas e que as resultantes perdas em outras propriedades sejam reduzidas ou não afetem os requisitos essenciais necessários à aplicação final (CHIAVERINI, 1988).

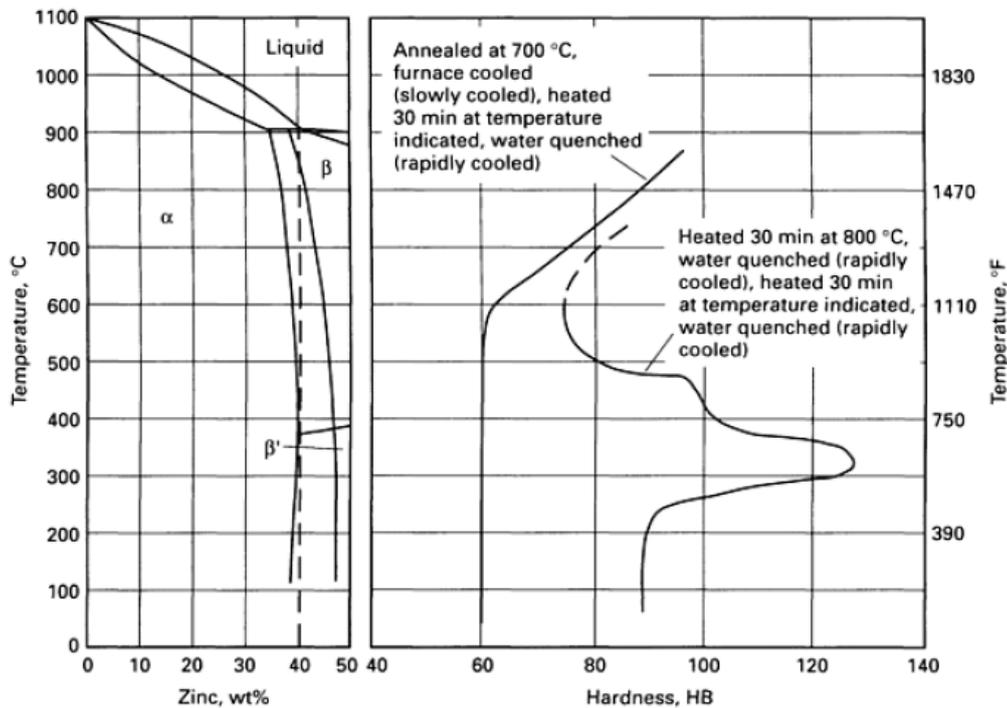
Em um contexto geral os tratamentos térmicos envolvem aquecimento e resfriamento e compreendem: recozimento, normalização, têmpera e revenimento. Neste trabalho será abordado apenas o tratamento de recozimento, que foi realizado nas amostras após deformação

O recozimento é um tratamento térmico realizado com o intuito de diminuir a dureza de metais e ligas. Esta técnica é aplicada a peças durante e após conformação com deformação mecânica e a peças fundidas. O processo inclui aquecimento, manutenção a determinada temperatura e resfriamento, sendo que devem ser especificados os seguintes parâmetros: taxa de aquecimento, temperatura, tempo à determinada temperatura, e taxa de resfriamento (ASM HANDBOOK, 2002).

Para o latão usado neste trabalho, liga C26800, a faixa de temperatura normalmente usada nos processos de recozimento desta liga variam de 425°C a 700°C, e o calor fornecido é de cerca de 375 kW.h/ton (ASM HANDBOOK, 2002).

A Figura 9 mostra um gráfico para uma liga com 40% de zinco que passou por processo de recozimento a 700°C, e foi então resfriada lentamente no forno.

Figura 9 – Variação da dureza do latão com os tratamentos térmicos de recozimento e de têmpera.



Fonte: ASM HANDBOOK, 2002.

Inicialmente, sua dureza era de pouco menos de 100HB. Após o processo, sua dureza diminuiu para 60HB. A seguinte etapa de têmpera não diz respeito a este trabalho.

2.4. Técnicas de Caracterização de Materiais

É de extrema importância a determinação e o estudo das várias propriedades de um material, para que o projeto tenha sucesso e não ocorram falhas. As propriedades dos materiais podem ser analisadas mediante a realização de cuidadosos ensaios laboratoriais. Estes, podem ser ensaios destrutivos, para avaliação das propriedades mecânicas de um material e/ou ensaios não destrutivos, os quais visam a análise microestrutural e/ou averiguação de não conformidades (CALLISTER JÚNIOR, 2008; SILVA e MEI, 2010). Os ensaios mecânicos podem ser utilizados para controle e monitoramento da produção, inspeção de produtos ou mesmo avaliação de novos materiais (SOUZA, 1982). De acordo com Silva & Mei (2010) para se medir as propriedades mecânicas de um material deve se ater aos seguintes fatores:

- Orientação em relação à direção de maior trabalho – Materiais que sofreram qualquer tipo de conformação são anisotrópicos, dessa forma suas propriedades mecânicas variam de acordo com a orientação do corpo de prova.
- Distância de superfícies livres – Por possuir uma microestrutura sensível à velocidade de resfriamento, a maioria dos aços tratados termicamente apresentarão propriedades diferentes em pontos mais próximos à superfície, que resfriarão mais rapidamente, em relação ao centro da peça.
- Posição em relação ao lingote ou ao produto de lingotamento contínuo – No lingotamento convencional há uma macrossegregação ao longo do comprimento, tornando o material não homogêneo, dessa forma tornando as propriedades também não homogêneas. Assim, deve-se eliminar a porção do material onde houve maior segregação. No caso do lingotamento contínuo, acontece uma segregação ao longo da espessura, também variando as propriedades do produto (SILVA e MEI, 2010).

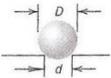
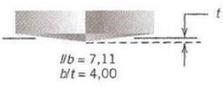
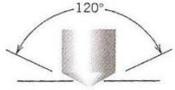
2.4.1. Ensaio de dureza

Outra propriedade muito importante é a dureza, que é uma medida de resistência a deformação plástica localizada. Basicamente o ensaio se resume em forçar um pequeno penetrador contra a superfície do material com carga e taxa de aplicação controladas. A impressão deixada pelo penetrador é medida e relacionada com um número de dureza (CALLISTER JUNIOR, 2008).

Segundo Callister Junior (2008), este ensaio é um dos mais utilizado, pois além de ser barato, não é destrutivo e pode estimular outras propriedades mecânicas como, por exemplo, o limite de resistência à tração.

Para a realização deste ensaio há várias técnicas, sendo mais comuns 4 delas: Rockwell, Brinell, microdureza Vickers e microdureza Knoop (CALLISTER JUNIOR, 2008). A Tabela 1 apresenta sucintamente essas técnicas.

Tabela 1 - Técnicas de ensaio de dureza.

Ensaio	Penetrador	Forma da Impressão		Carga	Fórmula para o Número de Dureza ^a
		Vista Lateral	Vista Superior		
Brinell	Esfera de aço com 10 mm ou carbeto de tungstênio			P	$HB = \frac{2P}{\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Microdureza Vickers	Pirâmide de diamante			P	$HV = 1,854P/d_1^2$
Microdureza Knoop	Pirâmide de diamante			P	$HK = 14,2P/l^2$
Rockwell e Rockwell Superficial	Cone de diamante; esferas de aço com diâmetros de $\frac{1}{16}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ in			60 kg	} Rockwell
				100 kg	
	150 kg				
	15 kg	} Rockwell Superficial			
	30 kg				
	45 kg				

^aPara as fórmulas de dureza fornecidas, P (a carga aplicada) está em kg, enquanto D, d, d₁ e l estão todos em mm.

Fonte: Adaptado de H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, *Mechanical Behavior*. Copyright © 1965 por John Wiley & Sons, New York. Reimpresso sob permissão de John Wiley & Sons, Inc.

Fonte: CALLISTER JUNIOR, 2008.

Segundo Silva e Mei (2010), para a realização do ensaio de forma correta, há cinco cuidados que devem ser levados em consideração. São Eles:

- Para evitar leituras falsas, deve-se realizar o ensaio sempre dentro dos parâmetros recomendados para cada escala de dureza;
- Ter especial atenção aos materiais muito macios ou peças muito finas. A profundidade da impressão deve ser menor do que dez vezes a espessura da peça ou da camada a ser testada;
- Se realizar mais de uma impressão, estas devem estar espaçadas de no mínimo 3 vezes a dimensão da maior indentação;
- Verificar se a peça está corretamente posicionada na bigorna do aparelho e também se a bigorna está bem posicionada no seu suporte;
- Realizar corretamente o preparo da superfície.

2.4.1.1. Ensaio de Microdureza Vickers

Para medição da dureza das amostras que foram preparadas neste trabalho, utilizou-se a técnica de microdureza Vickers. Para tal, utiliza-se um penetrador piramidal de base quadrada, o qual possui angulação de 136° e é confeccionado em diamante, sendo praticamente indeformável, podendo ser aplicado à uma diversidade de materiais metálicos. A

carga de penetração varia entre 1gf e 1000gf, sendo o indentador muito pequeno, daí a denominação microdureza (CALLISTER JÚNIOR, 2008). A impressão gerada é analisada com auxílio de um microscópio e são registrados os valores das diagonais da impressão, a qual tem o formato aproximado de um losango. Disposto das medições realizadas, são feitos os devidos cálculos, conforme mostrado na Tabela 1, para que se encontre o valor da dureza Vickers (HV). Recomenda-se a medição em mais de um ponto, para que se encontre a média, o que gera maior confiabilidade aos valores encontrados (SOUZA, 1982; CALLISTER JÚNIOR, 2008).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição Geral do Trabalho

O intuito principal deste trabalho foi verificar as variações no comportamento plástico e no encruamento do latão Cu-Zn 34 após submetido a diferentes rotas de processamento mecânico. Sendo assim, foi realizada a confecção de corpos de prova e a caracterização do material em seu estado inicial através de ensaio metalográfico e da técnica de microdureza Vickers. O material foi então submetido às seguintes rotas de processamento:

- Rota 1: Material como Recebido/Cisalhamento Direto e Reverso;
- Rota 2: Calandragem/Cisalhamento Direto e Reverso;
- Rota 3: Recozimento/Cisalhamento Direto e Reverso.

Foram gerados gráficos de tensão efetiva x deformação efetiva com a intenção de analisar a mudança no valor da tensão de escoamento do material para cada rota e assim constatar a influência do efeito Bauschinger no comportamento plástico do material, como também a influência do ângulo em relação à direção de laminação (anisotropia) e da amplitude da deformação efetiva (5%, 15% e 45%). O ensaio de microdureza Vickers foi também realizado no estado final com o intuito de identificar a variação na dureza das amostras após terem sido submetidas a cada rota de processamento mecânico. O efeito Bauschinger (EB) foi calculado com o uso da fórmula apresentada na equação 5. Sendo que $\tau_{FinalDir}$ é o último valor de tensão obtido para o cisalhamento direto antes de se inverter a direção de carregamento, e τ_{EscRev} é a tensão de escoamento para o cisalhamento reverso.

$$EB = \tau_{FinalDir} - \tau_{EscRev} \quad (5)$$

Ademais, foram plotados os gráficos de Taxa de encruamento normalizada x Deformação efetiva para as amostras que foram submetidas à amplitude de deformação de 45% para todas as situações de carregamento mecânico. Os expoentes de encruamento (n) tanto para o cisalhamento direto quanto para o cisalhamento reverso foram calculados como sendo o menor valor de deformação efetiva alcançada para um valor de taxa de encruamento menor que 1, segundo técnica mencionado por Dieter(1981).

3.2. Material

Para esse trabalho foi utilizada uma chapa de latão Cu-Zn 34 fabricada por laminação a frio, com 1 mm de espessura e aproximadamente 500 mm de comprimento x 150 mm de largura. A chapa foi cortada para confeccionar os corpos de prova, como será detalhado na seção 3.3. Esta liga possui propriedades mecânicas ligeiramente inferiores às do latão C26000, também denominado C260, porém seu custo de fabricação é menor, sendo utilizada como alternativa ao uso daquela liga, em aplicações nas quais os requisitos de propriedades mecânicas não são tão importantes e o custo de fabricação é um fator determinante. Sua composição química, aproximadamente, é a seguinte: 66% de cobre; 34% de zinco; cerca de 0,15% de chumbo, cerca de 0,05% de ferro e 0,15% de outros elementos (ROMÁN, 2010).

3.3. Corpos de Prova

A chapa foi cortada em corpos de prova retangulares com as seguintes dimensões: 50 mm de comprimento, e 1 mm de espessura. O corte das amostras foi feito com o auxílio da guilhotina de marca PEXTO modelo U-136-D, que pode ser visualizada na Figura 10. As amostras foram cortadas em três direções diferentes formando angulações de 0°, 90° e 135° em relação à direção de laminação da chapa. Tais ângulos constituíram um dos parâmetros que foram estudados neste trabalho como fatores que podem alterar o comportamento mecânico e o encruamento do latão Cu-Zn 34.

Figura 10 – Guilhotina da marca PEXTO modelo U-136-D utilizada para cortar os corpos de prova.



Fonte: Produzida pelo autor.

A Figura 11 mostra uma foto de um dos corpos de prova anteriormente à realização dos ensaios com dimensão média de 50mm de comprimento, 15mm de largura total, 3,5mm de largura efetiva submetida ao ensaio de cisalhamento e espessura de 1mm.

Figura 11 – Corpos de prova de latão Cu-Zn 34.



Fonte: Produzida pelo autor.

3.4. Caracterização do Material no Estado Inicial

Para melhorar o monitoramento dos resultados realizou-se a caracterização metalográfica e o ensaio de microdureza Vickers no material em estado inicial como recebido. A preparação metalográfica foi conduzida no Laboratório de Metalografia do Departamento de Engenharia de Materiais. Inicialmente as amostras foram embutidas a frio com acrílico autopolimerizante. Posteriormente, as amostras foram lixadas empregando lixas de granulometrias de #240, #320, #400 e #600 e depois polidas em panos especiais para metais não-ferrosos de 9 μm e 3 μm . Depois de polidas, as amostras foram atacadas com o reagente Di Cobre, de seguinte receita: 24mL de H_2SO_4 concentrado, 6g de dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), 12mL de NaCl e 300mL de água destilada (ASM HANDBOOK, 2002); de forma a revelar a microestrutura no microscópio óptico. A Figura 12 apresenta, respectivamente, a lixadeira da marca Struers e a politriz também da marca Struers, modelo DP9, que foram utilizadas.

Figura 12 – Equipamentos utilizados para o lixamento e o polimento dos corpos de prova.



(a) Lixadeira Struers, (b) Politriz Struers modelo DP9.

Fonte: Produzida pelo autor.

O microscópio óptico da marca Kontrol modelo IM713 localizado no Laboratório de Metalografia do Departamento de Engenharia de Materiais foi empregado para fornecer imagens com ampliação de 200X.

Figura 13 – Microscópio óptico Kontrol modelo IM713.



Fonte: Produzida pelo autor.

Para a realização da microdureza, a amostra foi lixada para tornar a sua superfície mais adequada para a realização do ensaio. Para a determinação dos valores através do ensaio de microdureza, foi empregado o microdurômetro Vickers da marca Shimadzu e modelo 2T

localizado no Departamento de Engenharia de Materiais. Em cada amostra analisada foram realizadas um total de 12 medições, descartando o maior valor e o menor valor para o cálculo da média, de modo a possibilitar uma medida mais confiável. A carga utilizada no ensaio foi de 200 gf. A Figura 14 apresenta o microdurômetro empregado no ensaio.

Figura 14 – Microdurômetro Vickers da marca Shimadzu e modelo 2T.



Fonte: Produzida pelo autor.

3.5. Rotas de Processamento Mecânico

3.5.1. *Material como recebido / Cisalhamento Direto e Reverso*

A primeira rota de processamento consistiu em executar o ciclo cisalhamento direto/cisalhamento reverso para as amostras no estado como recebido, ou seja, sem sofrer nenhum tipo de tratamento térmico ou pré-deformação, exceto a trazida pela laminação a frio proveniente do fornecedor do material.

Tal rota foi utilizada como controle, para comparação com as outras duas rotas de deformação plástica.

Já o carregamento por cisalhamento cíclico foi realizado com o auxílio de um dispositivo acoplado à máquina de ensaios universais Instron 5582 com uso de um extensômetro do tipo agulhas com abertura total de 25mm e sistema de aquisição de dados Blue Hill 2, como pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 – Dispositivo acoplado à máquina de ensaios universais Instron 5582 para a realização de cisalhamento planar.



Fonte: Produzida pelo autor.

Neste ensaio foram aplicadas diferentes amplitudes de deformação para cada um dos ângulos em relação à direção de laminação (0° , 90° , 135°). As amplitudes de deformação utilizadas no ensaio foram de 0,05; 0,15 e 0,45 de deformação efetiva.

3.5.2. Calandragem / Cisalhamento Direto e Reverso

Tal rota foi realizada com o intuito de avaliar a influência da quantidade de pré-deformação, aplicada por uma calandra, no comportamento mecânico do latão Cu-Zn 34 após carregamento cíclico. A calandragem dos corpos de prova foi feita em uma calandra mecânica Imag com a utilização de cilindros de trabalho com diâmetro de 120mm lubrificadas com óleo, como mostrado na Figura 16.

Estabeleceu-se a seguinte rotina de trabalho na calandra para todas as amostras:

- 1º gap de 540° com 4 passes;
- 2º gap de 720° com 4 passes;
- 3º gap de 1080° com 4 passes.

Figura 16 – Calandra da marca Imag.



Fonte: Produzida pelo autor.

A quantidade de deformação efetiva em calandragem variou apesar de ter sido adotado os mesmos procedimentos para a execução dos experimentos. Deste modo obteve-se quantidade de deformação efetiva de 1,8%; 2,4%; 3,0%; 4,5%; 5,0%; 6,1%, 6,4% e 7,6%.

Após a calandragem, aplicou-se a deformação através de cisalhamento direto/cisalhamento reverso com o mesmo equipamento e as mesmas amplitudes de deformação usadas na rota 1 e mencionadas no item 3.5.1.

3.5.3. Recozimento / Cisalhamento Direto e Reverso

A rota recozimento/cisalhamento direto e reverso foi empregada com a finalidade de estudar o efeito que um tratamento térmico pode provocar nas propriedades mecânicas finais do material após passar por cisalhamento direto e reverso. Para a etapa do tratamento térmico de recozimento, utilizou-se forno elétrico da marca *Magnus* modelo N1040 presente no Laboratório de Tratamentos Térmicos do Departamento de Engenharia de Materiais e mostrado na Figura 17. A temperatura usada foi de 600°C, com tempo de permanência das amostras de 30 minutos e subsequente resfriamento no interior do próprio forno.

Figura 17 – Forno elétrico da marca *Magnus* modelo N1040 usado para promover tratamento térmico de recozimento.



Fonte: Produzida pelo autor.

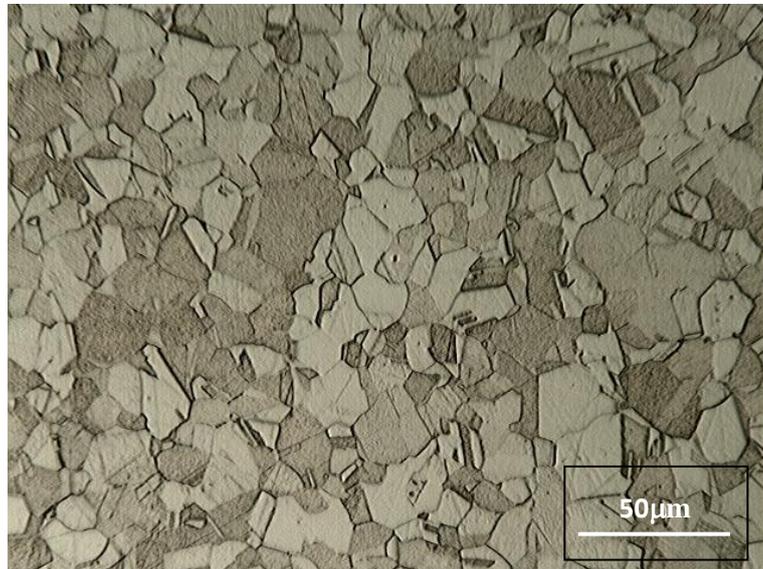
Após as amostras terem sido tratadas termicamente elas foram submetidas ao ciclo de cisalhamento direto/cisalhamento reverso com as mesmas condições de ensaio usadas para as duas rotas anteriores.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização do Material no Estado Inicial

Com a realização do ensaio metalográfico, obteve-se a micrografia da Figura 18, com um aumento de 200X. Como era esperado para um latão com 34% de zinco em sua composição, identificou-se a presença apenas de fase α .

Figura 18 – Micrografia do latão Cu-Zn 34 no estado inicial, com aumento de 200X.



Fonte: Produzida pelo autor.

O ensaio de microdureza Vickers levou à obtenção dos valores dispostos na Tabela 2, já com a retirada do maior valor e do menor valor. O valor médio da dureza Vickers calculado foi de 96,71HV, com um desvio padrão(σ) de 3,54.

Tabela 2 – Medidas obtidas para o ensaio de microdureza Vickers no estado inicial.

Medida	Dureza (HV)	Dureza (média)	σ
1 ^a	93,4		
2 ^a	95,5		
3 ^a	96,2		
4 ^a	97,0		
5 ^a	94,9		
6 ^a	99,7	96,71	3,54
7 ^a	103		
8 ^a	92,2		
9 ^a	93,2		
10 ^a	102		

Fonte: Produzida pelo autor.

4.2. Caracterização do Material no Estado Final

4.2.1. Ensaio de Dureza

Ensaio de microdureza Vickers também foram realizados nas amostras após passarem pelas três rotas de processamento mecânico com o intuito de verificar o efeito do modo de deformação na variação da dureza do latão Cu-Zn 34. Os valores obtidos para a dureza em todas as rotas, para as direções de solitação de 0°, 90° e 135°, assim como o valor obtido na condição inicial estão evidenciados na Tabela 3.

Os ensaios indicaram um aumento na dureza em comparação à medição feita no estado inicial. Os corpos de prova das rotas 2 e 3 apresentaram dureza semelhante, ambas maiores que os valores medidos para a rota 1. Cabe ressaltar que a não padronização da quantidade de deformação na escolha das amostras escolhidas para a realização do ensaio de dureza impediu uma análise mais comparativa dos dados coletados.

Tabela 3 – Medidas obtidas para o ensaio de microdureza Vickers no estado final.

Amostras	Dureza média (HV)	σ
Estado inicial	96,71	3,54
0° Cisalhamento Direto e Reverso 5%	104,39	3,25
90° Cisalhamento Direto e Reverso 15%	103,05	2,94
135° Cisalhamento Direto e Reverso 15%	119,20	7,81
0° Calandragem/ Cisalhamento Direto e Reverso 5%	150,00	3,87
90° Calandragem/ Cisalhamento Direto e Reverso 5%	153,00	4,00
135° Calandragem/ Cisalhamento Direto e Reverso 45%	159,00	8,09
0° Recozimento/ Cisalhamento Direto e Reverso 45%	153,30	14,80
90° Recozimento/ Cisalhamento Direto e Reverso 15%	175,5	9,34
135° Recozimento/ Cisalhamento Direto e Reverso 45%	121,6	6,51

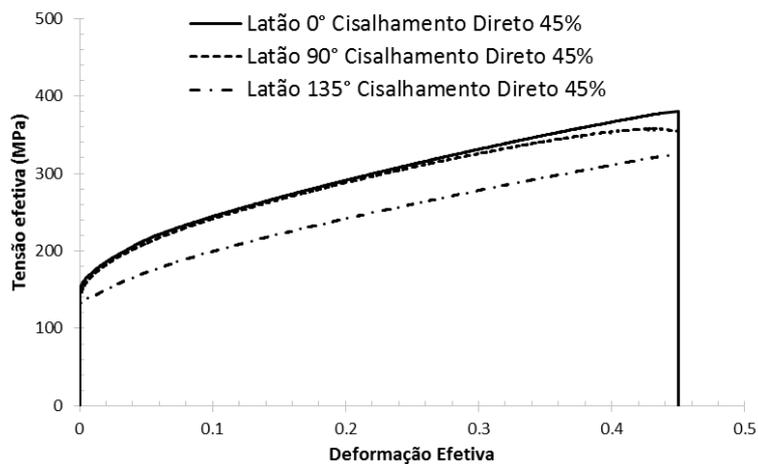
Fonte: Produzida pelo autor.

4.2.2 Anisotropia

As curvas Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva para o cisalhamento direto das amostras de 0°, 90° e 135° foram plotadas em um mesmo gráfico para permitir a análise das condições de anisotropia da chapa laminada a frio da qual foram cortados os corpos de prova. As Figuras 19, 20 e 21 ilustram o comportamento observado para as rotas 1, 2 e 3,

respectivamente. Constatou-se uma anisotropia considerável, sendo que amostras cortadas em maiores ângulos em relação à direção de laminação, tiveram uma menor resistência mecânica, com exceção da rota 3. Isso ocorre provavelmente devido à formação de uma orientação preferencial dos grãos durante o processo de laminação da chapa que serviu de matéria-prima para a confecção dos corpos de prova.

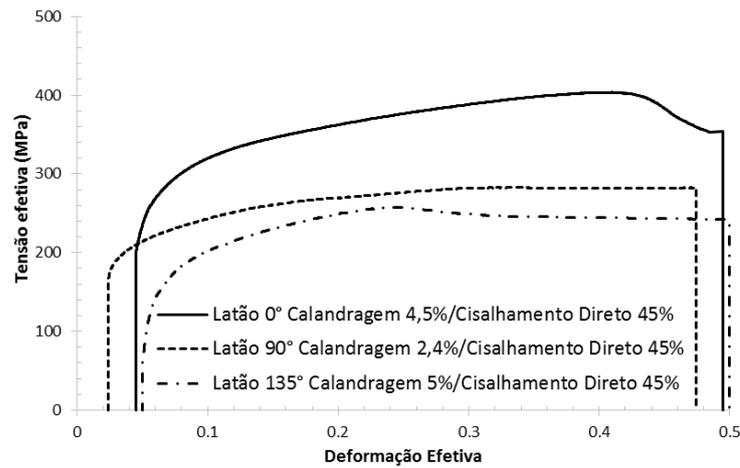
Figura 19 – Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva das amostras de 0°, 90° e 135° em cisalhamento direto para a rota 1.



Fonte: Produzida pelo autor.

A análise das amostras cisalhadas após a calandragem, Figura 20, não é específica uma vez que a quantidade de deformação prévia em calandragem foi diferente para as três amostras além, obviamente, do efeito da anisotropia em função da direção de sollicitação.

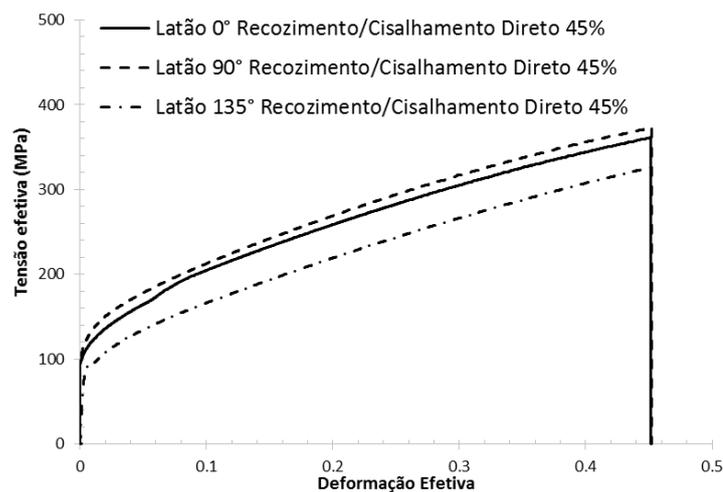
Figura 20 – Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva das amostras de 0°, 90° e 135° em cisalhamento direto para a rota 2.



Fonte: Produzida pelo autor.

Para as amostras recozidas e em seguida, cisalhadas, Figura 21, nota-se a anisotropia do latão devido ao posicionamento diferenciado das curvas em função da direção de sollicitação indicando ainda que a direção de 135° foi a que registrou a menor resistência mecânica e portanto, tende a ser a que deve vir a apresentar a menor magnitude do Efeito Bauschinger quando na análise dos resultados da rota 1 que serão apresentados seguir.

Figura 21 – Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva das amostras de 0°, 90° e 135° em cisalhamento direto para a rota 3.



Fonte: Produzida pelo autor.

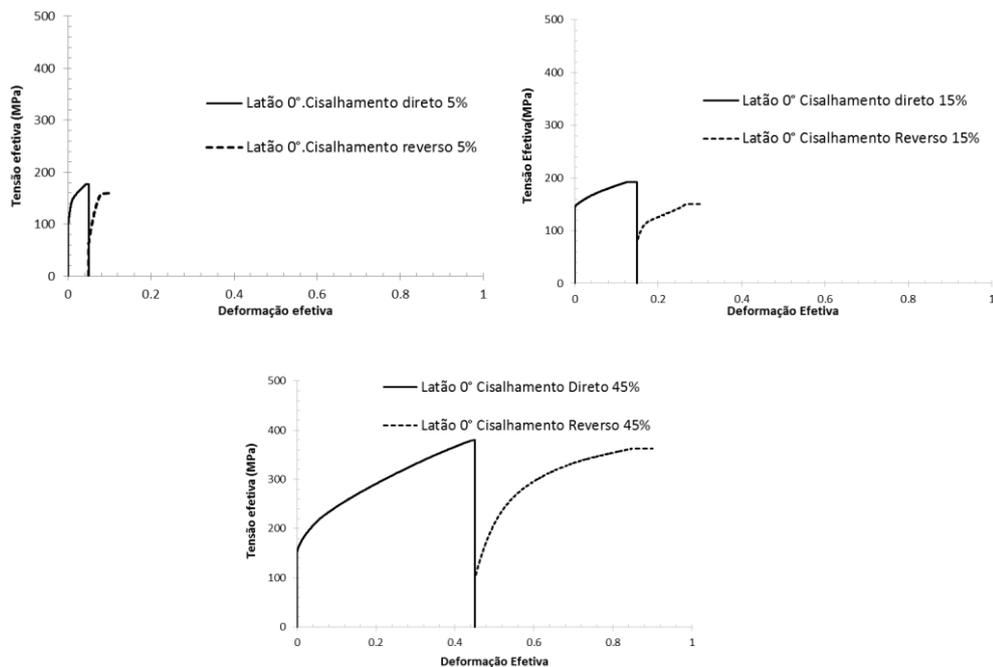
4.2.3 Efeito da Quantidade de Deformação no Comportamento Mecânico do latão Cu-Zn

Nesta seção encontram-se os gráficos de Tensão efetiva (MPa) x Deformação efetiva para os corpos de prova das rotas 1, 2 e 3 deformados a 0°, 90° e 135° em relação à direção de laminação e para as quantidades de deformação efetiva de 5%, 15% e 45%.

4.2.3.1 Material como recebido / Cisalhamento Direto e Reverso

Os gráficos obtidos para as amostras da rota 1 estão dispostos nas Figuras 22, 23 e 24.

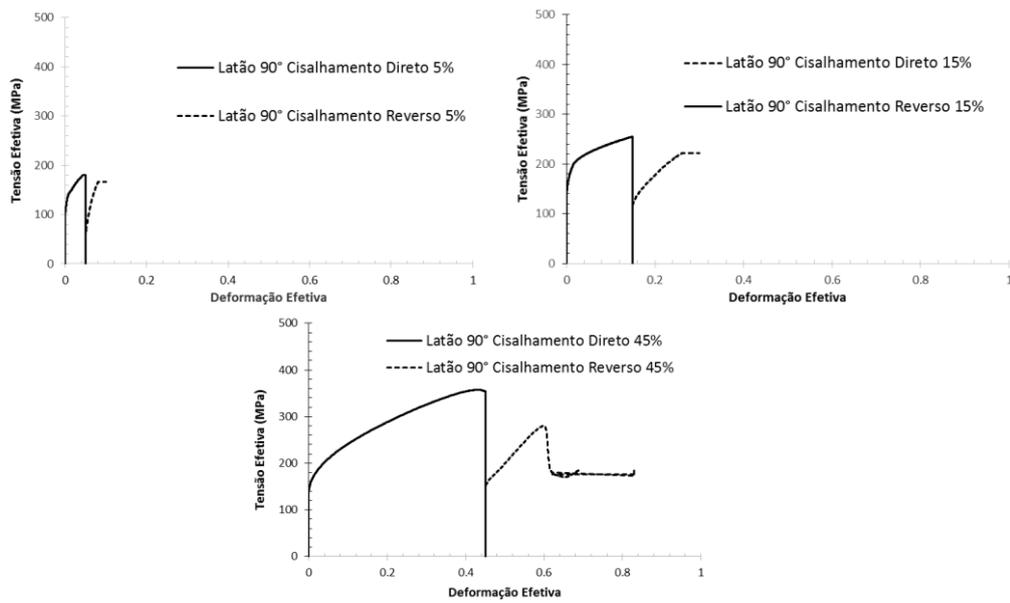
Figura 22 – Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva para as amostras de 0° da rota 1.



(a) Deformação de 5%, (b) Deformação de 15%, (c) Deformação de 45%

Fonte: Produzida pelo autor.

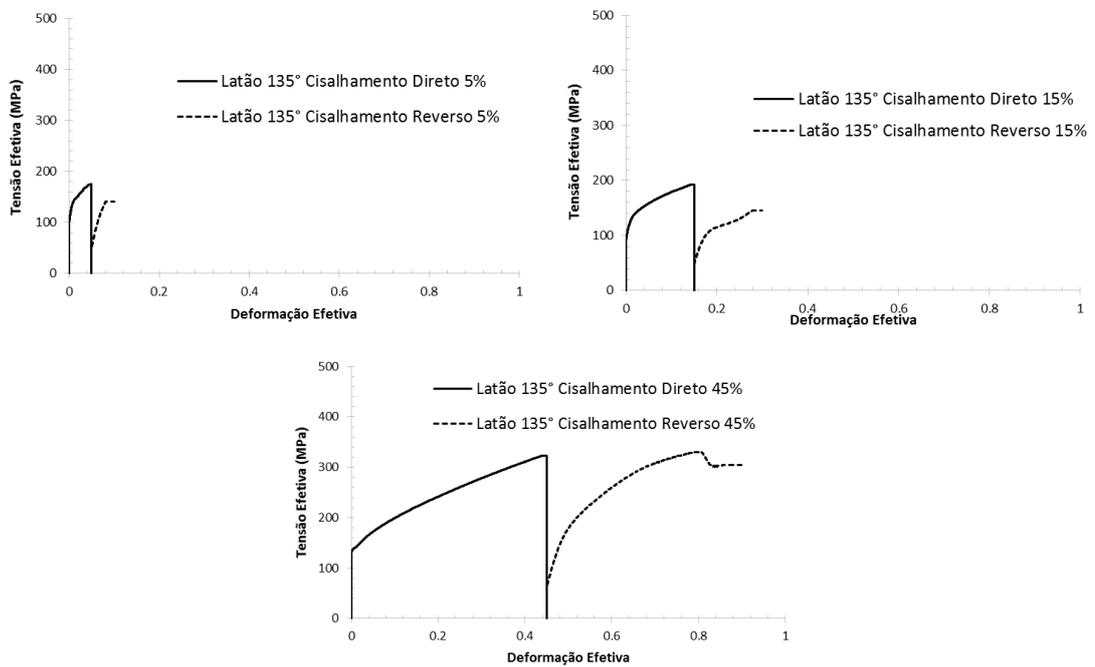
Figura 23 – Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva para as amostras de 90° da rota 1.



(a) Deformação de 5%, (b) Deformação de 15%, (c) Deformação de 45%

Fonte: Produzida pelo autor

Figura 24 – Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva para as amostras de 135° da rota 1.



(a) Deformação de 5%, (b) Deformação de 15%, (c) Deformação de 45%

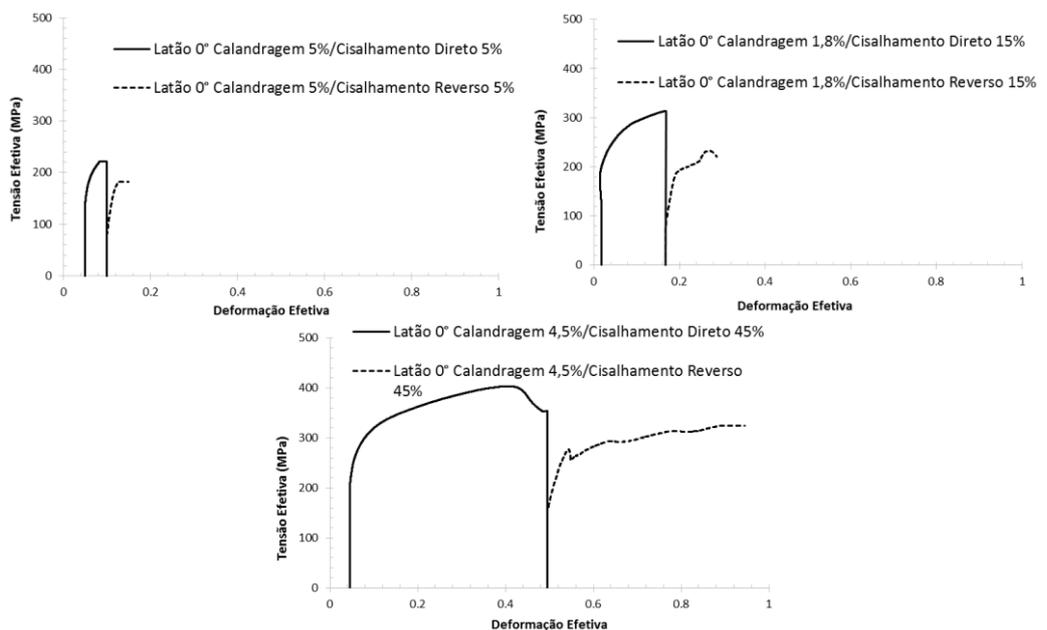
Fonte: Produzida pelo autor.

É possível notar pela análise das curvas a ocorrência do efeito Bauschinger, fenômeno que será mensurado e melhor analisado nas próximas sessões, condição essa que também identifica a ocorrência do encruamento anisotrópico.

4.2.3.2 Calandragem / Cisalhamento Direto e Reverso

Os gráficos obtidos para a rota 2 são mostrados nas Figuras 25, 26 e 27. Cabe ressaltar que devido à presença de pré-deformação de calandragem para essa rota, as curvas encontram-se deslocadas ligeiramente para a direita. Cada corpo de prova apresentou um valor específico de pré-deformação devido à dificuldade de se controlar a quantidade de deformação em calandragem mesmo estabelecendo uma rotina de procedimentos padrão. As quantidades de deformação para cada caso são mencionadas nos gráficos.

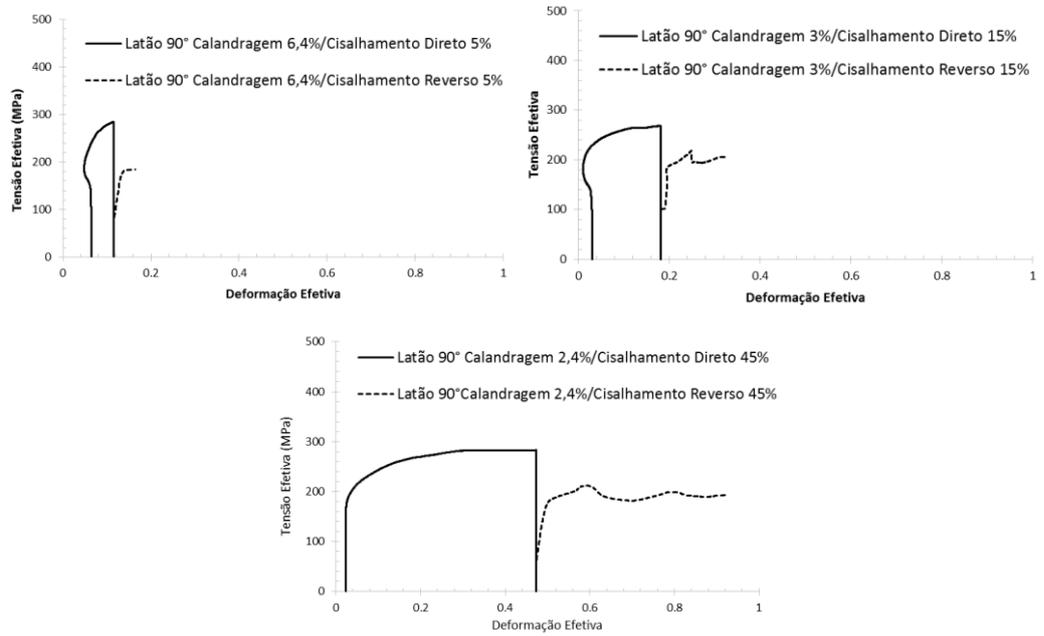
Figura 25 – Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva para as amostras de 0° da rota 2.



(a) Deformação de 5%, (b) Deformação de 15%, (c) Deformação de 45%

Fonte: Produzida pelo autor.

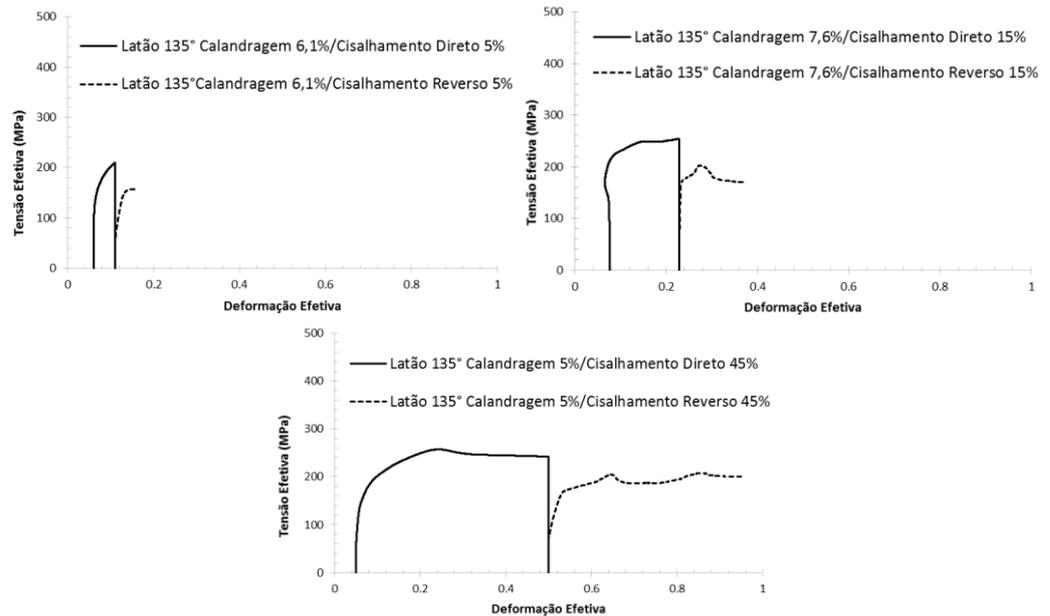
Figura 26 – Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva para as amostras de 90° da rota 2.



(a) Deformação de 5%, (b) Deformação de 15%, (c) Deformação de 45%

Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 27 – Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva para as amostras de 135° da rota 2.



(a) Deformação de 5%, (b) Deformação de 15%, (c) Deformação de 45%

Fonte: Produzida pelo autor.

A diferença básica entre as rotas 1 e 2 está relacionada com o acréscimo do encruamento para as amostras usadas na rota 2 que foram previamente deformadas em laminação (fora do laboratório) e por calandragem (no laboratório) enquanto para a primeira rota o material no estado como recebido estava apenas laminado.

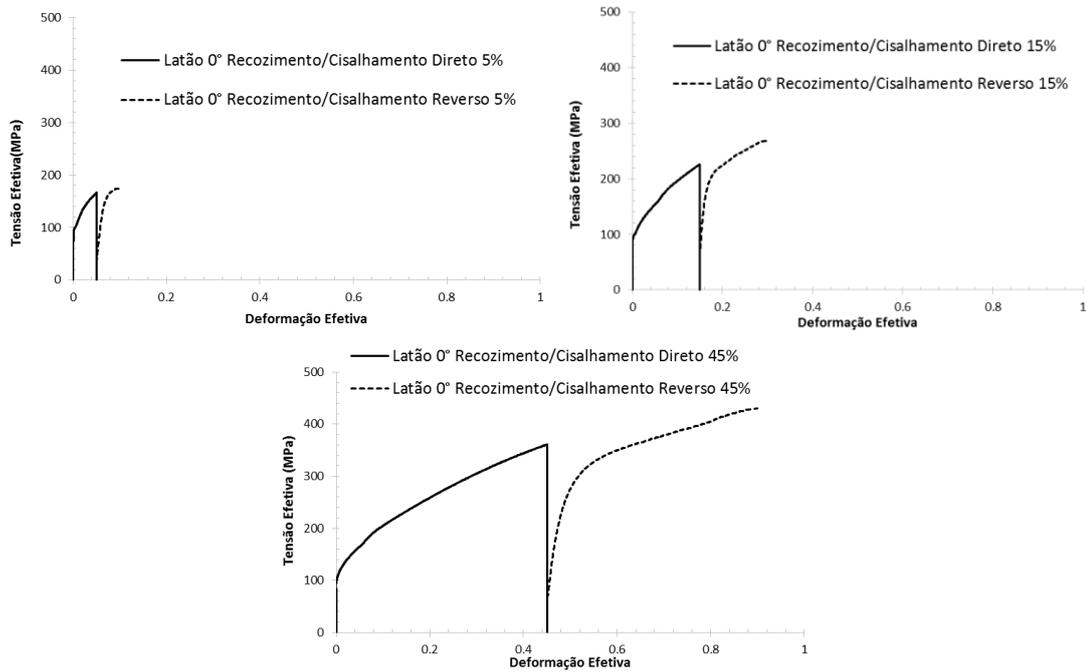
Apesar das diferenças das condições iniciais das duas amostras verificou-se a ocorrência do efeito Bauschinger para todas as amplitudes de deformação cíclica. Como previsto, pelo fato de o material ter sido pré-deformado em calandragem a magnitude do efeito Bauschinger entre os corpos de prova submetidos à rota 2 foi ligeiramente maior que o identificado durante a condução da rota 1, pois a inversão do modo de deformação plástica desestruturou uma subestrutura mais bem definida e organizada devido ao acréscimo da quantidade de deformação plástica.

Assim como na rota 1, alguns corpos de prova apresentaram um comportamento anômalo durante cisalhamento reverso, provavelmente devido ao escorregamento do extensômetro.

4.2.3.3 Recozimento / Cisalhamento Direto e Reverso

As curvas Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva para as amostras da rota 3 são apresentadas nas Figuras 28, 29 e 30, a seguir. É possível notar que os resultados do carregamento reverso para esta rota exibem menor irregularidade que para as outras duas rotas.

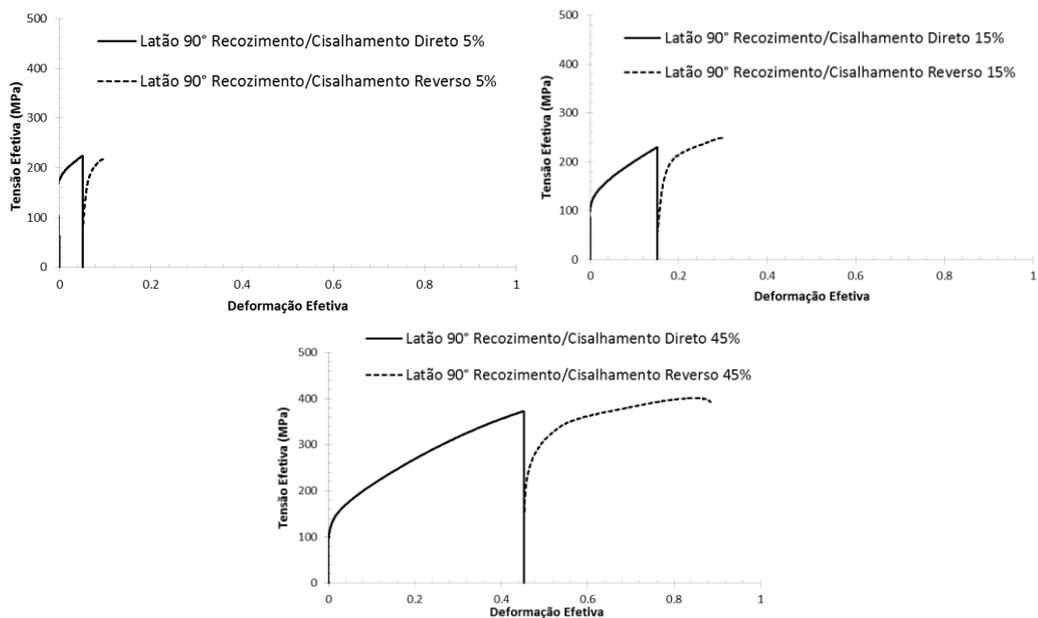
Figura 28 – Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva para as amostras de 0° da rota 3.



(a) Deformação de 5%, (b) Deformação de 15%, (c) Deformação de 45%

Fonte: Produzida pelo autor.

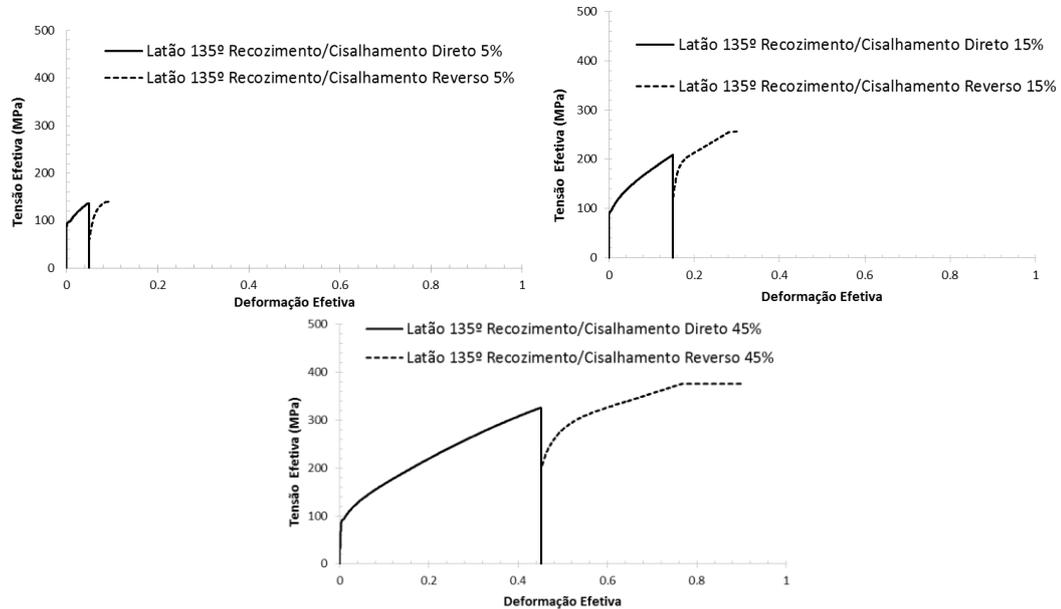
Figura 29 – Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva para as amostras de 90° da rota 3.



(a) Deformação de 5%, (b) Deformação de 15%, (c) Deformação de 45%

Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 30 – Gráficos Tensão efetiva(MPa) x Deformação efetiva para as amostras de 135° da rota 3.



(a) Deformação de 5%, (b) Deformação de 15%, (c) Deformação de 45%

Fonte: Produzida pelo autor.

De modo análogo verificou-se a ocorrência do Efeito Bauschinger para todas as amostras que foram antes submetidas ao recozimento pleno.

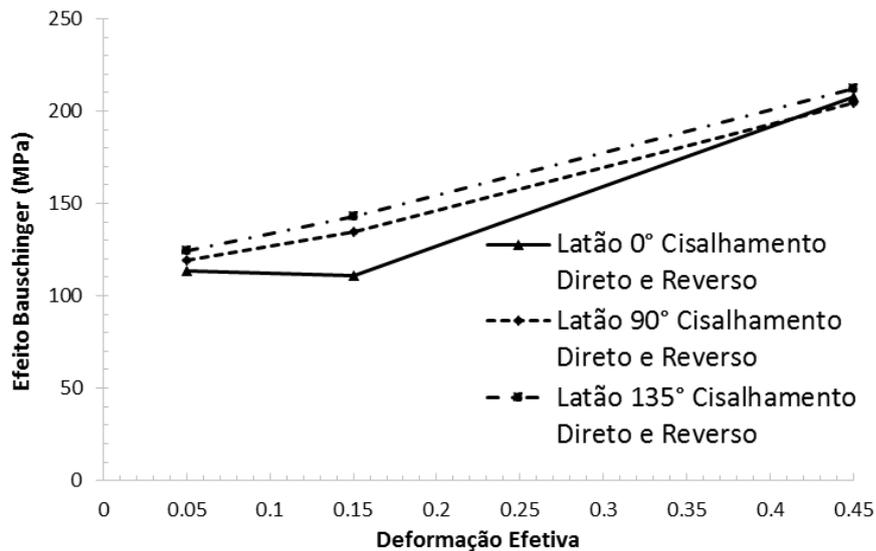
4.2.4 Efeito Bauschinger

Gráficos de Efeito Bauschinger (MPa) x Deformação efetiva foram traçados com a intenção de comparar os valores de EB calculados segundo a fórmula citada anteriormente. Os resultados obtidos para as rotas 1 e 3 mostram que, no geral, a anisotropia desse fenômeno com a direção de sollicitação mecânica, indicando a tendência de aumento do EB com o acréscimo do ângulo adotado para a realização dos ensaios de cisalhamento em relação à direção original das chapas.

As amostras da rota 2 possuíram um comportamento mais aleatório, provavelmente devido a irregularidades nos corpos de prova, já que alguns deles sofreram ligeiro encurvamento após operação de calandragem.

Para a rota 1 constatou-se a tendência de aumento do EB com a quantidade da amplitude de deformação efetiva para todas as direções de solitação mecânica.

Figura 31 – Gráficos do Efeito Bauschinger na rota 1 para todos os ângulos em cada uma das quantidades de deformação.

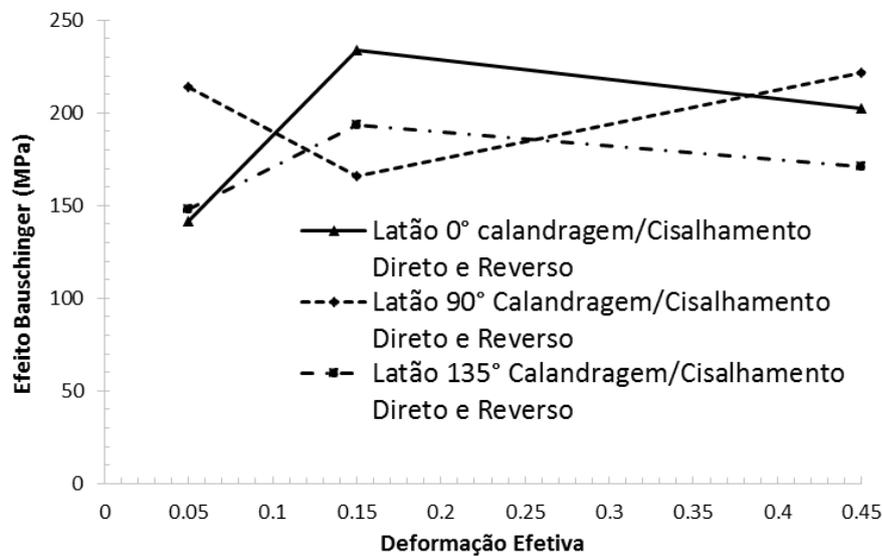


Fonte: Produzida pelo autor.

Para a rota composta pela combinação da calandragem com o cisalhamento cíclico verificou-se ainda a anisotropia do EB com a direção de solitação mecânica, Figura 32. No entanto, não foi possível identificar claramente uma tendência de comportamento quanto à progressão desse fenômeno com a quantidade de amplitude de deformação cíclica.

Nota-se a tendência de aumento do EB até a amplitude de deformação efetiva de 0,15 para em seguida reduzir para as direções de 0° e 135°. No entanto, essa dispersão do resultado sugere a condição irregular dos corpos de prova. O empeno e a desigualdade de deformação praticada nas amostras dificultam o estabelecimento de uma tendência de comportamento para essa rota de processamento mecânico.

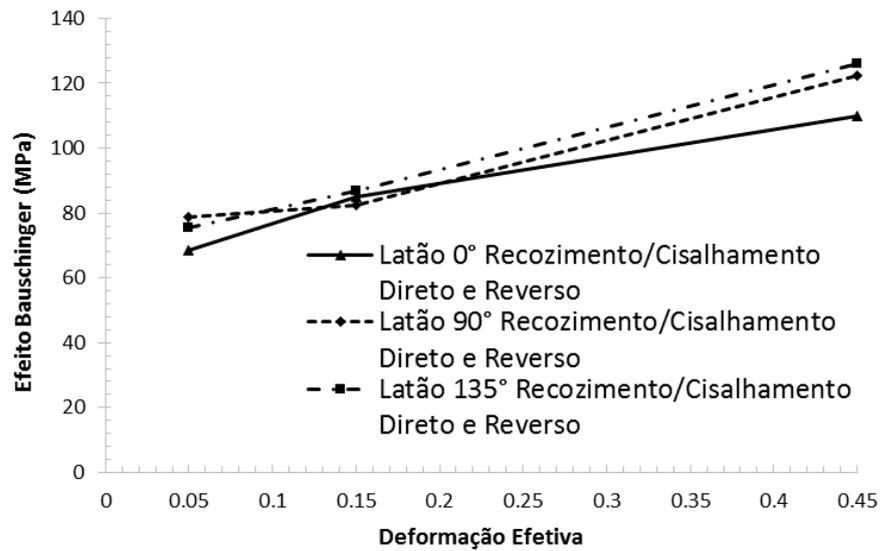
Figura 32 – Gráficos do Efeito Bauschinger na rota 2 para todos os ângulos em cada uma das quantidades de deformação.



Fonte: Produzida pelo autor.

Por fim é apresentada na Figura 33 a evolução do Efeito Bauschinger para a rota recozimento/cisalhamento direto/ cisalhamento reverso. A similaridade dessa rota com as demais está associada ao fato do aumento do EB com o acréscimo da amplitude de deformação cíclica em cisalhamento, pois de modo geral, quanto mais encruado o material, maior tende a ser o respectivo Efeito Bauschinger pelo fato da inversão do modo de deformação plástica propiciar um desarranjo em uma subestrutura de discordâncias cada vez mais bem definida e típica do respectivo modo de deformação.

Figura 33 – Gráficos do Efeito Bauschinger na rota 3 para todos os ângulos em cada uma das quantidades de deformação.



Fonte: Produzido pelo autor.

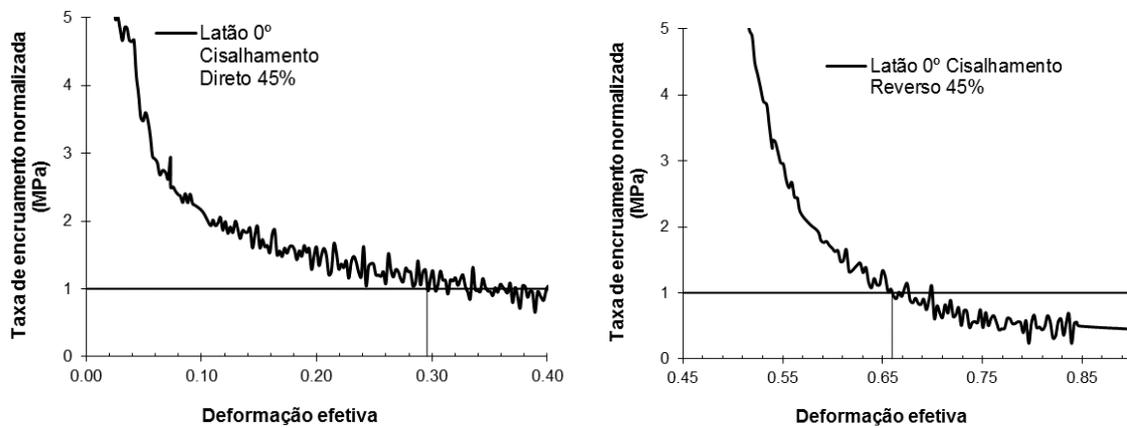
Diante do exposto percebe-se pela análise da Figura 33 que dentre as três rotas de carregamento adotadas para este trabalho a rota 3 foi a que exibiu o menor valor para o Efeito Bauschinger pelo fato de nessa condição o estado prévio do material ser o recozimento.

4.2.5 Encruamento

Para avaliar o comportamento do latão Cu-Zn 34 em termos de encruamento, foram feitos gráficos de Taxa de encruamento normalizada x Deformação efetiva, que estão mostrados nas Figuras 34 a 42.

Curvas foram traçadas para a análise do expoente de encruamento após o cisalhamento direto e o cisalhamento reverso para direção de solicitação mecânica. Foram usados os dados das amostras que sofreram amplitude de deformação de 45%.

Figura 34 – Gráficos de Taxa de encruamento normalizada(MPa) x Deformação efetiva para a amostra de 0° da rota 1.

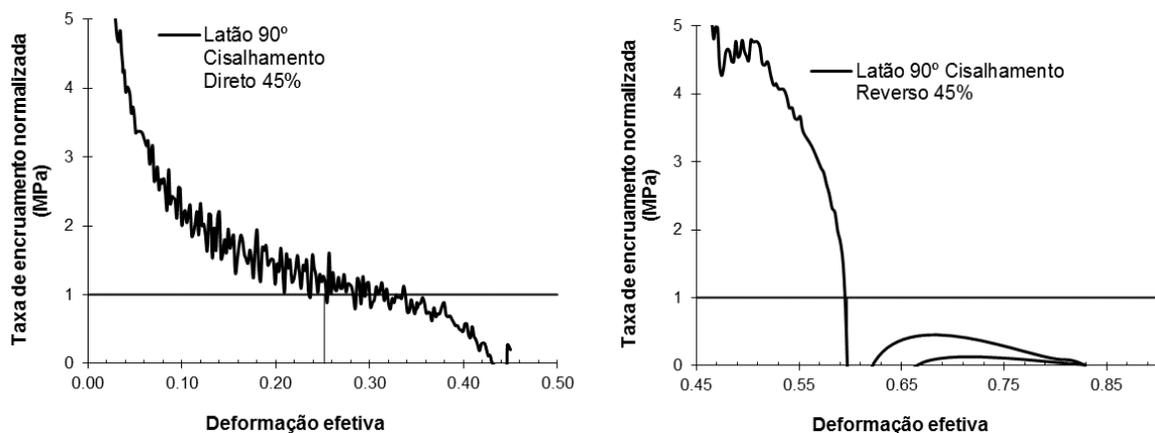


(a) Cisalhamento Direto, (b) Cisalhamento Reverso

Fonte: Produzida pelo autor.

Para determinar o valor correto do expoente de encruamento no caso de cisalhamento reverso, descontou-se o valor da pré-deformação por cisalhamento direto, para todos os corpos de prova. Portanto, no caso da amostra de 0° da rota 1, descontando-se 0,45 do valor mostrado na Figura 34, obtém-se um expoente de encruamento de 0,2095. Por sua vez, o expoente de encruamento para o cisalhamento direto é de 0,2957.

Figura 35 – Gráficos de Taxa de encruamento normalizada(MPa) x Deformação efetiva para a amostra de 90° da rota 1.

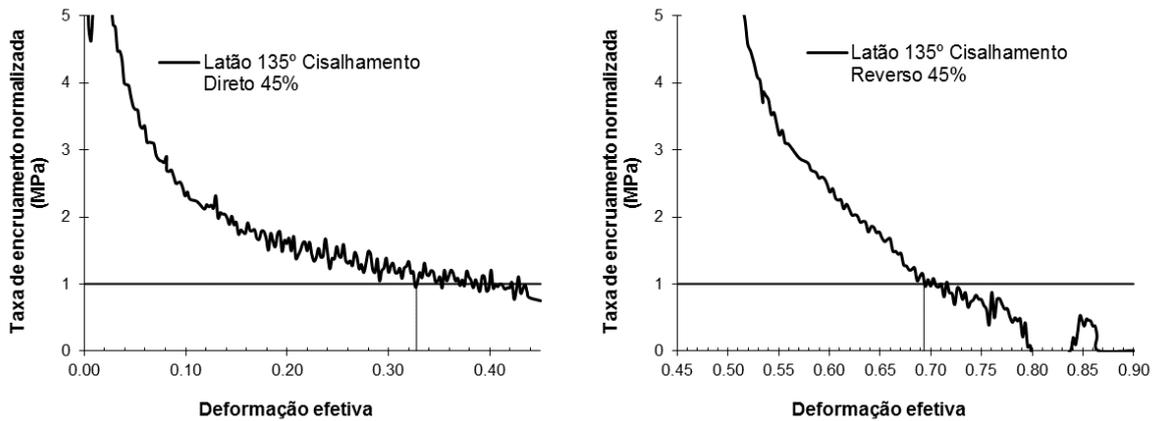


(a) Cisalhamento Direto, (b) Cisalhamento Reverso

Fonte: Produzida pelo autor.

Para a amostra de 90° da rota 1, descontando-se 0,45 do valor mostrado na Figura 35, obtém-se um expoente de encruamento para cisalhamento reverso de 0,2518 e um expoente de encruamento para cisalhamento direto de 0,3275.

Figura 36 – Gráficos de Taxa de encruamento normalizada(MPa) x Deformação efetiva para a amostra de 135° da rota 1.

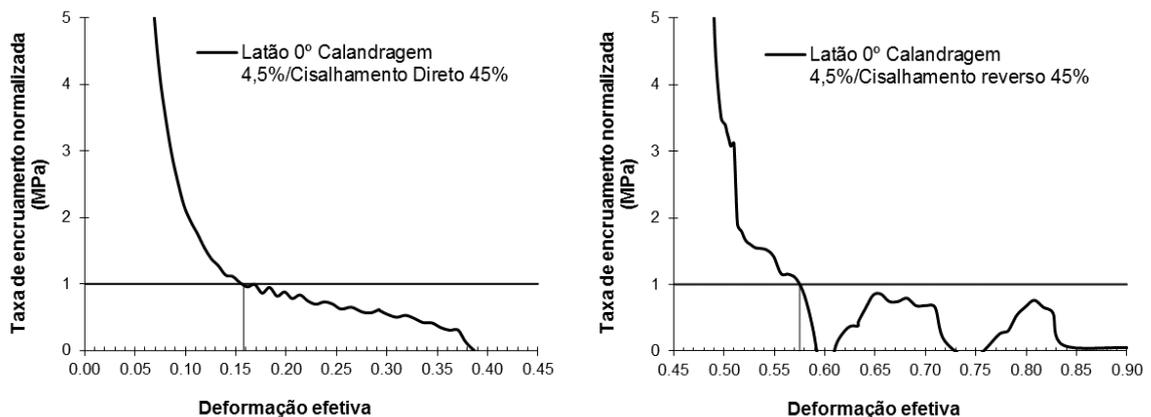


(a) Cisalhamento Direto, (b) Cisalhamento Reverso

Fonte: Produzida pelo autor.

No caso da amostra de 135° da rota 1, ao descontar-se 0,45 do valor evidenciado na Figura 36, obtém-se um expoente de encruamento para cisalhamento reverso de 0,2432. Enquanto o expoente de encruamento para o regime de cisalhamento direto é de 0,3275.

Figura 37 – Gráficos de Taxa de encruamento normalizada(MPa) x Deformação efetiva para a amostra de 0° da rota 2.

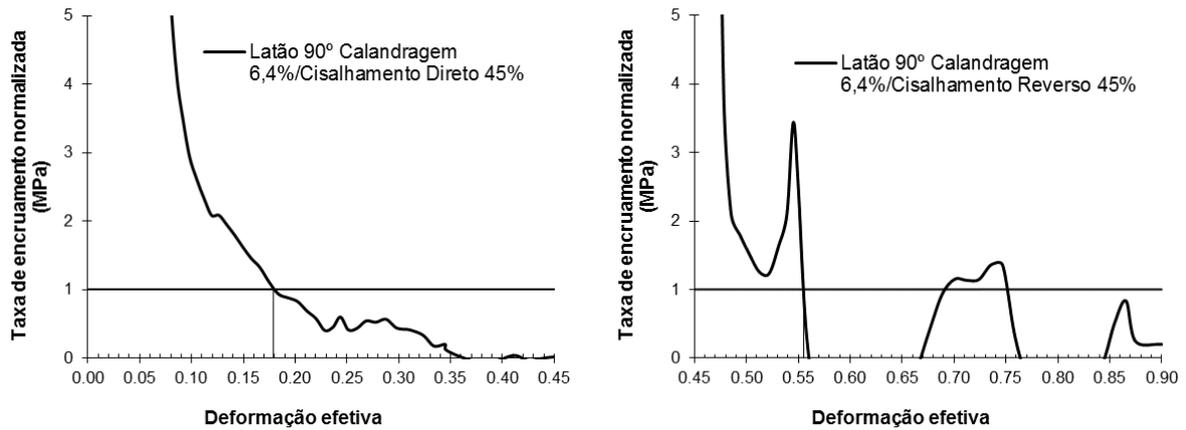


(a) Cisalhamento Direto, (b) Cisalhamento Reverso

Fonte: Produzida pelo autor.

O corpo de prova de 0° da rota 2, apresentou, após descontado 0,45 do valor mostrado na Figura 37, um expoente de encruamento para cisalhamento reverso de 0,1252. O expoente de encruamento calculado para cisalhamento direto foi de 0,1579.

Figura 38 – Gráficos de Taxa de encruamento normalizada(MPa) x Deformação efetiva para a amostra de 90° da rota 2.

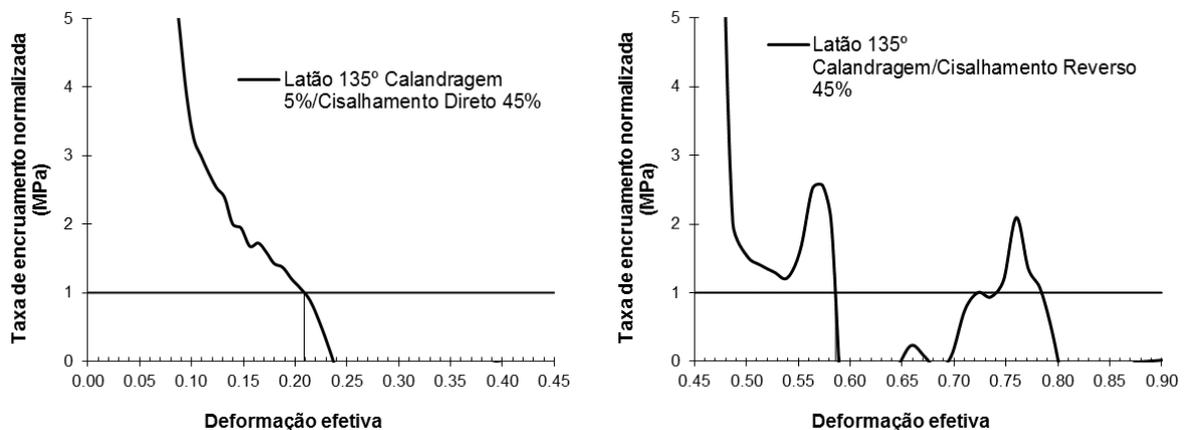


(a) Cisalhamento Direto, (b) Cisalhamento Reverso

Fonte: Produzida pelo autor.

Para a amostra de 90° da rota 2, Figura 38, o expoente de encruamento para cisalhamento reverso é de 0,1051 e para cisalhamento direto foi de 0,1790.

Figura 39 – Gráficos de Taxa de encruamento normalizada(MPa) x Deformação efetiva para a amostra de 135° da rota 2.

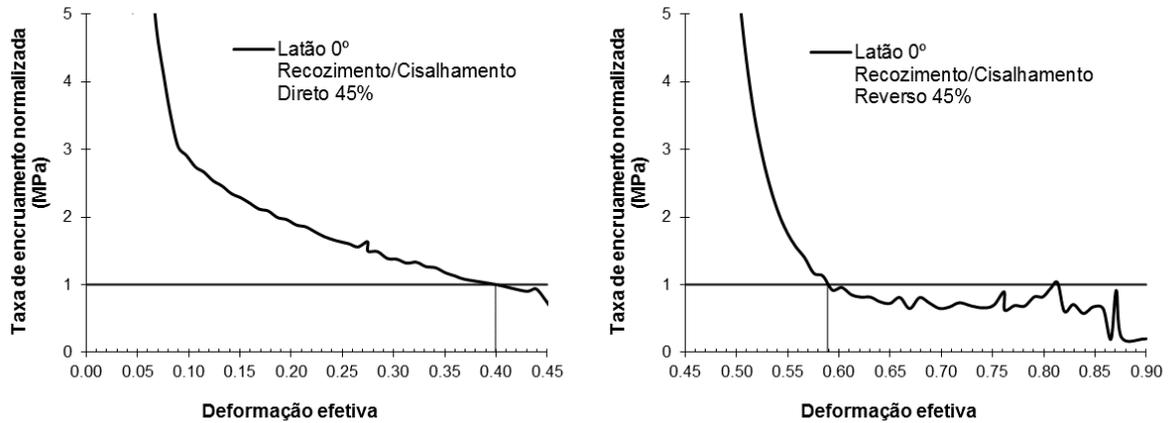


(a) Cisalhamento Direto, (b) Cisalhamento Reverso

Fonte: Produzida pelo autor.

A Figura 39, mostra os gráficos obtidos para a amostra de 135° da rota 2, que apresentou, após os devidos cálculos, expoente de encruamento para cisalhamento reverso de 0,1360 e para cisalhamento direto de 0,2088.

Figura 40 – Gráficos de Taxa de encruamento normalizada(MPa) x Deformação efetiva para a amostra de 0° da rota 3.

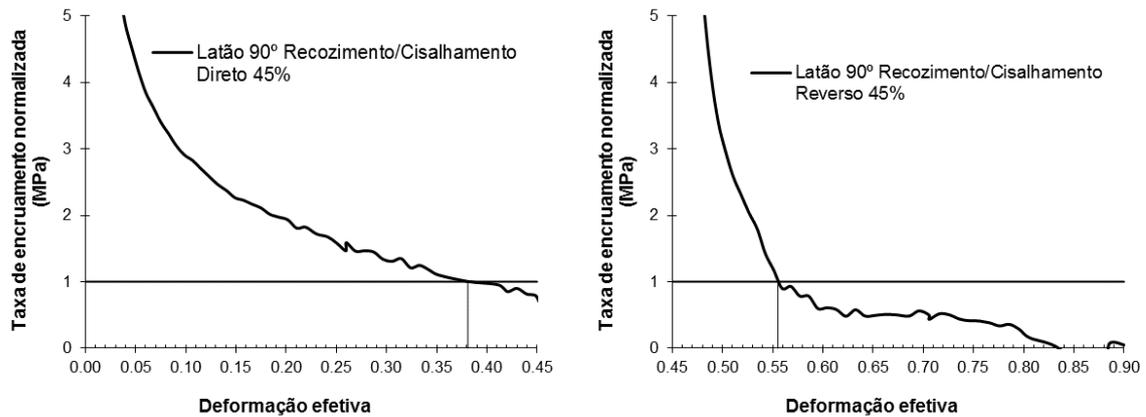


(a) Cisalhamento Direto, (b) Cisalhamento Reverso

Fonte: Produzida pelo autor.

O corpo de prova de 0° da rota 3, que tem seus gráficos mostrados na Figura 40, teve expoente de encruamento para cisalhamento reverso de 0,1374 e para cisalhamento direto de 0,3995.

Figura 41 – Gráficos de Taxa de encruamento normalizada(MPa) x Deformação efetiva para a amostra de 90° da rota 3.

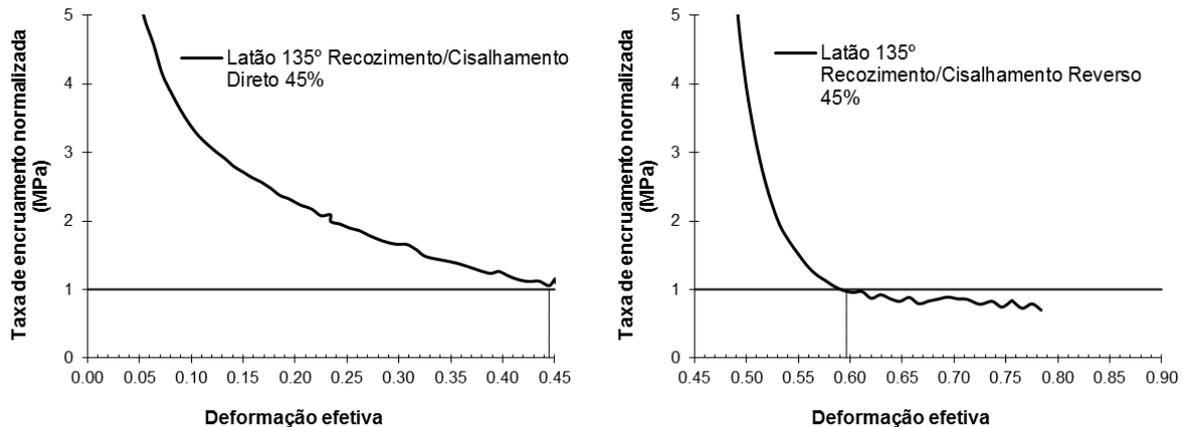


(a) Cisalhamento Direto, (b) Cisalhamento Reverso

Fonte: Produzida pelo autor.

A amostra de 90° da rota 3, apresentou, após descontado 0,45 do valor mostrado na Figura 41, um expoente de encruamento para cisalhamento reverso de 0,1033. O expoente de encruamento calculado para cisalhamento direto, por sua vez, foi de 0,3810.

Figura 42 – Gráficos de Taxa de encruamento normalizada(MPa) x Deformação efetiva para a amostra de 135° da rota 3.



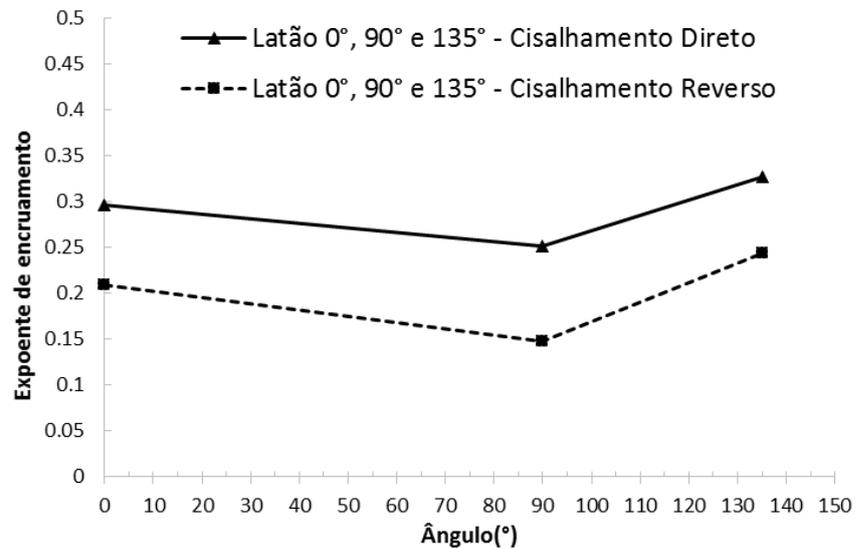
(a) Cisalhamento Direto, (b) Cisalhamento Reverso

Fonte: Produzida pelo autor.

No caso da amostra de 135° da rota 3, ao descontar-se 0,45 do valor mostrado na Figura 42, obteve-se um expoente de encruamento para cisalhamento reverso de 0,1453. Enquanto o expoente de encruamento para o regime de cisalhamento direto é de 0,4446.

Os valores obtidos para os expoentes de encruamento, calculados com o auxílio das Figuras 34 a 42, foram dispostos nos gráficos das Figuras 43 a 45, examinando-se sua variação de acordo com o ângulo em relação à direção de laminação e separando-se as curvas de cisalhamento direto e cisalhamento reverso.

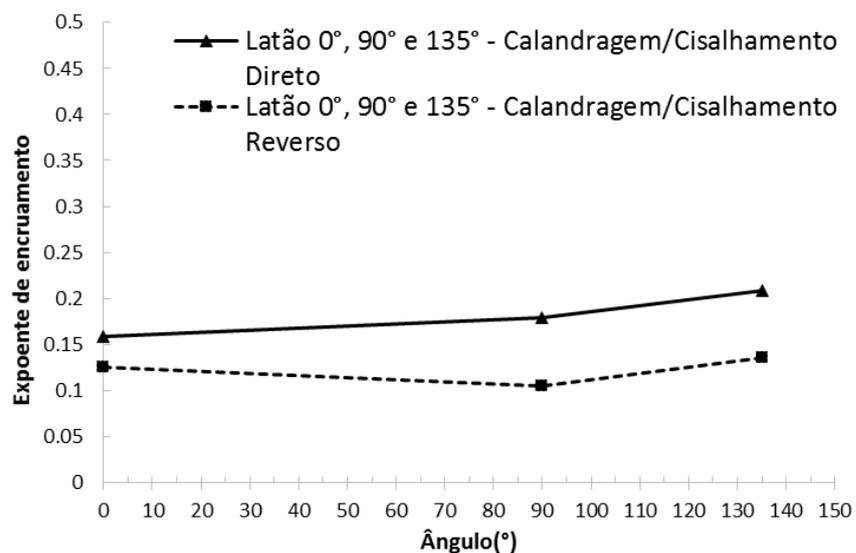
Figura 43 – Expoentes de encruamento calculados para cada ângulo em cisalhamento direto e reverso na rota 1.



Fonte: Produzida pelo autor.

Para a rota de processamento cisalhamento direto / cisalhamento reverso, evidenciada na Figura 43, nota-se uma tendência de diminuição do expoente de encruamento com o aumento do ângulo em relação à direção de laminação, até 90°. De 90° para 135° há um aumento do expoente de encruamento.

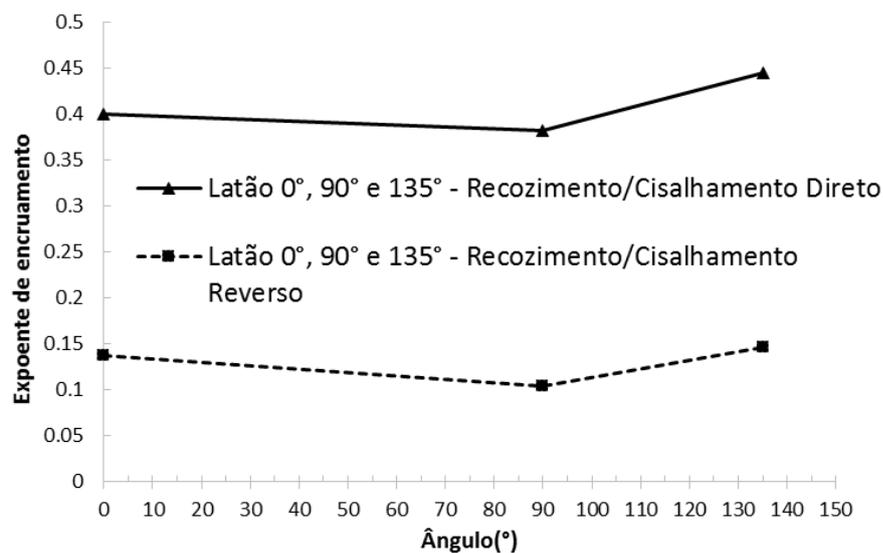
Figura 44 – Expoentes de encruamento calculados para cada ângulo em cisalhamento direto e reverso na rota 2.



Fonte: Produzida pelo autor.

No caso da rota de processamento calandragem / cisalhamento direto / cisalhamento reverso, assim como ocorreu para os outros parâmetros analisados, os dados de expoente de encruamento mostraram não seguir um comportamento padrão, o que pode ser visto na Figura 44. A curva para o cisalhamento direto das amostras da rota 2 foi a única na qual o corpo de prova de 90° não obteve o menor valor de expoente de encruamento.

Figura 45 – Expoentes de encruamento calculados para cada ângulo em cisalhamento direto e reverso na rota 3.



Fonte: Produzida pelo autor.

Por fim, pela rota recozimento / cisalhamento direto / cisalhamento reverso é possível traçar um comportamento similar ao apresentado pela rota cisalhamento direto / cisalhamento reverso. Também observa-se que esta foi a rota na qual a diferença entre os valores obtidos para cisalhamento direto e para cisalhamento reverso foi mais pronunciada, provavelmente devido ao efeito do recozimento.

5 CONCLUSÕES

- As três rotas de processamento mecânico provocaram um acréscimo no valor da dureza do latão Cu-Zn 34 para todos os parâmetros de ensaio.
- O ligeiro encurvamento de algumas das amostras após submetidas à calandragem, como também a não padronização de uma quantidade de deformação de calandragem, resultaram em uma certa aleatoriedade dos dados de Efeito Bauschinger obtidos para essa rota.
- As amostras cortadas em maiores ângulos em relação à direção de laminação obtiveram maior valor de Efeito Bauschinger para as rotas 1 e 3 e menor resistência mecânica quando submetidas a cisalhamento direto para as rotas 1 e 2.
- As amostras da rota 2 apresentaram maior efeito Bauschinger e encruaram mais se comparadas às amostras da rota 1. Isso se deve à presença de etapa extra de pré-deformação por calandragem na rota 2.
- Há uma tendência de aumento do EB com o acréscimo da amplitude de deformação cíclica em cisalhamento pois de modo geral, pelo fato da inversão do modo de deformação plástica propiciar um desarranjo em uma subestrutura de discordâncias cada vez mais bem definida e típica do respectivo modo de deformação
- Quando submetido a cisalhamento direto, o material possui maior expoente de encruamento que quando submetido à situação de cisalhamento reverso.
- No geral, os corpos de prova cortados perpendicularmente à direção de laminação apresentaram menor expoente de encruamento.

REFERÊNCIAS

- ASM HANDBOOK. **Heat treating**. Ohio: ASM International, 2002. v.4. 2173p.
- BELL, Terence. **The History of Brass**: From Rajasthan to Waterbury: 2000 years of brass. Disponível em: <<http://metals.about.com/od/properties/a/The-History-Of-Brass.htm>>. Acesso em: 23 ago. 2014.
- BOUVIER, S. et al. Simple shear tests: Experimental techniques and characterization of the plastic anisotropy of rolled sheets at large strains. **Journal Of Materials Processing Technology**, Paris, p. 96-103. 20 fev. 2006.
- CALLCUT, Vin. **Brief Early History of Brass**: Copper Applications in Metallurgy of Copper & Copper Alloys. Disponível em: <http://www.copper.org/publications/newsletters/innovations/2000/01/history_brass.html>. Acesso em: 23 ago. 2014.
- CALLISTER JUNIOR, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais**: uma introdução. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 6. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 1988. 576p.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4 ed. São Paulo: Blücher, 2008. 672p.
- DIETER, George E.. **Metalurgia Mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 660 p.
- LOPES, W. **Estudo do encruamento dos aços AISI 304 e AISI 409 com uso da técnica de cisalhamento planar simples**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. 186p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
- MNIF, R. et al. Effect of Forging on Cyclic Hardening Behavior of CW 614 Brass Alloy. **Strength Of Materials**, Kiev, v. 43, n. 2, p.217-223, 25 maio 2011.
- PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia**: Microestrutura e propriedades. São Paulo: Hemus, 1997. 353 p.
- PEREIRA, Alexandre Miguel Ramos. **Processos de Fabricação**: Calandragem. Marinha Grande: Isdom, 2012. 14 p.
- RAUCH, E.F. Plastic anisotropy of sheet metals determined by simple shear tests. **Materials Science and Engineering**, Grenoble, v. 241, p.179-183, 1998.
- ROMÁN, José Maria Ruiz. **Materiales Metálicos Volúmen II**: Aleaciones ligeras y no férreas. Madri: Fundación Gomez Pardo, 2010.

SAKHAROVA, N.a.; FERNANDES, J.v. Strain path change effect on dislocation microstructure of multicrystalline copper sheets. **Materials Chemistry and Physics**, Coimbra, v. 98, p.44-50, 27 jan. 2006.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 3. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2010. 646 p.

SHAEFFER, Lirio et al. **ESTUDO DO PROCESSO ESTAMPAGEM INCREMENTAL EM CHAPA DE LATÃO 70/30**. Forge, Porto Alegre, p.1-15, ago. 2011.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**: Fundamentos teóricos e práticos. 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982. 287 p.

VAN BOXEL, Steven. **Anisotropic Work-Hardening and Strain Path Effects in an AlMn Alloy**. 2010. 263 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências da Engenharia, Katholieke Universiteit Leuven, Heverlee, 2010.