

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

FÁBIO ANDRIOLI DOS SANTOS

ESTUDO DO EFEITO BAUSCHINGER EM COBRE E LATÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA
2017

FÁBIO ANDRIOLI DOS SANTOS

ESTUDO DO EFEITO BAUSCHINGER EM COBRE E LATÃO

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais – DAEMA da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenheiro de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres

LONDRINA
2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Londrina
Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais
Coordenação de Engenharia de Materiais



TERMO DE APROVAÇÃO

ESTUDO DO EFEITO BAUSCHINGER EM COBRE E LATÃO

Por

FÁBIO ANDRIOLI DOS SANTOS

Monografia apresentada no dia 27 de junho de 2017 ao Curso Superior de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho **APROVADO.**

Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres

(UTFPR - Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais-DAEMA-LD)
Orientador

Prof. Dr. Amadeu Lombardi Neto

(UTFPR - Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais-DAEMA-LD)

Prof. Dr. Carlos Roberto Peraro

(UTFPR - Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais – DAEMA-LD)

Prof. Dr. Delia do Carmo Vieira

Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia de Materiais

Obs.: A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia de Materiais

RESUMO

DOS SANTOS, Fábio A. Estudo do efeito Bauschinger em cobre e latão. 2017. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso 2 – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2017.

Quando materiais metálicos em situação de inversão de carregamento são sujeitos a deformação plástica, geralmente ocorre uma diminuição no valor de tensão necessária para se iniciar um novo escoamento. Dessa forma, a dependência da direcionalidade do carregamento é denominada de efeito Bauschinger. Este fenômeno tem importantes consequências na conformação de metais, como no dobramento de placas de aço, e resulta em redução de resistência quando metais severamente trabalhados a frio são submetidos a cargas de sinal contrário. O melhor exemplo disso é o desempenho de barras estiradas ou folhas laminadas pela passagem através de rolos que aplicam tensões de dobramento alternadas. Neste trabalho, o material de estudo será analisado em tração e compressão para determinar parâmetros que possam quantificar este efeito. Uma série de modelos que descrevem o efeito Bauschinger são apresentados e, com base neles, será verificado o comportamento de uma amostra de cobre eletrolítico e de latão 70/30, com base na diferença de energia de falha de empilhamento que esses materiais apresentam.

Palavras-Chave: Efeito Bauschinger. Energia de Falha de Empilhamento. Cobre. Latão.

ABSTRACT

DOS SANTOS, Fábio A. Study of Bauschinger Effect in copper and brass. 2017. 55 p. Trabalho de Conclusão de Curso 2 – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2017.

When metallic materials in a load inversion situation are subject to plastic deformation, a decrease in the amount of stress required to the material yield plastically. In this way, the dependence of the directionality of the load is called Bauschinger effect. This phenomenon has important consequences in the conformation of metals, as in bending steel plates, and results in reduction of resistance when severely cold worked metals are subjected to loads of opposite signal. The best example of this is the performance of stretched bars or sheets laminated by passing through rollers applying alternating bending stress. In this work, the material of interest will be analyzed in tensile and compression to determine parameters that can quantify this effect. A series of models describing the Bauschinger effect are presented and, based on the difference of their stacking fault energy.

Keywords: Bauschinger Effect. Stacking Fault Energy. Copper. Brass.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do efeito Bauschinger.	14
Figura 2 - Parâmetros usados para descrever o efeito Bauschinger.....	16
Figura 3 - Plano de escorregamento em um metal CFC.	19
Figura 4 - Discordâncias parciais em aço inoxidável AISI 304.	20
Figura 5 - Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de tração. Todas as medidas são em milímetros.....	23
Figura 6 - Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de compressão. Medidas em milímetros.....	24
Figura 7 - Máquina universal de ensaios modelo WDW-100E.	26
Figura 8 - Curvas para compressão para corpos de prova com diferentes razões D/L..	30
Figura 9 - Cobre como recebido visto por um aumento de 20X.	31
Figura 10 - Cobre recozido a 500 oC por 1h visto por um aumento de 20X. Retirada do centro da amostra.	31
Figura 11 - Cobre recozido a 500 oC por 1h visto por um aumento de 20X. Retirada da lateral da amostra.....	32
Figura 12 - Latão como recebido visto por um aumento de 20X.	32
Figura 13 - Latão recozido a 500 oC por 1h visto por um aumento de 20X.	33
Figura 14 - Evolução do limite de escoamento com o aumento da pré-deformação em tração para o cobre.	34
Figura 15 - Evolução do coeficiente de encruamento, n , com o aumento da pré-deformação em tração para o cobre.	34
Figura 16 - Evolução do limite de escoamento com o aumento da pré-deformação em tração para o latão.	35
Figura 17 - Evolução do coeficiente de encruamento, n , com o aumento da pré-deformação em tração para o latão.....	35
Figura 18 - Ensaio de efeito Bauschinger com 0,1% de pré-deformação para o cobre.	36
Figura 19 - Ensaio de efeito Bauschinger com 0,2% de pré-deformação para o cobre.	37
Figura 20 - Ensaio de efeito Bauschinger com 0,3% de pré-deformação para o cobre.	37
Figura 21 - Ensaio de efeito Bauschinger com 0,2% de pré-deformação para o latão... ..	38
Figura 22 - Ensaio de efeito Bauschinger com 0,3% de pré-deformação para o latão... ..	38
Figura 23 - Ensaio de efeito Bauschinger com 0,4% de pré-deformação para o latão... ..	39
Figura 24 - BSP em função da pré-deformação para o latão.	40
Figura 25 - β em função da pré-deformação para o latão.	40
Figura 26 - (a) Distribuição de tensões residuais. (b) Influência de uma dada distribuição na curva tensão-deformação.....	48
Figura 27 - Modelo de Masing. a) Elementos elásticos-perfeitamente plásticos conectados em paralelo. b) Ilustração da curva tensão-deformação de cada elemento.	50
Figura 28 - Comportamento de dois elementos de acordo com o modelo de Masing....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do cobre eletrolítico.....	22
Tabela 2 - Composição química da liga de latão 360.....	22
Tabela 3 - Procedimento de lixamento e polimento para análise metalográfica.....	24
Tabela 4 - Propriedades mecânicas em tração dos materiais em estudo.	28
Tabela 5 - Propriedades mecânicas em compressão dos materiais em estudo para diferentes valores de pré-deformação.	28

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	OBJETIVOS.....	10
1.1.1	Objetivo Geral.....	10
1.1.2	Objetivos Específicos.....	10
1.2	JUSTIFICATIVA.....	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	COBRE E SUAS LIGAS.....	12
2.2	EFEITO BAUSCHINGER.....	13
2.2.1	Parâmetros usados para descrever o efeito Bauschinger	15
2.3	INFLUÊNCIA DA FALHA DE EMPILHAMENTO.....	18
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
3.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	22
3.2	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	25
3.3	ENSAIO DE COMPRESSÃO.....	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
4.1	ENSAIOS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO	28
4.2	METALOGRAFIA.....	30
4.3	EFEITO BAUSCHINGER.....	33
5	CONCLUSÃO	42
6	TRABALHOS FUTUROS	43
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	44
	APÊNDICE A – MODELOS TEÓRICOS DO EFEITO BAUSCHINGER.....	48
	APÊNDICE B – CERTIFICADO DOS MATERIAIS	54

1 INTRODUÇÃO

Quando se iniciou o estudo acerca do comportamento mecânico de materiais monocristalinos durante sua deformação plástica, notou-se que, geralmente, uma tensão menor é requerida para reverter a direção de movimento de uma discordância em um determinado plano de deslizamento, do que seria necessária para manter o movimento da mesma na direção inicial. Esse fenômeno de dependência da direcionalidade da deformação plástica de metais, é denominado de Efeito Bauschinger (DIETER, 1961) (CHAWLA e MEYERS, 2009). Em geral, a dependência da direcionalidade de deformação plástica significa que a resistência do material e a distribuição de tensões no seu interior são dependentes não somente do seu atual nível de deformação, mas também da rota pela qual essa deformação foi alcançada. Dessa forma, torna-se necessário, além da deformação acumulada, o conhecimento do histórico do processo de deformação para se definir o estado de um material (UKO, 1978).

As origens físicas do efeito Bauschinger são provenientes das interações entre discordâncias e formação de empilhamentos de discordâncias (PEDERSEN, BROWN e STOBBS, 1981) e loops de Orowan ao redor de precipitados duros (ARAN, DEMIRKOL e KARABULUT, 1987). Portanto, o mecanismo básico para o efeito Bauschinger pode ser relacionado às estruturas de discordâncias formadas no metal encruado e como estas levam à formação de tensões residuais. Além disso, modelos mais complexos, levam em consideração a fração volumétrica de precipitados na matriz, principalmente aqueles incoerentes, e os efeitos da relaxação plástica (ARAN, DEMIRKOL e KARABULUT, 1987).

Embora diversos materiais apresentem este comportamento, é observado que materiais com estrutura cúbica de face centrada (CFC), são mais sensíveis aos efeitos provocados pela reversão no sentido de aplicação da carga (BATE e WISLSON, 1985). Portanto, considerando o efeito Bauschinger como proveniente das estruturas de discordâncias formadas durante a deformação plástica, será verificado, neste trabalho, a sensibilidade deste efeito em função da composição química de uma amostra de cobre eletrolítico e de um latão 70/30.

Logo, este estudo se apresenta de importância tecnológica em processos de conformação mecânica à frio, onde, por exemplo, pode ser desejável a indução do efeito Bauschinger com o objetivo de reduzir as cargas de conformação. Além disso, a resistência de componentes mecânicos pode ser seriamente prejudicada nos casos em que a tensão de serviço está em sentido contrário em relação à direção da tensão aplicada durante sua conformação. Um exemplo disso é o desempenho de barras estiradas ou folhas laminadas pela passagem através de rolos que aplicam no material tensões de dobramento alternadas (SOWERBY, UKO e TOMITA, 1979).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o efeito Bauschinger em cobre eletrolítico e latão 70/30.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Testar a aplicabilidade do modelo proposto em cobre e latão;
- Verificar a influência da composição química no efeito Bauschinger;
- Verificar a sensibilidade dos parâmetros do efeito Bauschinger em relação a pré-deformação aplicada.

1.2 JUSTIFICATIVA

O conhecimento sobre o efeito Bauschinger é um pré-requisito necessário para o entendimento do comportamento dos materiais em condições de deformação cíclica e para o aprimoramento das teorias do comportamento plástico dos materiais. Situações de inversão do carregamento aplicado pode ser prejudicial à estabilidade dimensional, vida em fadiga, tenacidade a fratura, fluência, anelasticidade, entre outras propriedades. Este estudo se apresenta de importância prática em processos de conformação mecânica onde, por exemplo, pode ser desejável a indução do efeito Bauschinger com o objetivo de reduzir as cargas de conformação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 COBRE E SUAS LIGAS

O cobre foi o primeiro metal usado pelo homem. Encontrado por volta de 13.000 a.C. no norte do Golfo Pérsico, sendo utilizado em todas as fases das revoluções tecnológicas que o homem já passou. Sendo ele o segundo metal não ferroso mais consumido no mundo, perdendo apenas para o alumínio. Sua densidade é de 8,9 g/cm³, um pouco acima da do aço, e sua temperatura de fusão é de 1083°C (MAZZOLANI, 1995).

Foram desenvolvidas nomenclaturas para as ligas fundidas e forjadas. As grandes ligas de cobre são divididas nos grupos listados abaixo:

- Cobre comercialmente puro;
- Ligas de alto teor de cobre;
- Latões;
- Bronzes;
- Ligas de cobre-níquel;
- Ligas de cobre-níquel-zinco

Em sua forma metálica, o cobre, apresenta alta durabilidade, boa resistência à corrosão, boa maleabilidade e ductilidade. As duas últimas propriedades citadas do cobre o tornam um material diferenciado, uma vez que geralmente os metais mais resistentes não são maleáveis. Assim o cobre e suas ligas podem ser transformados em fios, lâminas, bastões, et. (ASM Handbook, 2005).

O latão é liga metálica de cobre e zinco com porcentagens de zinco que variam de 3% a 45%, dependendo do tipo de latão. O latão é bastante maleável, sendo mais maleável que o cobre ou o zinco separadamente, é também bastante dúctil, resistente a impactos e excelente condutor térmico e elétrico. Comparado com o cobre o latão possui

ponto de fusão inferior, em torno de 900°C, e pode ser forjado, fundido, laminado e estirado a frio de maneira mais fácil do que os metais que o compõem (ASM Handbook, 2005).

2.2 EFEITO BAUSCHINGER

O fenômeno responsável pela redução da tensão necessária para um material deformar plasticamente, após o mesmo ter sido pré-deformado em direção oposta, é conhecido como efeito Bauschinger. Dessa forma, em um material sujeito a uma deformação unidimensional, a sua resistência devido a uma tensão de tração, por exemplo, será superior à sua resistência em tensão compressiva (CHAWLA e MEYERS, 2009) (SKELTON, CHRIST e MAIER, 1997) (DIETER, 1961). Este comportamento direcional foi primeiramente descrito por Johan Bauschinger em 1881 e o fenômeno agora leva seu nome (BAUSCHINGER, 1881).

Este efeito pode ser observado em diversos materiais, não apenas em ligas de duas fases e compósitos, como também em materiais de única fase (KATO, SASAKI e MORI, 2015). Entretanto, é observado que este comportamento é mais pronunciado em materiais com estrutura cúbica de face centrada (CFC) do que em materiais com estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) (BUCIUMEANU, PALAGHIAN, *et al.*, 2010).

A Figura 1 ilustra o efeito Bauschinger. A sequência 0-1-2, na curva de tensão-deformação, representa o ciclo de carregamento do material em tração. O limite de escoamento do material ocorre após 1, deformando-se, assim, plasticamente. No ponto 2, a direção do carregamento é revertida, a curva, a partir desse ponto, assume uma direção paralela ao regime elástico da curva tensão-deformação, e segue até o momento onde a tensão torna-se compressiva. Considerando um material que não apresente efeito Bauschinger, o mesmo voltaria a deformar plasticamente em um valor de tensão igual a σ_2 , e a curva de compressão seria simetricamente oposta a curva de tensão (linha tracejada). Dessa forma, $R\sigma_2 = \sigma_3 = -\sigma_2$. Em caso de um material que exiba o efeito Bauschinger, a tensão de escoamento do material em compressão seria reduzida de σ_3

discordâncias e σ_M representa as tensões residuais geradas durante a deformação devido as interações entre as partículas e a matriz.

De acordo com Orowan (1934), o efeito Bauschinger pode ser explicado pelo mesmo mecanismo de endurecimento por dispersão proposto por ele. As origens físicas do efeito Bauschinger durante a reversão do carregamento podem ser classificadas como sendo transientes de longo ou de curto alcance (JORDON, HORSTEMEYER, *et al.*, 2007). As contribuições transientes de longo alcance incluem interações entre discordâncias e empilhamentos de discordâncias, também denominados de *pileups* (PEDERSEN, BROWN e STOBBS, 1981), e loops de Orowan ao redor de precipitados duros (ARAN, DEMIRKOL e KARABULUT, 1987). Enquanto que as transições de curto alcance se referem à resistência à movimentação da discordância (ARAN, DEMIRKOL e KARABULUT, 1987).

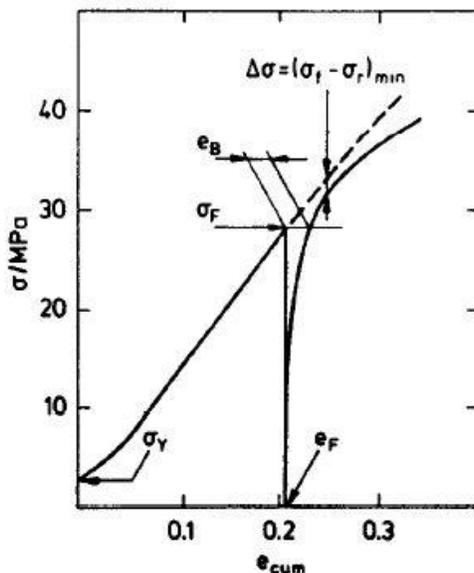
2.2.1 Parâmetros usados para descrever o efeito Bauschinger

O efeito Bauschinger pode ser relacionado com a tensão, deformação ou energia (ARAN, DEMIRKOL e KARABULUT, 1987). Os parâmetros relacionados a tensão e deformação podem ser observados na Figura 2. Dessa forma, o amolecimento permanente do material, $\Delta\sigma$, é a mínima diferença entre os valores de tensão em tração, σ_f^1 , e compressão, σ_r^2 , no ponto onde é possível traçar uma reta tangente a curva de compressão que seja paralela a curva em tração. A deformação Bauschinger, ε_b , é definida como a quantidade de deformação necessária para igualar a tensão no ciclo de compressão à máxima tensão alcançada durante o ciclo de tração.

¹ Subscrito referente ao termo inglês *forward*.

² Subscrito referente ao termo inglês *reversal*.

Figura 2 - Parâmetros usados para descrever o efeito Bauschinger.



Fonte: Pedersen, Brown e Stobbs (1981).

O parâmetro de efeito Bauschinger (PEB) é o único parâmetro que caracteriza esse fenômeno de forma independente da pré-deformação do material, e é dado pela Equação 1. Assim, o PEB permite a comparação do efeito Bauschinger entre diferentes ensaios e diferentes materiais (RAJAN e TEREDA, 1984).

$$PEB = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_F - \sigma_0} \quad (1)$$

Abel (1973) sugeriu dois novos parâmetros para medir quantitativamente o efeito Bauschinger, denominados como parâmetro de tensão Bauschinger (BSP³), e parâmetro de energia Bauschinger (BEP⁴), conforme Equações 2 e 3, respectivamente. De acordo com Caceres et al. (1995), o BSP mede a quantidade de tensão residual que as partículas exercem nas discordâncias. E a BEP é útil para a ilustração da relação entre o encruamento isotrópico e cinemático que é observado durante a deformação.

$$BSP = \frac{|\sigma_f| - |\sigma_r|}{|\sigma_f|} \quad (2)$$

³ Do inglês, *Bauschinger Stress Parameter*.

⁴ Do inglês, *Bauschinger Energy Parameter*.

$$BEP = \frac{1}{2} \left(\frac{|\sigma_f| - |\sigma_r|}{|\sigma_f| - |\sigma_0|} \right) \quad (3)$$

O BSP pode ser facilmente determinado experimentalmente, e, quando plotado contra a pré-deformação, ε_p , sofrida pelo material, para baixos valores de deformação, pode ser representado empiricamente pela Equação 4.

$$BSP(\varepsilon_p) = a \ln|\varepsilon_p| + b \quad (4)$$

Entretanto, este fator, por não levar em conta o encruamento do material, não é suficiente para caracterizar o efeito Bauschinger (TAN, MAGNUSSON e PERSSON, 1994). Devido a isso, uma forma similar foi posteriormente sugerida por outros autores. Assim, considerando $|\sigma_f| - |\sigma_0|$ como o endurecimento resultante do primeiro carregamento, e $|\sigma_f| - |\sigma_r|$ como o amolecimento devido a reversão do carregamento, em relação a equação de Ludwik-Hollomon (Equação 5), a razão resultante é definida como o parâmetro de Bauschinger, β , conforme Equação 6.

$$\sigma = \sigma_0 + k\varepsilon^n \quad (5)$$

$$\beta = \frac{|\sigma_f| - |\sigma_r|}{|\sigma_f| - |\sigma_0|} = BSP(\varepsilon_p) \left(\frac{|\sigma_0|}{k|\varepsilon_p|^n} + 1 \right) \quad (6)$$

O parâmetro β é expressado como função das propriedades do material, k e n , e da pré-deformação. Caracterizando, assim, o efeito Bauschinger mais adequadamente (BATE e WISLSON, 1985).

Uma série de modelos teóricos foram propostos para descrever o efeito Bauschinger. Estes modelos variam desde os mais simples, que consideram o comportamento como proveniente apenas das tensões residuais geradas no interior do material devido a movimentação e interação das discordâncias, até os mais complexos, que consideram também a forma e a fração volumétrica de partículas de segunda fase

dispersas na matriz, assim como, os tipos de interfaces que esses precipitados apresentam, isto é, a presença de precipitados coerentes ou incoerentes. Ao leitor interessado, maior explicação sobre estes modelos pode ser encontrada no Apêndice A.

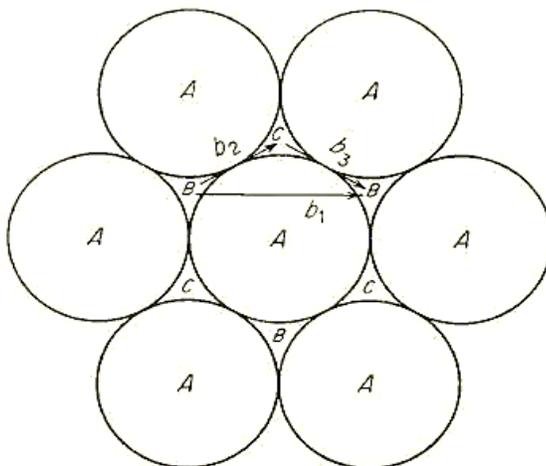
2.3 INFLUÊNCIA DA FALHA DE EMPILHAMENTO

Durante a deformação plástica em materiais CFC, o deslizamento ocorre no plano $\{111\}$ segundo a direção $\langle 110 \rangle$. A Figura 3 mostra como os planos $\{111\}$ estão empilhados numa sequência ABC ABC... O menor vetor da rede é $(a_0/2)[110]$, que liga um átomo no vértice do cubo com um átomo vizinho no centro de uma das faces do cubo. Dessa forma, o vetor $b_1 = (a_0/2)[10\bar{1}]$ define uma das direções de escorregamento observadas. Considerando os átomos como esferas rígidas, será, portanto, mais fácil para um átomo mover-se ao longo dos “vales” presentes no empilhamento, com um movimento de ziguezague do tipo $b_2 + b_3$, do que passar diretamente sobre o átomo que se encontra no caminho do vetor b_1 . Dessa forma, a reação de dissociação de uma discordância é dada por

$$b_1 = b_2 + b_3$$

$$\frac{a}{2}[10\bar{1}] \rightarrow \frac{a}{6}[2\bar{1}\bar{1}] + \frac{a}{6}[11\bar{2}]$$

Figura 3 - Plano de escorregamento em um metal CFC.



Fonte: Dieter (1961, p.165).

Considerando que a energia de uma discordância é aproximadamente tida como

$$U = \frac{Gb^2}{2}$$

Para que a decomposição da discordância seja favorável, é necessário que

$$\frac{Gb_1^2}{2} \leftrightarrow \frac{Gb_2^2}{2} + \frac{Gb_3^2}{2}$$

Portanto,

$$\frac{a^2}{2} \leftrightarrow \frac{a^2}{6} + \frac{a^2}{6}$$

Verifica-se, assim, que a energia total da discordância diminui com a sua dissociação. As discordâncias resultantes são denominadas de discordâncias parciais, frequentemente chamadas de parciais de Shockley (DIETER, 1961).

Em um material CFC, a estrutura gerada pela falha de empilhamento é HC. Essa estrutura apresenta uma energia livre de Gibbs maior que o valor obtido para a estrutura CFC, e a energia associada a essa falha determina a distância d entre as duas

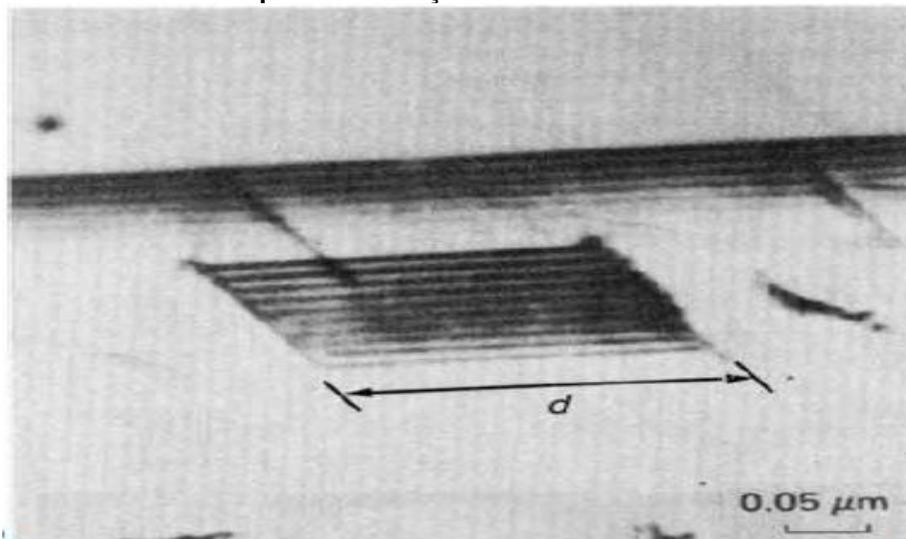
discordâncias parciais. A Equação 7 apresenta uma forma simplificada da energia de falha de empilhamento.

$$\gamma_{FE} = \frac{Gb^2}{2\pi d} \quad (7)$$

onde γ_{FE} é a energia de falha de empilhamento por unidade de área, G é a diferença entre a energia livre de Gibbs da estrutura HC e da estrutura CFC, b é o vetor de Burgers e d é a distância entre as parciais de Shockley.

Como pode ser observado, a energia de falha de empilhamento é inversamente proporcional a distância entre as parciais. A Figura 4 mostra discordâncias parciais presentes em um aço inoxidável AISI 304. A região com falha de empilhamento pode ser vista pelo característico padrão de linhas, onde suas extremidades são unidas pelas discordâncias parciais.

Figura 4 - Discordâncias parciais em aço inoxidável AISI 304.



Fonte: Chawla e Meyers (2009, p.287).

A energia de falha de empilhamento pode ser considerada um importante parâmetro na descrição do efeito Bauschinger. Quando uma discordância em movimento encontra algum obstáculo (contorno de grão, precipitado, etc.), ela tem seu movimento restringido. Assim, em metais com baixa energia de falha de empilhamento, a maior

separação entre as parciais resulta em maior dificuldade de deslizamento cruzado (*cross-slip*), e as discordâncias subsequentes são empilhadas na primeira, formando *pileups* (CHAWLA e MEYERS, 2009). Acredita-se que, após a reversão do carregamento, o movimento dessas discordâncias empilhadas seria facilitado devido as forças de repulsão entre elas, permitindo o escoamento prematuro do material. Decorrente disso, os *pileups* em materiais com alta energia de falha de empilhamento serão menores e menos frequentes, gerando um menor efeito Bauschinger (HEIPLE e CARPENTER, 1983).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Neste estudo foram utilizadas amostras de cobre eletrolítico e da liga de latão 360 (70/30), suas composições, conforme Anexo B, são apresentadas na Tabela 1 e Tabela 2, respectivamente.

Tabela 1 - Composição química do cobre eletrolítico.

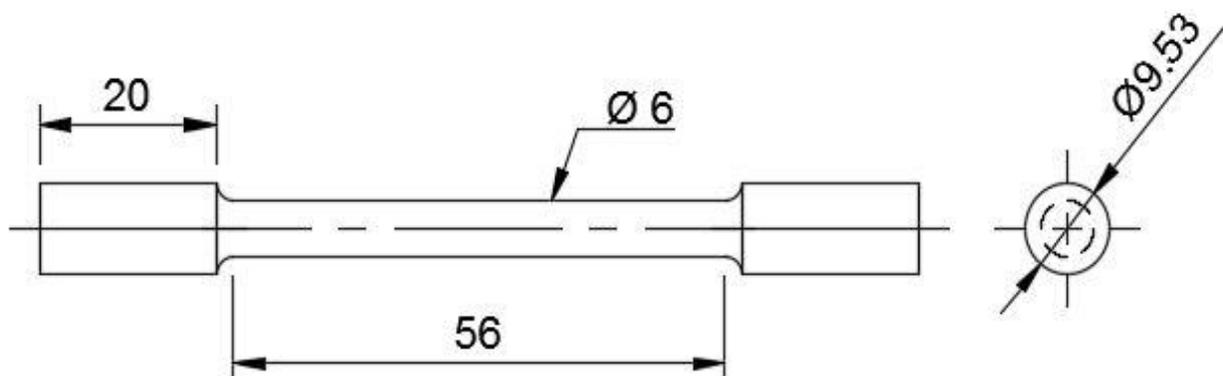
Elemento	Valor (% peso)
Cobre	RESTANTE
Chumbo	0,012
Ferro	0,008
Níquel	0,003
Estanho	0,003

Tabela 2 - Composição química da liga de latão 360.

Elemento	Valor (% peso)
Cobre	61,978
Chumbo	3,169
Ferro	0,198
Zinco	RESTANTE

Os materiais foram recebidos em forma de tarugos, ambos possuindo 1 m de comprimento e diâmetro de 3/8 de polegada. A partir dos tarugos, os corpos de prova foram confeccionados por torneamento, com dimensões conforme Figura 5.

Figura 5 - Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de tração. Todas as medidas são em milímetros.



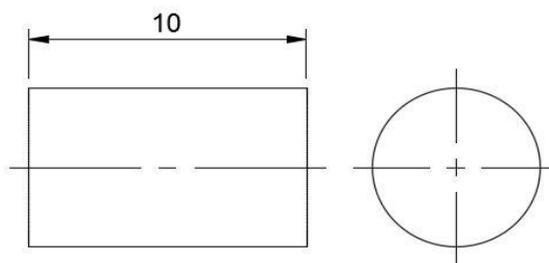
Após usinagem, os corpos de prova foram submetidos a um tratamento de recozimento em temperatura de 500°C por 1h e resfriados em água, a fim de eliminar históricos de encruamento prévios e uniformizar sua microestrutura.

Após os ensaios de tração, as bases dos corpos de prova ensaiados foram cortadas para a obtenção de amostras que foram embutidas em resina termofixa de cura a quente (baquelite), gerando amostras para análise metalográfica. Foram obtidas amostras para ambos metais pesquisados, tanto no estado de como recebido como após tratamento térmico de recozimento. O procedimento para lixamento e polimento é apresentado na Tabela 3. Para revelação da microestrutura foi utilizado ataque químico em ácido nítrico pelo tempo de 5 segundos. A superfície de observação foi em seguida seca através da evaporação de álcool etílico.

Tabela 3 - Procedimento de lixamento e polimento para análise metalográfica.

Etapa	Lixamento/polimento
1	Lixa # 400
2	Lixa #600
3	Lixa #800
4	Lixa #1200
5	Alumina 5 μm
6	Alumina 0,3 μm

Os corpos de prova para o ensaio de compressão foram confeccionados a partir de cortes nos corpos de prova previamente ensaiados em tração, em sua região de deformação uniforme. Os corpos obtidos possuem geometria e dimensões conforme Figura 6, obtendo-se seções que permitissem a compressão sem a ocorrência de flambagem. O diâmetro não é mostrado na figura em virtude do mesmo ser dependente da deformação a que foi submetido previamente no ensaio de tração. Assim, devido ao seu tamanho reduzido, puderam ser confeccionados dois corpos de prova para compressão a partir de cada um feito para tração.

Figura 6 - Dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio de compressão. Medidas em milímetros.

3.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado com o objetivo de se determinar a sequência 0-1-2 da curva tensão-deformação, conforme Figura 2. O restante da curva, referente à reversão do sentido do carregamento, foi obtida através da medida da deformação do corpo de prova em ensaio de compressão. Os ensaios mecânicos foram conduzidos à temperatura ambiente e com velocidade de 1 mm/s. Os valores de pré-deformação e velocidade de ensaio foram escolhidos a partir de sugestões da bibliografia (PEDERSEN, BROWN e STOBBS, 1981) (ATKINSON, BROWN e STOBBS, 1974).

Para o cobre eletrolítico, os corpos de prova foram deformados em tração a deformações de 0,1%, 0,2% e 0,3%, enquanto que os corpos de prova de latão a deformações de 0,2%, 0,3% e 0,4%.

O ensaio de tração foi realizado na máquina universal de ensaios modelo WDW-100E disponível no laboratório de ensaios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Londrina, e ilustrada na Figura 7. Foi utilizado um extensômetro de comprimento útil de 50 mm.

Figura 7 - Máquina universal de ensaios modelo WDW-100E.



Fonte: (Time Group Inc., 2014).

3.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO

Foi conveniente a realização do ensaio de compressão para obtenção dos parâmetros correspondentes ao efeito Bauschinger, devido os corpos de prova serem relativamente fáceis de serem produzidos e necessitarem de pequena quantidade de material para isso.

Entretanto há dificuldades inerentes com o teste de compressão que devem ser superadas. A flambagem é caracterizada por uma deflexão lateral causada por tensões compressivas e causa tensões não-uniformes e distribuições de tensões que tornam difícil a análise dos resultados (ASM Handbook, 2005).

. Esse modo de falha pode ser controlado selecionando corpos de prova com geometria com pequenos valores para a razão L/D. Usualmente é admitido valores menores que 2 para essa razão, embora seja mais frequente utilizar L/D igual a 1. No presente estudo foi utilizado uma razão de aproximadamente 1,9.

Os ensaios de compressão nesse estudo foram conduzidos à temperatura ambiente e com velocidade de 1 mm/s. Em virtude da impossibilidade de fixação do extensômetro nos corpos de prova, uma vez que os mesmos possuem tamanho reduzido, sua deformação foi obtida através do deslocamento da travessa da máquina de ensaios.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO

A Tabela 4 e Tabela 5 apresentam os valores médios e desvios padrão das tensões de limite de escoamento, módulo de elasticidade e coeficiente de encruamento, n , este último obtido modelando-se o comportamento plástico uniforme dos materiais através de uma relação de potência do tipo proposto por Hollomon (CHAWLA e MEYERS, 2009), conforme Equação 5.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas em tração dos materiais em estudo.

Material	LE (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	n
Cobre	22,80 ± 3,84	92,26 ± 0,56	0,576 ± 0,045
Latão	131,20 ± 1,22	97,56 ± 3,74	0,479 ± 0,091

Tabela 5 - Propriedades mecânicas em compressão dos materiais em estudo para diferentes valores de pré-deformação.

Material/pré-def.	LE (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	n
Cobre/0,1%	76,25 ± 6,63	7,40 ± 3,15	1,179 ± 0,157
Cobre/0,2%	73,33 ± 3,11	7,05 ± 2,53	1,036 ± 0,101
Cobre/0,3%	70,33 ± 7,11	5,48 ± 0,46	1,012 ± 0,052
Latão/0,2%	120,00 ± 1,33	11,07 ± 1,93	0,935 ± 0,054
Latão/0,3%	118,33 ± 1,78	12,79 ± 0,53	0,873 ± 0,018
Latão/0,4%	110,33 ± 0,44	10,72 ± 1,59	0,851 ± 0,038

Os valores médios obtidos para o módulo de elasticidade e limite de escoamento em tração, Tabela 4, para o cobre e o latão, são condizentes com os valores obtidos em literatura (TYLER, OLIN CORPORATION e BLACK, 2005) para o tratamento térmico ao qual eles foram submetidos. O coeficiente de encruamento do cobre e do latão também

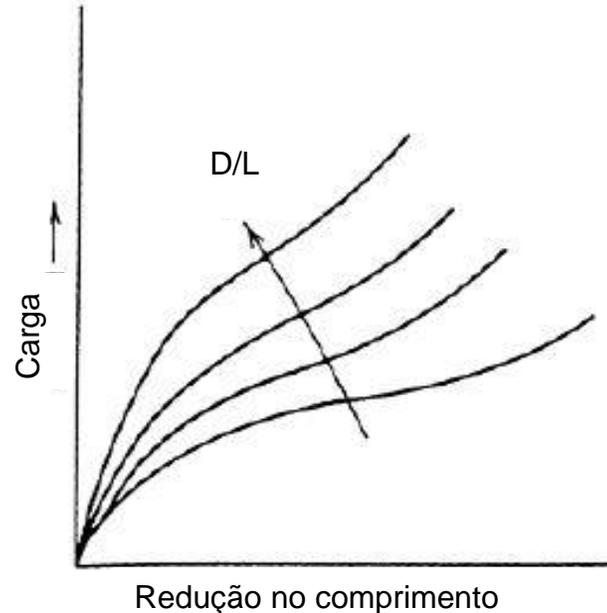
possuem valores muito próximos aos obtidos por outros autores (DIETER, KUHN e SEMIATIN, 2003).

Entretanto em compressão há grande divergência nos dados coletados. Os valores para o módulo de elasticidade, tanto para o cobre quanto para o latão, estão em torno de dez vezes inferiores aos valores obtidos em tração. Enquanto os valores do coeficiente de encruamento, para ambos materiais, são quase o dobro dos valores que seriam esperados, diferentemente da maioria dos dados disponíveis na literatura (TYLER, OLIN CORPORATION e BLACK, 2005). Contudo, apenas para o cobre os valores de limite de escoamento aumentaram em compressão quando comparados com os valores de tração.

Como pode ser visto na Figura 8, os ensaios de compressão, principalmente em materiais metálicos, são muito sensíveis à razão entre o diâmetro e o comprimento do corpo de prova, o que pode levar a formação de seu embarrigamento e consequente desvio nos resultados obtidos.

O embarrigamento é a formação de uma superfície convexa no exterior de um cilindro quando deformado em compressão. Essa condição é causada devido o atrito presente entre as faces do corpo de prova e a máquina de compressão, isso é causado porque conforme o cilindro reduz sua altura ele tende a aumentar seu diâmetro a fim de seu volume permanecer constante. Assim, conforme o material se expande radialmente ele é restringido pela fricção presente, consequentemente o material presente no meio do corpo de prova sofre menos impedimento e adquire maior diâmetro quando comparado com o material próximo às faces em contato com a máquina. Esse comportamento claramente significa que há a presença de um estado de tensão não axial em compressão (SOUZA, 1979). Além do que, em adição à tensão compressiva, é criada uma tensão circunferencial que desenvolve conforme o corpo de prova embarrilha. Como o embarrigamento aumenta proporcionalmente à razão D/L , a força necessária para deformar o corpo de prova também é proporcional a essa razão, conforme visto na Figura 8.

Figura 8 - Curvas para compressão para corpos de prova com diferentes razões D/L.



Fonte: Adaptado de (ASM Handbook, 2005).

Além disso, o embarrigamento é fortemente relacionado à quantidade de atrito gerado entre o corpo de prova e a máquina de ensaios. Em função disso, acredita-se que os valores de limite de escoamento para o cobre possam ter sido mais influenciados pelo atrito gerado (BANERJEE, 1985), uma vez que o coeficiente de atrito para o cobre é relativamente maior que o encontrado para o latão em literatura, sendo esses valores 1 e 0,3, respectivamente (Engineer's Handbook, 2006).

4.2 METALOGRAFIA

A análise metalográfica foi realizada em ambos materiais, tanto em seu estado recozido como no estado em que eles foram entregues pelo fornecedor e são apresentadas nas figuras 9, 10, 11, 12 e 13.

Figura 9 - Cobre como recebido visto por um aumento de 20X.

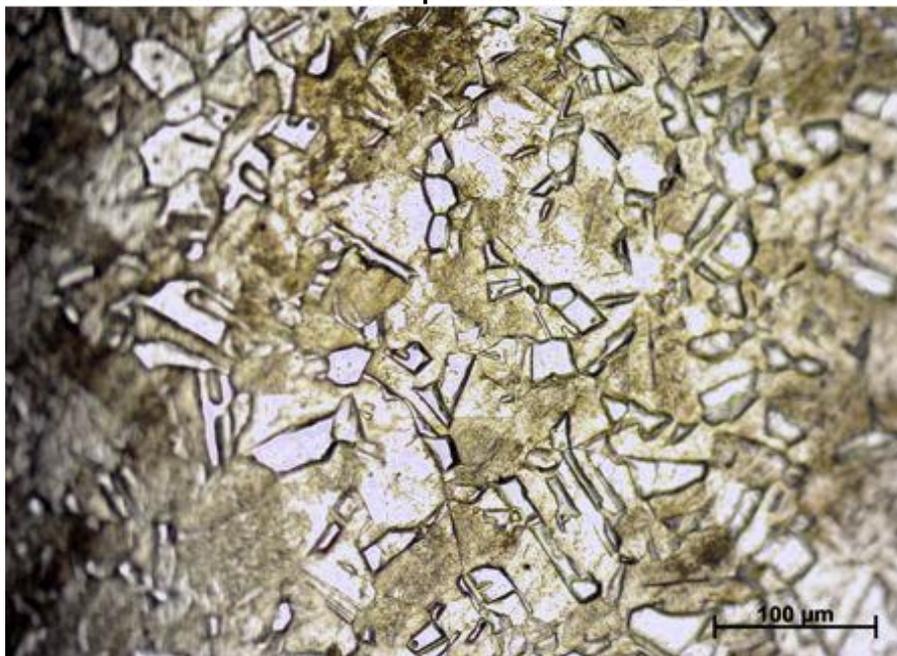


Figura 10 - Cobre recozido a 500 oC por 1h visto por um aumento de 20X. Retirada do centro da amostra.

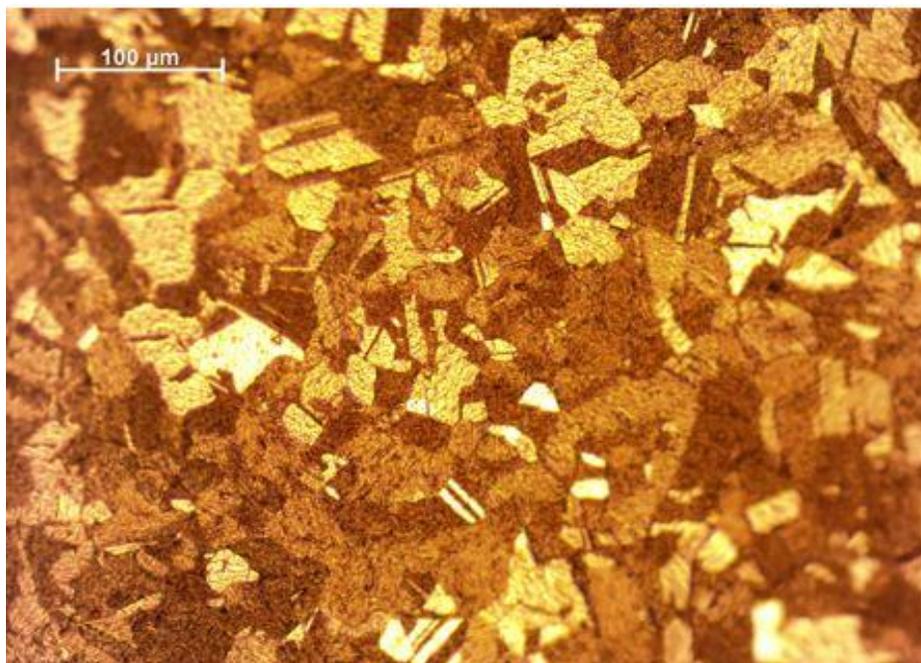


Figura 11 - Cobre recozido a 500 oC por 1h visto por um aumento de 20X. Retirada da lateral da amostra.

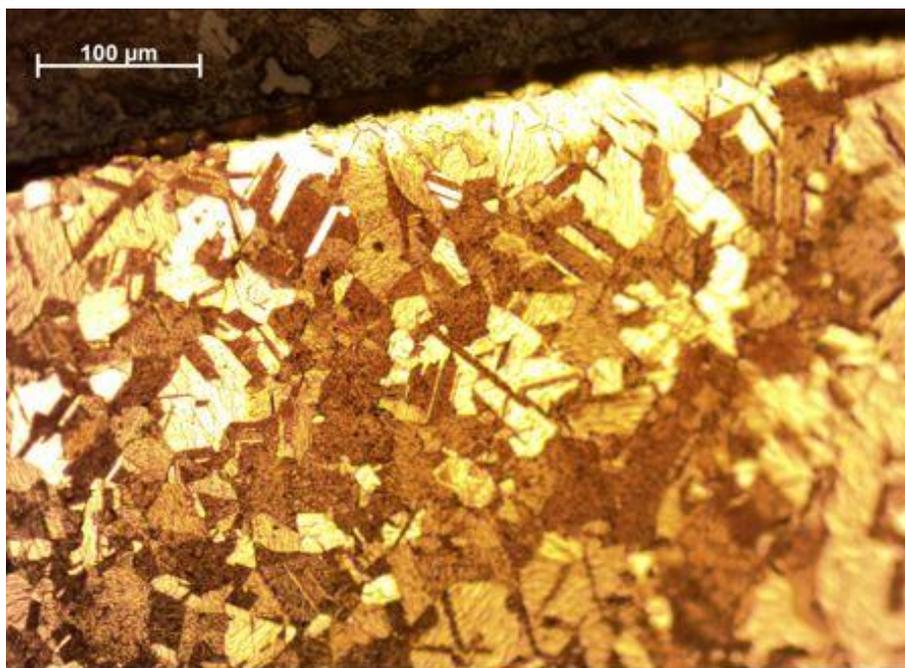


Figura 12 - Latão como recebido visto por um aumento de 20X.

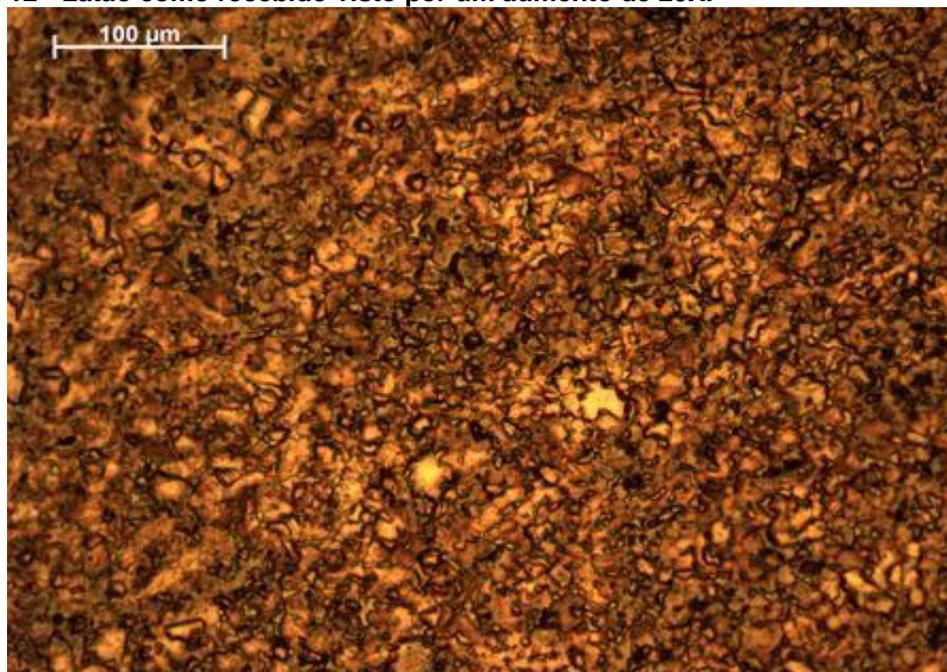
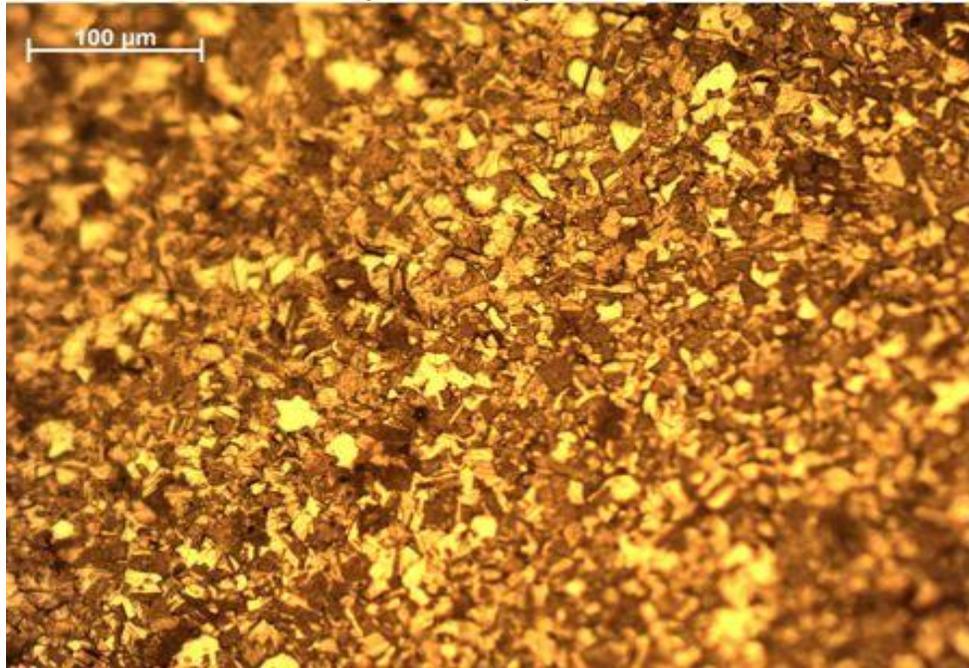


Figura 13 - Latão recozido a 500 oC por 1h visto por um aumento de 20X.



Efetuada a metalografia nos metais em estudo, verifica-se presença de estrutura homogênea de grãos aproximadamente equiaxiais e o surgimento de maclas em ambos os metais após o recozimento. Comparando os dois materiais também se nota a presença de grãos maiores para o cobre em ambos os estados quando comparados ao latão.

4.3 EFEITO BAUSCHINGER

Nas Figuras de 14 a 17 é possível verificar a evolução dos valores de tensão de limite de escoamento e coeficiente de encruamento obtidos em compressão, em função do aumento da pré-deformação a que foram submetidos no ensaio de tração.

Figura 14 - Evolução do limite de escoamento com o aumento da pré-deformação em tração para o cobre.

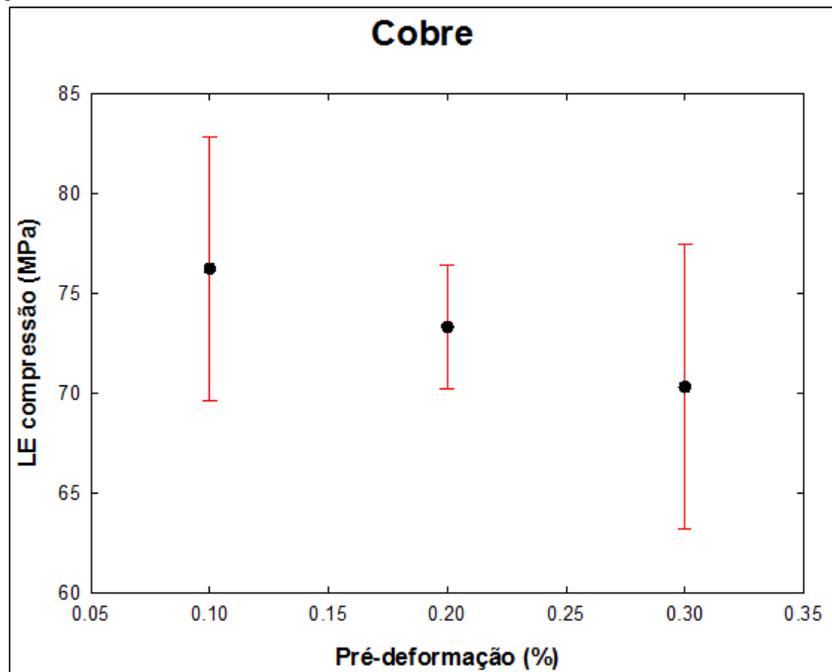


Figura 15 - Evolução do coeficiente de encruamento, n , com o aumento da pré-deformação em tração para o cobre.

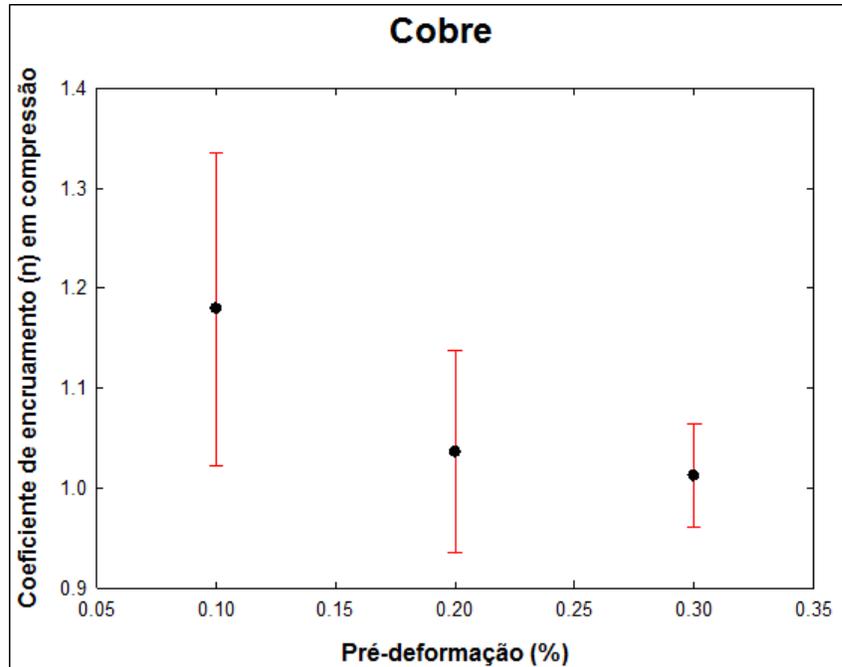


Figura 16 - Evolução do limite de escoamento com o aumento da pré-deformação em tração para o latão.

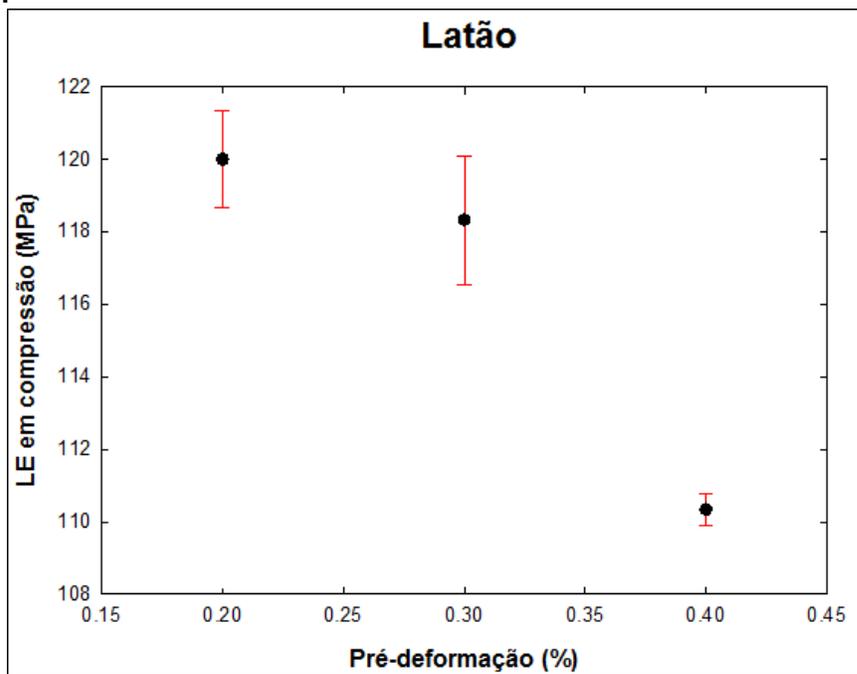
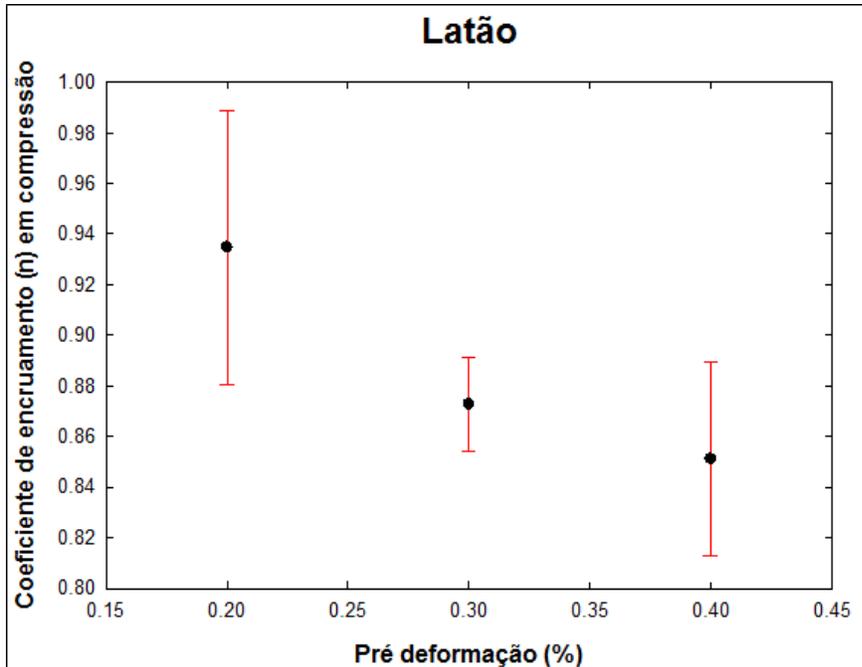
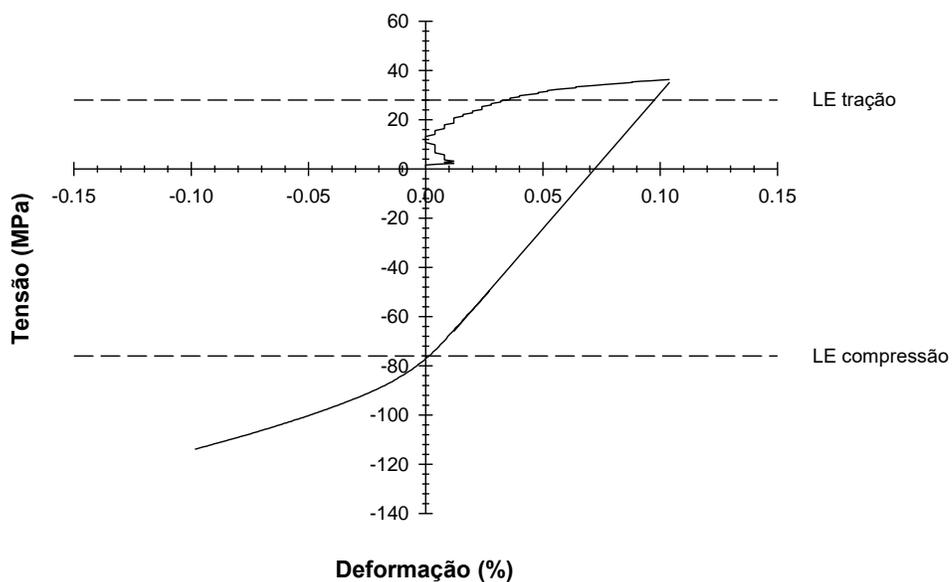


Figura 17 - Evolução do coeficiente de encruamento, n , com o aumento da pré-deformação em tração para o latão.

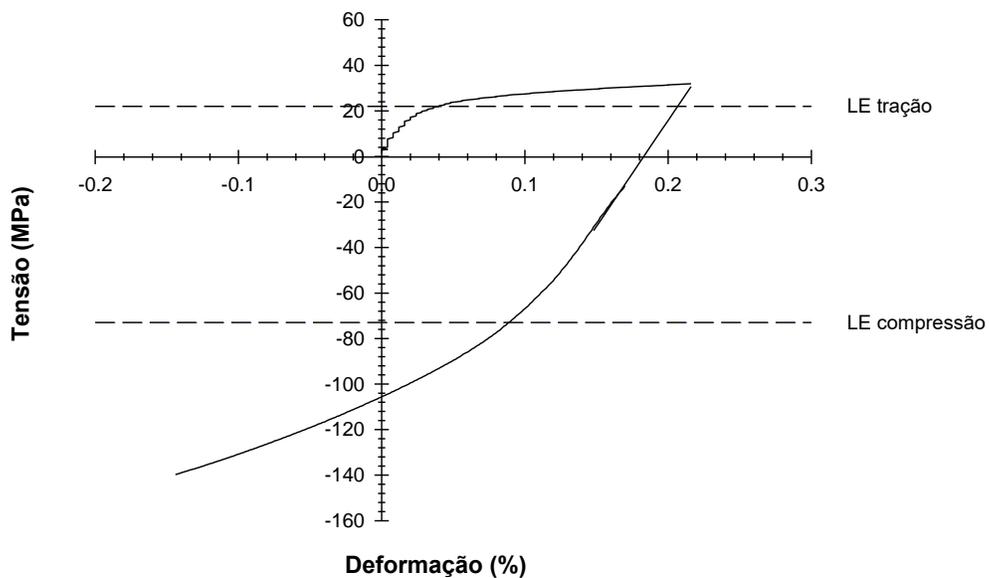


As Figuras de 18 a 23 apresentam as curvas obtidas para o latão nos ensaios combinados de tração e compressão, para as pré-deformações de 0,1%, 0,2% e 0,3%, no caso do cobre, e de 0,2%, 0,3% e 0,4%, para o latão.

**Figura 18 - Ensaio de efeito Bauschinger com 0,1% de pré-deformação para o cobre.
Cobre (0,1%)**



**Figura 19 - Ensaio de efeito Bauschinger com 0,2% de pré-deformação para o cobre.
Cobre (0,2%)**



**Figura 20 - Ensaio de efeito Bauschinger com 0,3% de pré-deformação para o cobre.
Cobre (0,3%)**

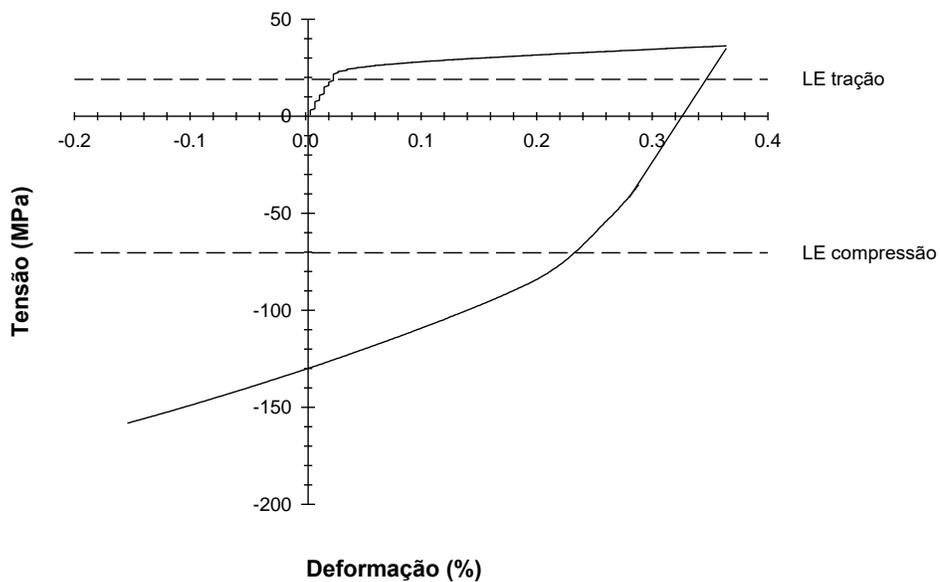


Figura 21 - Ensaio de efeito Bauschinger com 0,2% de pré-deformação para o latão.
Latão (0,2%)

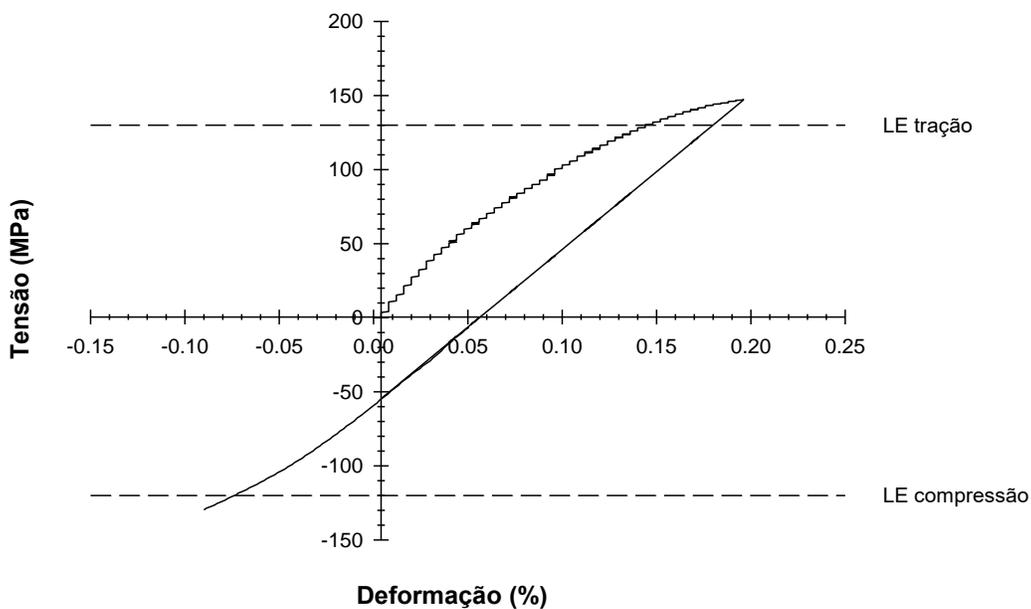


Figura 22 - Ensaio de efeito Bauschinger com 0,3% de pré-deformação para o latão.
Latão (0,3%)

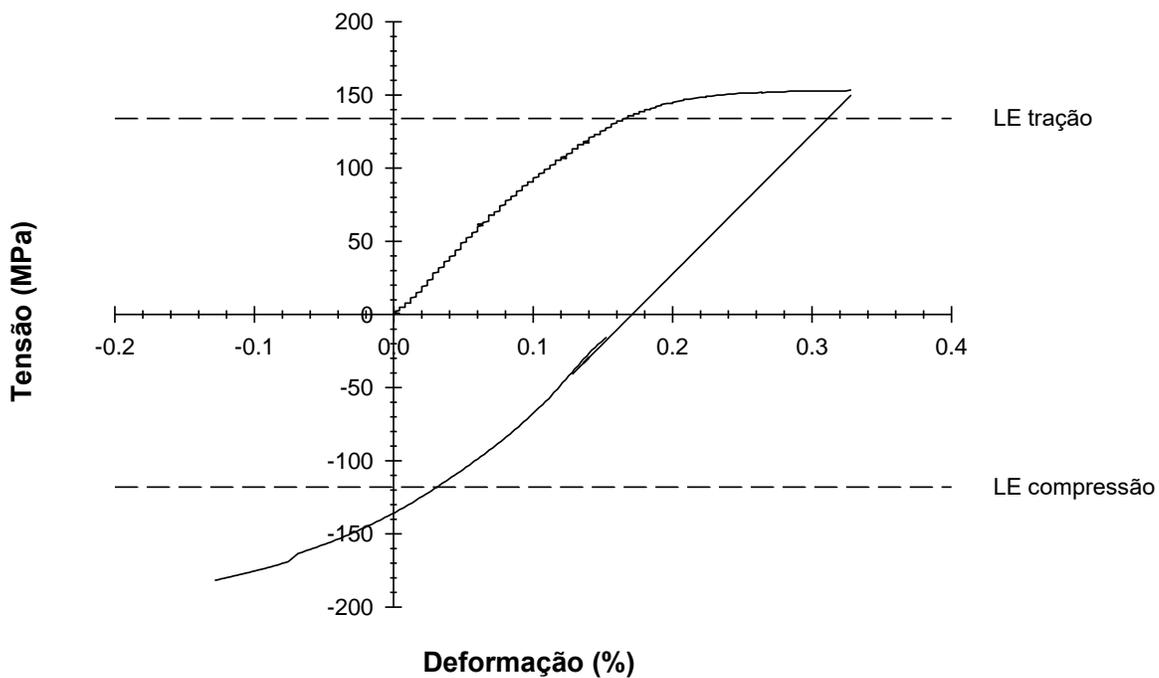
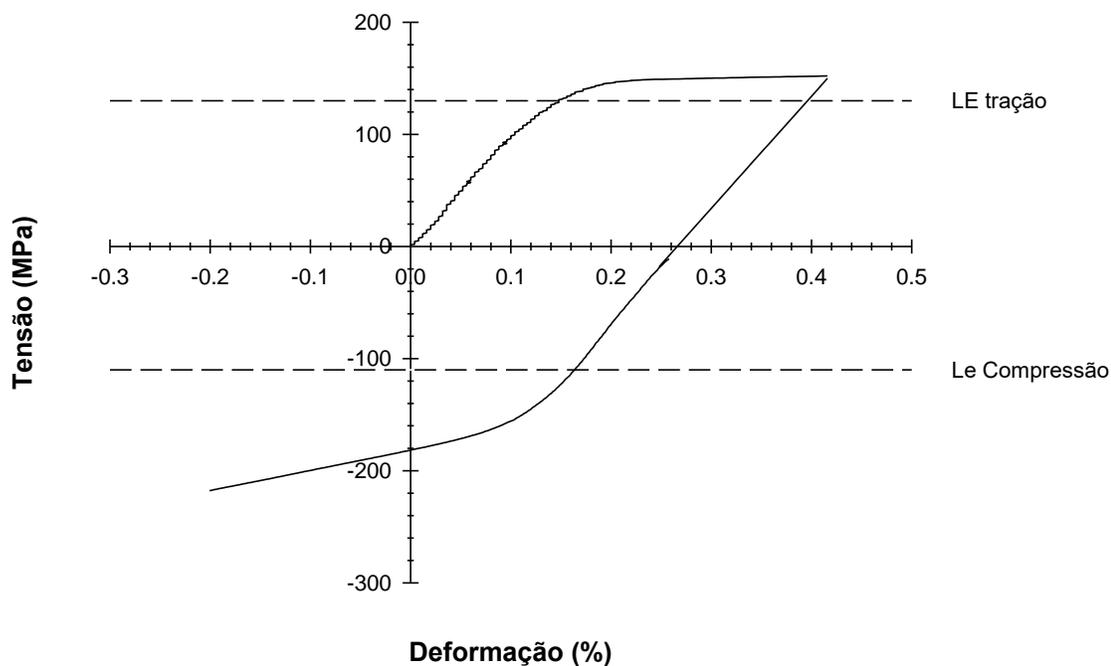
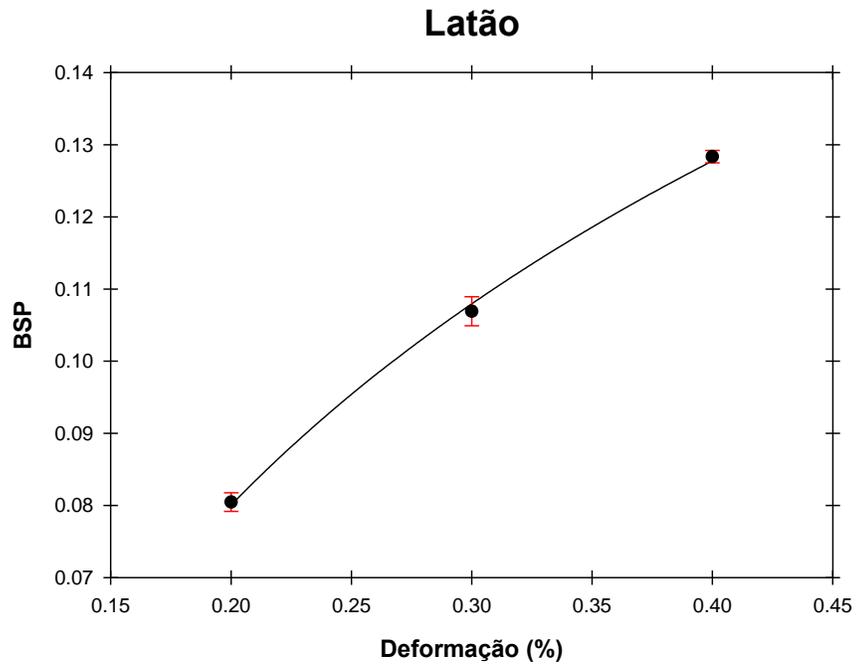
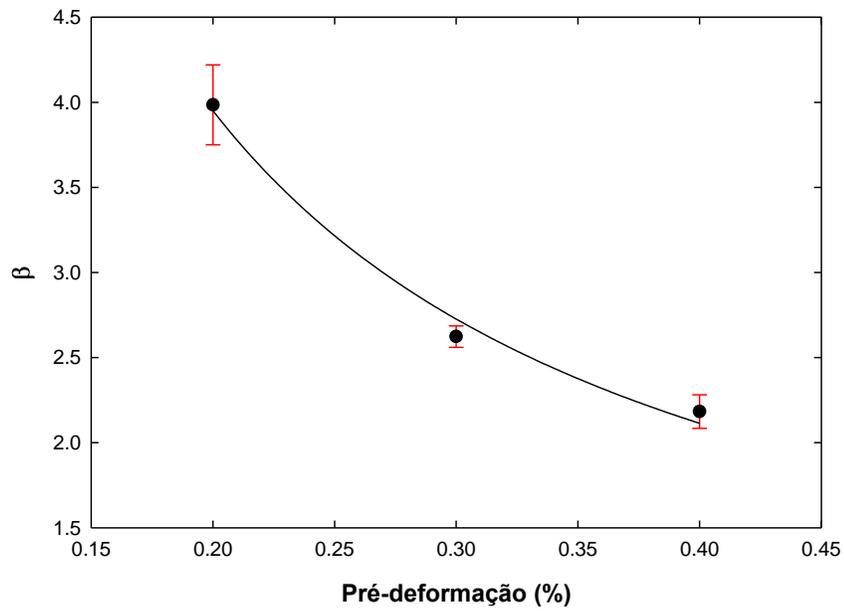


Figura 23 - Ensaio de efeito Bauschinger com 0,4% de pré-deformação para o latão.
Latão (0,4%)



A Figura 24 apresenta os valores de BSP e a Figura 25 os valores de β para o latão. Em virtude de nesse estudo os valores do limite de escoamento para o cobre terem aumentado na reversão do carregamento, possivelmente pelas razões discutidas anteriormente (seção 3.3), os parâmetros BSP e β não foram calculados para o mesmo uma vez que não seriam representativos do fenômeno Bauschinger.

Figura 24 - BSP em função da pré-deformação para o latão.

Figura 25 - β em função da pré-deformação para o latão.

O parâmetro de tensão Bauschinger, BSP, é um parâmetro determinado experimentalmente, onde σ_f e σ_r são medidos diretamente nas curvas de tração e compressão, conforme ilustrado na Figura 2. De acordo com Magnusson et al. (1994) BSP a melhor aproximação para esse parâmetro é dada pela Equação 4. Note que pelas Figuras 18 a 23 σ_f e σ_r possuem sinais opostos, assim seus valores absolutos foram utilizados na Equação 2. Dessa forma, se BSP=0, então o efeito Bauschinger seria ausente num determinado material. A Figura 24 apresenta os valores de BSP em função da pré-deformação, ϵ_p , para o latão.

Segundo Magnusson et al. (1994), a limitação desse parâmetro para analisar o efeito Bauschinger é que o BSP não incorpora explicitamente o coeficiente de encruamento. Isso pode ser verificado também na Figura 15 e Figura 17, onde é facilmente verificado uma redução no coeficiente de encruamento após valores maiores de pré-deformação no ensaio de tração. Assim, o parâmetro β seria mais adequado para descrever o efeito Bauschinger, pois é expresso em função das propriedades do material e da pré-deformação aplicada (TAN, MAGNUSSON e PERSSON, 1994). Como pode ser verificado na Figura 25, os valores de β são maiores para os menores valores de pré-deformação. A partir das figuras do ensaio Bauschinger para o latão, Figura 21 a Figura 23, nota-se que o encruamento sofrido em tração $|\sigma_f| - |\sigma_0|$ é relativamente menor em comparação com o amolecimento que o material sofreu durante a reversão do carregamento $|\sigma_f| - |\sigma_r|$ o que resultaria em grandes valores para β . O decréscimo de β em função da pré-deformação é semelhante a resultados obtidos por outros pesquisadores (TAN, MAGNUSSON e PERSSON, 1994), e devido a sua natureza é suposto também ser decrescente para outros materiais.

O parâmetro de Bauschinger avalia a habilidade de encruamento e amolecimento de um determinado material em situações de reversão de carregamento. Assim, quando parâmetros de encruamento do material, n e k , são conhecidos, e o fator BSP pôde ser determinado experimentalmente, então β fornece valores representativos do efeito Bauschinger a qualquer pré-deformação, conforme também pode ser visto na Figura 25, que apresenta valores medidos experimentalmente de β juntamente com seus valores previstos.

5 CONCLUSÃO

O fenômeno onde os materiais exibem redução no seu limite de escoamento quando submetidos a inversões no sentido de carregamento, utilizando ensaios de tração seguido por compressão, foi estudado nesse trabalho. Embora o efeito Bauschinger seja consequência natural de tensões residuais, o presente trabalho foi limitado a uma visão macroscópica da teoria da plasticidade. Modelos mais gerais do fenômeno podem ser encontrados em trabalhos de outros autores (BATE e WISLSON, 1985) (CHUN, JINN e LEE, 2001) (CHIANG, 1999), e podem ser apoiados por técnicas mais modernas análise, como difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura (MET).

Desse trabalho pode-se concluir que:

1. Os valores para o limite de escoamento, módulo de elasticidade e coeficiente de encruamento, obtidos em tração para os materiais em estudo, são coerentes com os obtidos em literatura.
2. Houve discrepâncias nos valores de propriedades obtidos a partir do ensaio de compressão. Flambagem e/ou embarrigamento podem ser as possíveis fontes de tais erros. Entretanto acredita-se que os valores de tensão obtidos para o latão sejam coerentes e, assim, foram usados na determinação dos parâmetros para quantificar o efeito Bauschinger.
3. Para todas as amostras de latão foi verificado redução no limite de escoamento durante a compressão do mesmo. Foi possível assim calcular parâmetros representativos do efeito Bauschinger como BSP e β e analisar como eles são influenciados pelo aumento da pré-deformação aplicada. Comportamentos semelhantes à de outros autores foram encontrados.

6 TRABALHOS FUTUROS

Como possíveis trabalhos futuros, pode-se apontar:

- Estudar como diferentes configurações na razão D/L afetam as curvas tensão-deformação para o cobre em compressão, e/ou quais lubrificantes seriam melhor aplicáveis a fim de se reduzir erros nos resultados obtidos.
- Obter dados referente ao efeito Bauschinger para o cobre eletrolítico com o objetivo de permitir maiores afirmações acerca de como a variação em composição química dessas ligas afetam o efeito Bauschinger e correlacionar isso com a sua respectiva energia de falha de empilhamento.
- Calcular diretamente a energia de falha de empilhamento nessas ligas através da técnica de microscopia eletrônica de transmissão e correlacionar esses valores a modelos teóricos mais elaborados do efeito Bauschinger.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABEL, A.; MUIR, H. The Bauschinger Effect and Stacking Fault Energy. **Philosophical Magazine**, v. 27, p. 585-594, Maio 1973.

ARAN, A.; DEMIRKOL, M.; KARABULUT, A. Bauschinger Effect in Precipitation-Hardened Aluminium Alloy 2024. **Materials Science and Engineering**, v. 89, p. L35-L39, Janeiro 1987.

ASARO, R. J. Elastic-Plastic Memory and Kinematic-Type Hardening. **Acta Metallurgica**, Dearborn, v. 23, p. 1255-1265, Outubro 1975.

ASM Handbook. 2a. ed. [S.I.]: ASM International, v. 13, 2005.

ATKINSON, J. D.; BROWN, L. M.; STOBBS, M. The work hardening of copper-silica: IV. The Bauschinger effect and plastic relaxation. **Philosophical Magazine**, v. 30, p. 1247-1280, Maio 1974.

BANERJEE, J. K. Barreling of solid cylinders under axial compression. **Transaction of the ASME**, San-Cristobal, v. 107, p. 138-144, Abril 1985.

BATE, P. S.; WISLSON, D. V. Analysis of the Bauschinger Effect. **Acta Metall**, Birmingham, v. 34, n. 6, p. 1097-1105, Agosto 1985.

BAUSCHINGER, J. Variations in the elastic limit of iron and steel. **Iron and Steel Inst.**, v. I, p. 442-444, 1881.

BUCIUMEANU, M. et al. Fatigue Life Predictions Including the Bauschinger Effect. **International Journal of Fatigue**, v. 33, p. 145-152, Julho 2010.

CACERES, C. H.; GRIFFITHS, J. R.; REINER, P. The Influence of Microstructure on the Bauschinger Effect in Al-Si-Mg Casting Alloy. **Acta Materialia**, v. 44, p. 15-23, Março 1995.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 8a. ed. [S.l.]: LTC, 2012.

CHAWLA, K. K.; MEYERS, M. A. **Mechanical Behavior of Materials**. New York: Cambridge University Press, 2009.

CHIANG, D. The generalized Masing models for deteriorating hysteresis and cyclic plasticity. **Applied Mathematical Modelling**, v. 23, p. 847-863, Março 1999.

CHUN, B. K.; JINN, J. T.; LEE, J. K. Modeling the Bauschinger effect for sheet metals. **International journal of Plasticity**, v. 18, p. 571-595, Julho 2001.

DIEHL, J. **Z. Metall**, v. 47, p. 331, 1956.

DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. London: McGraw-Hill Book Company, 1961.

DIETER, G. E.; KUHN, H. A.; SEMIATIN, S. L. **Handbook of workability and process design**. [S.l.]: ASM International, 2003.

ENGINEER'S Handbook. **Engineer's Handbook**, 2006. Disponível em: <<http://www.engineershandbook.com/Tables/frictioncoefficients.htm>>. Acesso em: 14 Junho 2017.

GOMES, M. R.; BRESCIANI, E. **Propriedades e usos de metais não-ferrosos**. São Paulo: ABM, 1987.

HEIPLE, C. R.; CARPENTER, S. H. **Nondestructive Testing Monographs and Tracts**. 1a. ed. New York: Gordon and Breach Science Publishers, v. II, 1983.

INFORMET: Metais & Ligas. Disponível em: <<http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=53>>. Acesso em: 7 Fevereiro 2017.

JORDON, J. et al. Damage and Stress State Influence on the Bauschinger Effect in Aluminum Alloys. **Mechanics of Materials**, v. 39, p. 920-931, Março 2007.

KATO, H.; SASAKI, K.; MORI, T. Four-point bending test of the Bauschinger Effect in prestrained IF Steel thin sheet. **Materials Science & Engineering A**, n. 642, p. 150-156, 2015.

KUHLMANN, D. Theory of Workhardening. **Metallurgical Transactions A**, v. 16, n. 12, p. 2091-2108, Dezembro 1985.

MAZZOLANI, F. M. **Aluminum Alloys Structures**. 2a. ed. Nápoles: CRC Press, 1995.

NATAL, R. M.; DINIS, L. M. **Teoria da Plasticidade**. [S.l.]: [s.n.], 2005.

PEDERSEN, O. B.; BROWN, L. M.; STOBBS, W. M. The Bauschinger Effect in Copper. **Acta Metallurgica**, Roskilde, v. 29, p. 1843-1850, Março 1981.

RAJAN, K.; TEREDA, T. Back Stresses in Single-Phase, Low stacking Fault Energy Alloys. **Scripta Metallurgica**, Ottawa, v. 18, p. 379-381, Dezembro 1984.

ROLLET, A. D.; KOCKS, U. F. **A review of the Stages of Work Hardening**. [S.l.]: [s.n.], 1993.

ROOY, E. L. Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys. In: _____ **ASM Handbook: Properties and Selection of Irons, Steels, and High Performance Alloys**. [S.l.]: ASM International, v. I, 2005.

SALEH, Y.; MARGOLIN, H. Bauschinger effect during cyclic straining of two ductile phase alloys. **Acta Metallurgica**, v. 27, p. 535-544, Julho 1979.

SCHON, C. G. **Mecânica dos Materiais: Fundamentos e Tecnologia do Comportamento Mecânico**. 1a. ed. [S.l.]: Elsevier, 2013.

SKELTON, R. P.; CHRIST, H. -J.; MAIER, H. J. The Bausching Effect, Masing model and the Ramberg - Osgood relation for Cyclic deformation in metals. **Materials Science and Engineering**, v. A238, p. 377-390, 1997.

SKELTON, R. P.; MAIER, H. J.; CHRIST, H. -J. The Bauschinger effect, Masing model and the Ramberg-Osgood relation for cyclic deformation in metals. **Materials Science & Engineering A**, Siegen, v. 238, p. 377-390, Maio 1997.

SOUZA, S. Ensaio mecânicos de materiais metálicos - fundamentos teóricos e práticos, n. 5, 1979.

SOWERBY, R.; UKO, D. K.; TOMITA, Y. A Review of Certain Aspects of the Bauschinger Effect in Metals. **Materials Science and Engineering, Elsevier**, Lausanne, p. 43-58, Maio 1979.

TAN, Z.; MAGNUSSON, C.; PERSSON, B. The Bauschinger Effect in Compression-Tension of Sheet Metals. **Materials Science and Engineering A**, v. 183, p. 31-38, Maio 1994.

TAYLOR, G. The Mechanism of Plastic Deformation of Crystals. **Proceedings of the Royal Society A**, London, v. 145, p. 362-387, Julho 1934.

TIME Group Inc. **Made-in-China.com**, 2014. Disponível em: <http://pt.made-in-china.com/co_timetestingmachine/image_Electronic-Universal-Testing-Machine-WDW-100E_husiigirn_FvuTHjznLSiC.html>. Acesso em: 25 Março 2017.

TYLER, E. D.; OLIN CORPORATION; BLACK, T. W. Introduction to copper and copper alloys. In: _____ **ASM Metals Handbook**. [S.l.]: ASM, v. II, 2005. p. 760.

UKO, D. K. **The Bauschinger Effect and Applications to the Manufacture of High Strength Linepipe**. [S.l.]: National Library of Canada, 1978.

URRIOLAGOITIA-SOSA, G.; DURODOLA, J. F.; FELLOWS, N. A. Determination of Tensile and Compressive Stress Strain Curves from Bend Tests. **Applied Mechanics and Materials**, v. 1-2, p. 133-138, 2004.

WILSON, D. V.; KONNAN, Y. A. Work Hardening in a Steel Containing a Coarse Dispersion of Cementite Particles. **Acta Metallurgica**, v. 12, p. 617-628, Maio 1964.

APÊNDICE A – MODELOS TEÓRICOS DO EFEITO BAUSCHINGER

Modelo Baseado em Tensões Residuais

De acordo com este modelo, uma função matemática pode ser usada para descrever a variação de tensão residual no interior de um corpo de prova. Um exemplo de função e a utilização dela para alguns valores são apresentados na Figura 26. Alguns fenômenos conhecidos no efeito Bauschinger, como a redução do limite de deformação elástica e o abaulamento da curva podem ser observados. Por outro lado, devido não haver distinção entre o sentido de carregamento na curva, o amolecimento permanente, $\Delta\sigma$, não é aparente (SOWERBY, UKO e TOMITA, 1979).

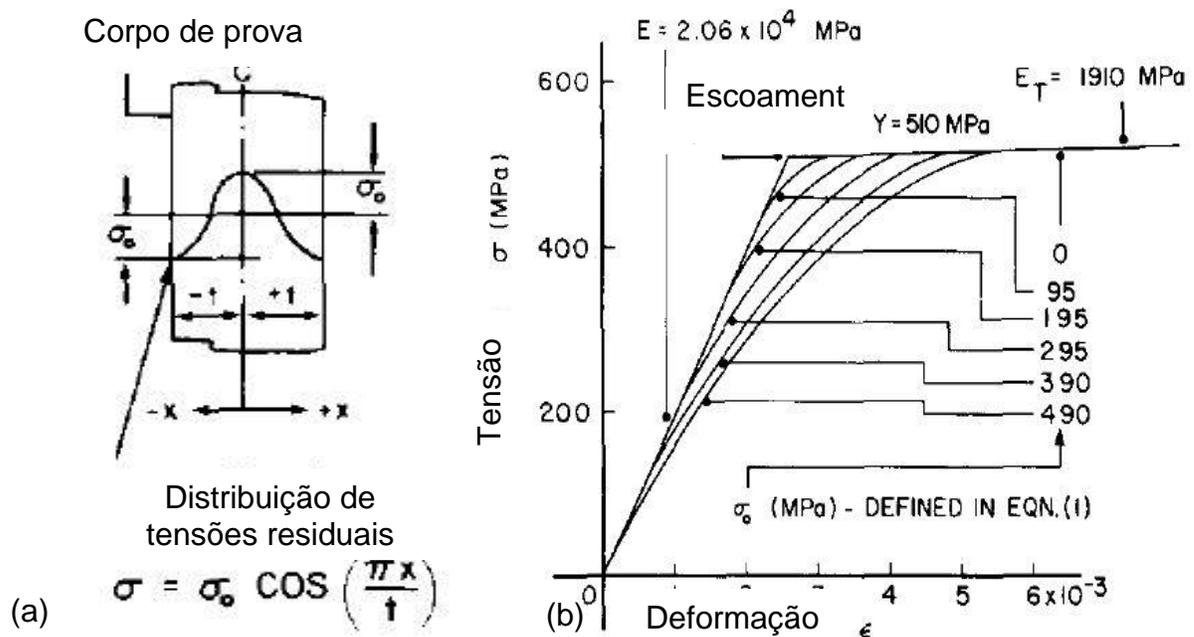


Figura 26 - (a) Distribuição de tensões residuais. (b) Influência de uma dada distribuição na curva tensão-deformação.

Fonte: Adaptado de Sowerby, Uko e Tomita (1979).

O histórico de deformação e a microestrutura gerada não são levados em consideração. Entretanto é assumido que as tensões estão distribuídas uniformemente por toda a seção transversal de um material que teria normalmente comportamento elasto-plástico com encruamento linear (SOWERBY, UKO e TOMITA, 1979) (NATAL e DINIS, 2005).

O comportamento do material quando testado em tração ou compressão também poderia ser examinado utilizando-se outras funções para a distribuição das tensões. Entretanto, devido à falta de esclarecimento sobre o surgimento das tensões residuais, este modelo apresenta uma interpretação simples sobre o efeito Bauschinger (SOWERBY, UKO e TOMITA, 1979).

Modelo de Masing

O trabalho de Masing tem servido como base para muitos dos modelos de endurecimento cinemático desenvolvidos para representar o efeito Bauschinger e as tensões internas geradas durante a deformação mecânica de materiais policristalinos (BATE e WISLSON, 1985) (CHIANG, 1999). Neste modelo o material é suposto ser constituído por um número n de elementos elásticos-perfeitamente plásticos, $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$, mas com diferentes resistências. Cada elemento é geometricamente idêntico e seu limite de escoamento em tensão e compressão é considerado igual, conforme Figura 27.

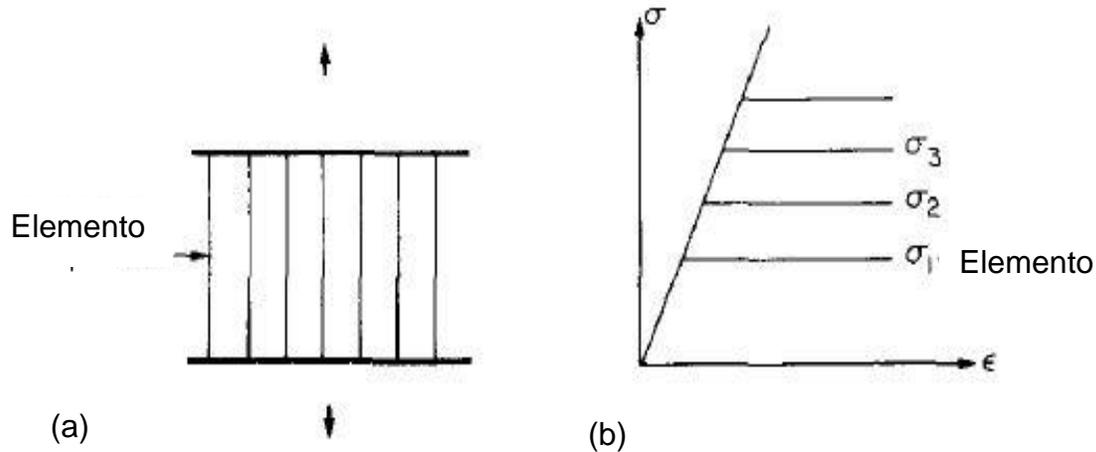


Figura 27 - Modelo de Masing. a) Elementos elásticos-perfeitamente plásticos conectados em paralelo. b) Ilustração da curva tensão-deformação de cada elemento.

Fonte: Adaptado de Sowerby, Uko e Tomita (1979).

Considerando apenas dois elementos com tensões de escoamento σ_1 e σ_2 , respectivamente. Durante o carregamento em tração, o elemento 1 irá escoar a uma deformação ε_1 , e a tensão média da estrutura será σ_1 . O segundo elemento irá escoar quando a tensão alcançar σ_2 (deformação ε_2), e a tensão média na estrutura será $(\sigma_1 + \sigma_2)/2$. Em outras palavras, o elemento 1 se torna plástico enquanto o elemento 2 ainda apresenta comportamento elástico. A curva tensão-deformação para esta situação é apresentada na Figura 28. O aumento do número de elemento teria o efeito de tornar a curva mais suave. Dessa forma, utilizando n elementos, a tensão média seria representada pela Equação 8.

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \dots + \sigma_n)}{n} \quad (8)$$

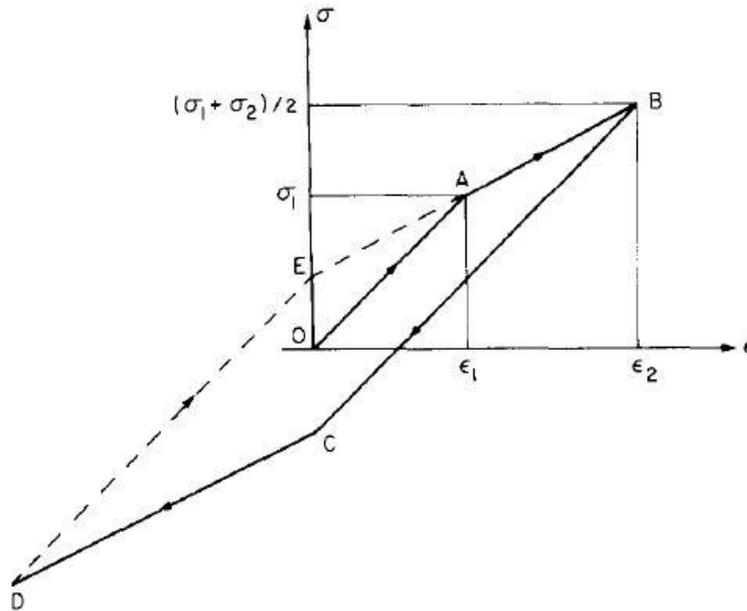


Figura 28 - Comportamento de dois elementos de acordo com o modelo de Masing.
Fonte: Adaptado de Sowerby, Uko e Tomita (1979).

Se após fosse alcançado o ponto B da curva, houvesse a inversão do carregamento, então a curva desse comportamento seria representada por BCD. Assim, considerando elementos de mesma área e onde σ_1 é igual a σ_2 , é fácil demonstrar que a curva de tração, OAB, é duas vezes menor que a curva de compressão BCD. Dessa forma, a inversão do carregamento após a pré-deformação dos elementos, resultaria em um padrão de tensão residual no interior do material devido alguns elementos estarem em compressão enquanto outros ainda estão em tração.

Independentemente do número de elementos e de suas áreas, podem ser feitas as seguintes afirmações:

1. A tensão Bauschinger, $\sigma_f - \sigma_r$, será sempre exibida;
2. Amolecimento permanente, $\Delta\sigma$, não será exibido para elementos elásticos-perfeitamente plásticos. Para que isso ocorra, pelo menos um elemento deve ser perfeitamente elástico. Assim, o amolecimento permanente dependeria da quantidade desses elementos presentes e de

suas resistências. Dessa forma, todo encruamento sofrido pelo material seria devido às tensões residuais.

O modelo de Masing pode ser modificado de forma que todos os elementos possam ser encruados. A maneira mais simples para isso seria considerar que todos os elementos encruariam na mesma taxa e de uma forma linear (SOWERBY, UKO e TOMITA, 1979).

Modelos Microscópicos

Os modelos anteriormente propostos, consideram o efeito Bauschinger como decorrente somente das tensões internas geradas durante a deformação da microestrutura. Entretanto, verificou-se que esse efeito se apresentava maior em materiais que possuem a presença de precipitados no interior da matriz (SALEH e MARGOLIN, 1979). Portanto, além da contribuição das tensões residuais geradas, os modelos microscópicos levam em consideração a fração volumétrica dessas partículas e os efeitos da relaxação plástica.

Dessa forma, é proposto que depois do início do escoamento do material, o seu endurecimento é devido, principalmente, a dois fatores. O primeiro é o aumento da densidade de discordâncias em regiões de obstáculos, o que gera aumento da resistência independente do sentido do carregamento, e o segundo fator, é que as partículas presentes na matriz, dão origem a tensões internas, σ_M , que favorecem o processo de inversão do carregamento. Dessa forma, a tensão total no carregamento positivo é dada pela adição escalar desses termos. É também proposto por este modelo que ambos σ_{enc} e σ_M são proporcionais à raiz quadrada da deformação plástica, ϵ_p , e ao inverso da raiz quadrada do tamanho das partículas, enquanto que σ_M é proporcional à fração volumétrica, f , e σ_{enc} é proporcional à $f^{1/2}$ (PEDERSEN, BROWN e STOBBS, 1981)

(SOWERBY, UKO e TOMITA, 1979). Portanto, a tensão no carregamento positivo, σ_f , é representada pela Equação 9.

$$\sigma_f = \sigma_0 + \sigma_{enc} + \sigma_M$$

$$\sigma_f = \sigma_0 + AGf^{\frac{1}{2}} \left(\frac{b\varepsilon_p}{r} \right)^{\frac{1}{2}} + BGf \left(\frac{b\varepsilon_p}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Onde σ_0 é a tensão de escoamento inicial, b é o vetor de Burgers, G é o módulo de cisalhamento e os coeficientes A e B são dependentes da forma das partículas.

Atkinson et al. (1974) demonstrou um amolecimento permanente bem definido para ligas de cobre-sílica, e para esse material foi proposto que $2\sigma_M = \Delta\sigma_p$.

Nenhuma outra fonte de endurecimento do material, como o endurecimento da matriz na ausência de partículas, é considerada nesse modelo (BATE e WISLSON, 1985) (SOWERBY, UKO e TOMITA, 1979).

APÊNDICE B – CERTIFICADO DOS MATERIAIS

 CECILSA LAMINAÇÃO DE METAIS		PAG.: 1/1																		
Certificado de Análise Completo Nro :006980/2016																				
CLIENTE: SULFERRACO COMERCIAL DE FERROS E ACO LTDA PRODUTO: VERG REDONDO COBRE 110 1/2 DURO 9,52 2900,00 3100,00 DATA EMISSÃO: 18/05/2016 ORDEM COMPRA: 030516/3	Nota Fiscal: 0112211	Pedido Cecil: 140237/003																		
Lote: 101.062701																				
ANALISE QUIMICA LIGA 0110																				
% PESO																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;"></th> <th style="width: 35%;">VALOR</th> <th style="width: 35%;">ESPECIFICAÇÕES</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">COBRE</td> <td style="text-align: center;">RESTANTE</td> <td style="text-align: center;">RESTANTE</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">CHUMBO MÁX.</td> <td style="text-align: center;">0,012</td> <td style="text-align: center;">0,035</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">FERRO MÁX.</td> <td style="text-align: center;">0,008</td> <td style="text-align: center;">0,035</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">NIQUEL MÁX.</td> <td style="text-align: center;">0,003</td> <td style="text-align: center;">0,013</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">ESTANHO MÁX.</td> <td style="text-align: center;">0,003</td> <td style="text-align: center;">0,013</td> </tr> </tbody> </table>				VALOR	ESPECIFICAÇÕES	COBRE	RESTANTE	RESTANTE	CHUMBO MÁX.	0,012	0,035	FERRO MÁX.	0,008	0,035	NIQUEL MÁX.	0,003	0,013	ESTANHO MÁX.	0,003	0,013
	VALOR	ESPECIFICAÇÕES																		
COBRE	RESTANTE	RESTANTE																		
CHUMBO MÁX.	0,012	0,035																		
FERRO MÁX.	0,008	0,035																		
NIQUEL MÁX.	0,003	0,013																		
ESTANHO MÁX.	0,003	0,013																		
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS / MECÂNICAS																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;"></th> <th style="width: 35%;">VALOR</th> <th style="width: 35%;">ESPECIFICAÇÕES</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">DUREZA</td> <td style="text-align: center;">42,000 HRB</td> <td style="text-align: center;">26,000HRB a 49,000 HRB</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">CONDUTIVIDADE MIN</td> <td style="text-align: center;">101,500 %IACS</td> <td style="text-align: center;">97,400 %IACS</td> </tr> </tbody> </table>				VALOR	ESPECIFICAÇÕES	DUREZA	42,000 HRB	26,000HRB a 49,000 HRB	CONDUTIVIDADE MIN	101,500 %IACS	97,400 %IACS									
	VALOR	ESPECIFICAÇÕES																		
DUREZA	42,000 HRB	26,000HRB a 49,000 HRB																		
CONDUTIVIDADE MIN	101,500 %IACS	97,400 %IACS																		
Rastreabilidade: Lote: OP 0056965; 0062701 Lote: Corridas: 0900748/15; 101.056965;																				
Este material atende a directiva RoHS 2011/65/EU																				
Responsável: ANTONIO CANEIAS CRQ 04460654 - IV REGIÃO																				
CECIL S/A Laminação de Metais Rod. Eng. Rene Benedito Silva, 580 06683-000 - Itapevi - SP	Fone Venda: 11 4143-7272 Fax Comercial: 11 4143-5311 Site: www.cecil.com.br																			



Certificado de Análise Típico Nº 207691 / 2011

Cliente: SULFERRACO COMERCIAL DE FERROS E ACO LTDA

Produto: VERG REDONDO LATAO 360 1/2 DURO 9,52

Data Análise: 20/10/11 RM: Email06102 Nota Fiscal: 29674 Pedido Cecil: 172916

ANÁLISE QUÍMICA - LIGA 360 (% PESO)

	VALOR	(ESPECIFICAÇÕES)
Cu:	61,978	(60,500 a 62,500)
Pb:	3,169	(2,800 a 3,300)
Fe:	0,198	(0,050 a 0,250)
Zn:	Restante	(Restante)

20/10/2011
Data

Joel Justi
Controle de Qualidade

CECIL S/A Laminação de Metais
Rodovia Eng. Renê Benedito Silva, 580
06683-000 - Itapeví - SP

Fone Vendas: 11 4143 7272
Fax Comercial: 11 4141 5314
Site: www.cecil.com.br