



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias

Hamilton da Cunha Carnaval

**Aplicação do ensaio de compressão em discos empilhados para produção de
moedas de prata esterlina Ag925 e cuproníquel Cu75Ni25**

Rio de Janeiro

2024

Hamilton da Cunha Carnaval

Aplicação do ensaio de compressão em discos empilhados para produção de moedas de prata esterlina Ag925 e cuproníquel Cu75Ni25

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação, Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Martins Ferreira

Rio de Janeiro

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CZO

C288 Carnaval, Hamilton da Cunha

Aplicação do ensaio de compressão em discos empilhados para produção de moedas de prata esterlina Ag925 e cuproníquel Cu75Ni25 / Hamilton da Cunha Carnaval - 2024.

115 f.

Orientador: Carlos Alberto Martins Ferreira

Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais.

1. Ciência e Tecnologia de Materiais - Teses. 2. Curva de escoamento - Teses. 3. Ensaio de compressão - Teses. 4. Discos empilhados – Teses. 5. Moedas de prata esterlina – Teses. 6. Moedas de cuproníquel – Teses. I. Ferreira, Carlos Alberto. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias. III. Título.

CDU 620

Bibliotecária: Joice Soltosky Cunha – CRB 7 5946

Autorizo apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que cite a fonte.

Assinatura

Data

Hamilton da Cunha Carnaval

Aplicação do ensaio de compressão em discos empilhados para produção de moedas de prata esterlina Ag925 e cuproníquel Cu72Ni25

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação, Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovado em: 27 de março de 2024.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Alberto Martins Ferreira (Orientador)
Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias - UERJ

Prof^a. Dr^a. Silvana de Abreu Martins
Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

Prof. Dr. Luís Eduardo Terra de Almeida
Universidade Federal Fluminense - UFF

Rio de Janeiro

2024

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à minha família que, resiliente, encorajou-me a continuar mesmo diante das ausências, e ao meu pai Hamilton (in memorian), que sempre valorizou o exercício da aprendizagem.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter estado ao meu lado como sempre.

A minha mãe pela base moral e pelas palavras simples que sempre me deram orientação e fortaleza ao longo da vida.

Aos queridos amigos de equipe Bruno Moraes, Thiago Louzada, Gilberto Freitas e Márcia que não hesitaram em me auxiliar e, assim, foram fundamentais ao sucesso dessa empreitada.

Aos amigos de trabalho Victor Hugo, Nielson e Alberto que igualmente ajudaram com as suas expertises.

Ao meu orientador Professor Dr. Carlos Alberto Martins Ferreira, pela parceria, estímulo e tranquilidade necessária.

Aos Professores Dr^a. Silvana de Abreu Martins e Luís Eduardo Terra de Almeida por humildemente compartilharem o seu conhecimento.

À Casa da Moeda do Brasil pela oportunidade de realizar uma capacitação profissional de qualidade.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas e a empresa Riolab por disponibilizarem seus recursos para a coleta de informações, as quais se materializaram na base do presente trabalho.

Onde há um desejo, há um caminho.

Albert Einstein

RESUMO

CARNAVAL, Hamilton da Cunha. **Aplicação do ensaio mecânico de compressão em discos empilhados para produção de moedas de prata esterlina Ag925 e cuproníquel Cu75Ni25**. 2024. 90 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2024.

A produção de uma moeda é o resultado de diversos processos de conformação mecânica e o mais importante deles envolve o forjamento a frio em matriz fechada, onde um disco da matéria prima é prensado entre duas matrizes e um anel de retenção chamado de virola. Essa parte do processo produtivo tem em comum a aplicação de altas cargas compressivas com um baixo fluxo do metal. E o resultado é o preenchimento de múltiplas microcavidades da ferramenta com a matéria prima e a consequente formação dos relevos em todas as faces do disco. Apenas a topografia da peça é afetada na ordem de micrômetros, ao contrário do forjamento tradicional, e as tolerâncias dimensionais devem ser controladas com rigor. A pressão pode aumentar sem limites durante o processo até que a resistência da matriz ou a capacidade da prensa sejam excedidos, sendo necessária uma escolha adequada dos parâmetros de trabalho. O acesso à curva de escoamento do material é fundamental nesse sentido e o ensaio normatizado de compressão é uma das formas de obtê-la, ficando, entretanto, restrita a disponibilidade de chapas e placas da matéria prima com dimensões compatíveis às do corpo de prova, que é usualmente um cilíndrico sólido. Nesse estudo é abordada a aplicação do ensaio de compressão em discos empilhados como meio alternativo ao ensaio tradicional para a determinação da curva de escoamento para prata esterlina e cuproníquel. No caso da prata as curvas foram obtidas, inicialmente, pelo método tradicional para um cilindro sólido de 20 milímetros de altura e 40 milímetros de diâmetro e, então, comparadas com outras adquiridas pelo empilhamento de 9 discos do mesmo material. Ainda para a prata foram analisadas as curvas do metal encruado e recozido. No caso do cuproníquel as curvas foram obtidas para discos de 6,4 milímetros de altura e 13 milímetros de diâmetro e as correlações foram efetuadas variando-se a geometria das pilhas com 4 e 6 discos. O resultado experimental mostrou que as curvas de escoamento delineadas tanto com discos empilhados de prata esterlina recozida como de cuproníquel foram compatíveis com a literatura congênere, respeitando desvios da ordem de 10% e 5% respectivamente. A análise também indicou que a representação das curvas dos cilindros sólidos de prata não foi convergente com as pilhas de discos não recozidos do mesmo material, inviabilizando utilizá-las como referência. Em outro ensaio, as curvas foram capazes de ilustrar a diferença em termos do tratamento térmico entre amostras. Enfim, o presente estudo identificou uma série influências à modelagem das curvas, relacionadas a preparação do ferramental, à montagem das pilhas e à determinação dos parâmetros de deformação.

Palavras-chave: Curva de escoamento, ensaio de compressão, discos empilhados, moedas de prata e de cuproníquel.

ABSTRACT

CARNAVAL, Hamilton da Cunha. **Application of mechanical compression testing on stacked discs for the production of Ag925 sterling silver and Cu75Ni25 cupronickel coins**. 2024. 90f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2024.

The production of a coin is the result of several mechanical forming processes and the most important of them involves cold forging in a closed die, where a disc of raw material is pressed between two dies and a retention ring called a collar. This part of the production process has in common the application of high compressive loads with a low metal flow. And the result is the filling of multiple microcavities of the tool with the raw material and the consequent formation of reliefs on all faces of the disc. Only the topography of the part is affected on the order of micrometers, unlike traditional forging, and dimensional tolerances must be strictly controlled. Pressure can increase without limits during the process until the die resistance or press capacity is exceeded, requiring an appropriate choice of work parameters. Access to the flow curve of the material is fundamental in this sense and the standardized compression test is one of the ways to obtain it, however, the availability of sheets and plates of the raw material with dimensions compatible with those of the test specimen is restricted, which is usually a solid cylindrical. This study addresses the application of the compression test on stacked discs as an alternative to the traditional test for determining the flow curve for sterling silver and cupronickel. In the case of silver, the curves were initially obtained using the traditional method for a solid cylinder 20 millimeters high and 40 millimeters in diameter and then compared with others acquired by stacking 9 discs of the same material. Also for silver, the curves of the hardened and annealed metal were analyzed. In the case of cupronickel, the curves were obtained for discs measuring 6.4 millimeters in height and 13 millimeters in diameter and the correlations were carried out by varying the geometry of the stacks with 4 and 6 discs. The experimental result showed that the flow curves outlined with both stacked annealed sterling silver and cupronickel discs were compatible with similar literature, respecting deviations of the order of 10% and 5% respectively. The analysis also indicated that the representation of the curves of the solid silver cylinders did not converge with the stacks of unannealed discs of the same material, making it impossible to use them as a reference. In another test, the curves were able to illustrate the difference in terms of heat treatment between samples. Finally, the present study identified a series of influences on the modeling of the curves, related to the preparation of the tooling, the assembly of the stacks and the determination of the deformation parameters.

Keywords: Yield curve, compression test, stacked discs, silver and cupronickel coins.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 -	Classificação dos processos de conformação mecânica por tipo de esforço.	22
Figura 1 -	Processos de forjamento em matriz fechada e aberta.....	24
Quadro 2 -	Comparação entre processo de formação a quente, a morno e a frio	25
Figura 2 -	Tensões em um elemento de volume	27
Figura 3 -	Mudança de dimensões em um elemento de volume	28
Figura 4 -	Curva tensão deformação esquemática	30
Figura 5 -	Curvas de escoamento e de trabalho específico para aços St 14, St 37 (DIN) e C35 normalizado.....	31
Figura 6 -	Curva tensão-deformação verdadeira para prata fina 99,9%	32
Quadro 3 -	Estrutura cristalina dos metais mais importantes	33
Figura 7 -	Exemplificação de moedas de circulação, de investimento e comemorativa	34
Figura 8 -	Esquema de um disco orlado seccionado	35
Figura 9 -	Conjunto ferramental de cunhagem	37
Figura 10 -	Exemplificação da evolução da força de cunhagem de uma moeda	38
Quadro 4 -	Parâmetros que influenciam a deformabilidade	39
Quadro 5 -	Principais fatores metalúrgicos na forjabilidade a frio.....	39
Figura 11 -	Elementos de relevo em matrizes de cunhagem de moedas.....	41
Figura 12 -	Corpo de prova padrão para teste de tensão: barra e tira.....	42
Figura 13 -	Representação da curva tensão deformação para teste de tração	42
Figura 14 -	Estricção em ensaio de tração para prata em deformação 0,35.....	43
Figura 15 -	Efeito de embarrilamento durante a compressão de uma amostra cilíndrica	44
Figura 16 -	Compressão de discos empilhados com amostra guiada e sem guia.....	46
Figura 17 -	Estratificação de discos deformados (extremidade: 1 a 8; meio: 9 a 24; extremidade: 25 a 32).....	47
Figura 18 -	Teste de compressão em discos com arranjo cônico e soldagem longitudinal	48
Figura 19 -	Modelagem das curvas de escoamento de aços 50CrV430 e ST14 pelo ensaio de compressão em discos empilhados.....	49
Figura 20 -	Amostra multicamada de aço ST14 antes da deformação e apresentando flambagem após a compressão	49
Figura 21 -	Forma inicial de corpos de prova fabricados em liga de alumínio AA-2011	51

Figura 22 - Modelagem da curva tensão-deformação verdadeira da prata (Ag500) pelo ensaio de compressão em discos empilhados	52
Figura 23 - Comparação de curvas de escoamentos em diferentes geometrias	53
Quadro 6 - Dimensões dos corpos de prova de prata esterlina (925)	54
Quadro 7 - Dimensões dos corpos de prova de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$).....	55
Figura 24 - Etapas da produção dos corpos de prova cilíndricos de prata esterlina (925)	56
Quadro 8 - Arranjo de montagem das amostras de prata esterlina (925)	57
Figura 25 - Qualificação das amostras de prata esterlina (925).....	57
Figura 26 - Disco de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$) orlado e sem orla	58
Quadro 9 - Arranjo de montagem das amostras de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$).....	58
Figura 27 - Rugosímetro utilizado em amostras de prata esterlina (925) e cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$)	60
Figura 28 - Lixadeira e microscópio utilizados na análise metalográfica da prata esterlina (925).....	60
Figura 29 - Análise de dureza em amostras de prata esterlina (925) e Cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$)	62
Quadro 10 - Planejamento experimental para o ensaio de compressão da prata esterlina (925)	62
Figura 30 - Máquina utilizada no ensaio de compressão da prata esterlina (925) - prensa PANAMBRA	64
Figura 31 - Esquema do ferramental utilizado no ensaio de compressão da prata esterlina (925).....	64
Figura 32 - Exemplificação do uso de fita para fixação e centralização dos discos de prata esterlina (925).....	65
Figura 33 - Máquina utilizada no ensaio de compressão do cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$) – prensa MTS	66
Quadro 11 - Planejamento experimental para o ensaio de compressão do cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$)	67
Quadro 12 - Resultado da análise química da liga de prata esterlina (925)	67
Quadro 13 - Resultado da análise química da liga de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$).....	67
Quadro 14 - Medição de rugosidade para cilindro padrão e discos de prata esterlina (925)	68
Quadro 15 - Medição de rugosidade para cilindro padrão e discos de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$)	69

Figura 34 - Fotomicrografias “cilindro”, prata esterlina (925) não atacada, magnificação de 100 vezes.....	70
Figura 35 - Fotomicrografias “cilindro”, prata esterlina (925) atacada com solução de ácido sulfúrico e dicromato de potássio em meio aquoso, magnificação de 100, 200 e 500 vezes	71
Figura 36 - Fotomicrografias “disco recozido”, prata esterlina (925) atacada com solução de ácido sulfúrico e dicromato de potássio em meio aquoso, magnificação de 100, 200 e 500 vezes	71
Figura 37 - Fotomicrografias “disco não recozido”, prata esterlina (925) atacada com solução de ácido sulfúrico e dicromato de potássio em meio aquoso, magnificações de 200 e 500 vezes	72
Quadro 16 - Medição de dureza Vickers para corpos de prova de prata esterlina (925)...	73
Figura 38 - Fotomicrografias disco de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$) atacado com solução de cloreto férrico, ácido nítrico e ácido clorídrico em meio aquoso, magnificações de 200 e 1000 vezes	74
Quadro 17 - Medição de dureza Vickers para corpos de prova de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$)	75
Figura 39 - Corpos de prova C1 e C2 após a compressão	75
Figura 40 - Estratificação dos corpos de prova P1 e P2 após a compressão.....	76
Figura 41 - Pilhas P3 e P4 após a compressão	77
Figura 42 - Corpo de prova de prova B com penetração em disco adjacente.....	77
Figura 43 - Pilha de discos de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$) antes e após a compressão	78
Figura 44 - Curvas de escoamento para a prata esterlina (925), cilindro padrão e discos recozidos.....	79
Figura 45 - Curvas de escoamento para prata esterlina (925), discos não recozidos e recozidos.....	80
Figura 46 - Curvas de escoamento para o cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$)	81
Figura 47 - Detalhe das curvas de escoamento para o cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$)	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ATM</i>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<i>a. C.</i>	Antes de Cristo
<i>CCC</i>	Cúbico de corpo centrado
<i>CFC</i>	Cubico de face centrada
<i>FEM</i>	<i>Finite Element Method</i>
<i>HDE</i>	Hexagonal densamente empacotada
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization</i>
<i>IT</i>	<i>ISO Tolerance</i>
<i>min.</i>	Mínimo
<i>Rad.</i>	Curvatura
<i>un.</i>	Unidades

LISTA DE SÍMBOLOS

h_0	Altura inicial
A_0	Área inicial
$\pm$	Aproximadamente
L	Comprimento
L_0	Comprimento inicial
φ	Deformação
e	Deformação linear convencional ou de engenharia
ε	Deformação verdadeira
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	Deformações principais
D_c	Deslocamento do cabeçote da prensa
D	Diâmetro
d_0	Diâmetro inicial
F	Força, carga
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
$>$	Maior que
MPa	Megapascal
$<$	Menor que
$\leq$	Menor ou igual que
μm	Micrometro
mm	Milímetro
mm/min	Milímetro por minuto
mg/l	Miligrama por litro
min	Minuto
N/mm^2	Newton por milímetro quadrado
“	Polegada
%	Porcentagem
% p/p	Porcentagem em peso
KN	Quilonewton
kg	Quilograma

r	Raio
T	Temperatura
S	Tensão de engenharia
k_f	Tensão de escoamento
σ_{Rup}	Tensão de ruptura, limite de resistência
σ_{eq}	Tensão equivalente
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima
σ	Tensão verdadeira
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Tensões normais ao plano
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensões principais
Wid	Trabalho de deformação específico
φ'	Velocidade de deformação
VDW	Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	18
1	OBJETIVOS.....	20
1.1	Geral.....	20
1.2	Específicos.....	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	O processo de conformação mecânica.....	21
2.2	O forjamento.....	24
2.3	Fundamentos da deformação plástica.....	26
2.4	A curva tensão-deformação ou curva de escoamento.....	29
2.5	Relação do encruamento e da microestrutura com a curva de escoamento.....	32
2.6	A produção de moedas.....	33
2.7	A cunhagem na produção de moedas.....	35
2.8	Ensaio para a determinação da curva de escoamento.....	41
2.8.1	<u>Ensaio de tração</u>	41
2.8.2	<u>Ensaio de compressão tradicional</u>	43
2.8.3	<u>Ensaio de compressão em discos empilhados.....</u>	45
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	53
3.1	Critérios para realização do ensaio de compressão em discos empilhados	53
3.2	Descrição do preparo dos corpos de prova	55
3.3	Caracterização dos corpos de prova.....	59
3.3.1	<u>Determinação da composição química.....</u>	59
3.3.2	<u>Determinação da Rugosidade.....</u>	59
3.3.3	<u>Determinação da Microestrutura e Dureza</u>	60
3.3.4	<u>Modelagem das Curvas de Escoamento.....</u>	62

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4.1	Análise da composição química	67
4.2	Análise da rugosidade	68
4.3	Análise da microestrutura e dureza	69
4.4	Análise da geometria.....	75
4.5	Análise das curvas de escoamento	78
	CONCLUSÃO	82
	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	83
	REFERÊNCIAS	84
	APÊNDICE A – Curvas tensão e deformação de engenharia para os corpos de prova de prata esterlina (925)	88
	APÊNDICE B – Curvas tensão e deformação verdadeira para os corpos de prova de cuproníquel (Cu₇₅Ni₂₅).....	91

INTRODUÇÃO

A produção de moedas remonta a antiguidade e é fundamentalmente baseada na realização de sucessivos processos de conformação mecânica. A cunhagem é o último deles e envolve o forjamento a frio em matriz fechada, onde um disco metálico é prensado entre duas matrizes e um anel de retenção chamado de virola para imprimir imagens bem definidas em todas as faces (o relevo), formando efetivamente a moeda. A característica marcante desse processo, que o diferencia do forjamento tradicional, é que para formar imagens as deformações ocorrem na ordem do micrometro e afetam apenas a topografia da peça (SCHAEFFER, 2020).

O relevo da moeda resulta da aplicação de altas cargas compressivas e de um baixo fluxo do metal para preenchimento das microcavidades da matriz em todas as faces previstas pelo layout ou projeto do produto. As tolerâncias dimensionais são controladas com rigor, sendo necessária uma avaliação criteriosa para escolha adequada dos parâmetros de trabalho dentre os quais a força de compressão (BUFA et al, 2007).

Bocharov (1962) menciona que durante atuação das forças compressivas a pressão pode aumentar sem limites até que a resistência da matriz, ou a capacidade da prensa, sejam excedidas, sendo importante conhecer os índices eficientes de operação para obter a reprodução fiel da matriz na moeda acabada. A quebra de uma ferramenta, além de ocasionar um custo imprevisto da ordem de milhares de dólares, irá demandar várias horas de usinagem para a sua reprodução. Além disso, o desconhecimento da pressão necessária pode resultar em um setup indevido do equipamento para valores acima dos estritamente necessários. O comportamento do fluxo do metal durante a compressão é, em suma, um conhecimento importante ao planejamento do processo produtivo, e nesse sentido o uso da curva de escoamento auxilia com informações fundamentais.

Apesar da cunhagem de moedas ser realizada desde antiguidade são poucos os trabalhos publicados ou informações disponíveis sobre o assunto em virtude de abranger informações sensíveis de controle dos governos (IKE & MIROSLAV, 1998). A literatura indica os ensaios de compressão convencionais para a determinação da curva de escoamento para a indústria em geral em função da sua capacidade de avaliar a resposta do material em deformações verdadeiras maiores do que a unidade. Outra característica desejável dessa técnica é a sua proximidade com os processos de forjamento e laminação, entretanto seu uso fica restrito a geometria do material para confeccionar corpos de prova que são usualmente cilindros sólidos (ALVES et al., 2011; ASTM E9).

Considerando a infraestrutura e o maquinário disponíveis em uma dada casa cunhadora de moedas, a matéria prima pode ser encontrada na forma de bobinas ou discos metálicos comprados prontos e a reprodução de um corpo de prova padrão pode ficar dificultada ou até mesmo impossibilitada. Observando restrições como essa Pawelski (1967) propôs um modo alternativo de realizar o ensaio de compressão pelo uso de discos empilhados que reproduzissem as mesmas relações dimensionais do cilindro sólido. Nos anos que se sucederam alguns poucos autores revisitaram e aprimoraram a técnica, sendo encontradas principalmente publicações aplicadas a chapas de aço e alumínio.

Nesse trabalho será estudada a aplicação do ensaio mecânico de compressão em discos empilhados como meio de obtenção da curva de escoamento para discos de prata esterlina (925), com 92,5% de prata e 7,5% de cobre, e de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$), com 75% de cobre e 25% de níquel. Tais ligas são muito utilizadas na produção de moedas e o interesse no tema resulta do fato de que, em regra, casas cunhadoras já dispõem da matéria prima na forma de discos ou têm facilidade de produzi-los.

Em virtude da escassez de literatura nessa área, bem como da farta disponibilidade do material para a produção de corpos de prova sem preparações significativas, os resultados podem contribuir para expandir o conhecimento sobre o ensaio de compressão em discos empilhados para a determinação da curva de escoamento dessas ligas na preparação de moedas.

1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho é avaliar experimentalmente a aplicação do ensaio de compressão em discos empilhados para obtenção da curva de escoamento das ligas de prata esterlina (925) e de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$).

1.2 Objetivos Específicos

O objetivo geral será alcançado por meio dos seguintes objetivos específicos:

- Realizar o ensaio de compressão utilizando cilindros sólidos e discos empilhados produzidos a partir da liga de prata esterlina (925);
- Realizar o ensaio de compressão utilizando discos empilhados produzidos a partir da liga de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$);
- Comparar as curvas de escoamento experimentais com a literatura.
- Identificar influências ao comportamento das curvas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O processo de conformação mecânica

A conformação mecânica é conhecida desde a antiguidade, quando caçadores e coletores usavam monólitos e pequenas pedras para dar forma a lâminas e ferramentas de uso geral. Depois, seguindo-se a Era dos Metais (por volta de 4.000 a.C.), desde a descoberta do cobre até o uso do ferro, houve o estabelecimento da metalurgia em conjunto com a evolução da engenhosidade humana e isso impulsionou melhorias nas propriedades metalúrgicas (a partir de 2.500 a.C.) e avanços na facilitação dos processos de fabricação (SCHAEFFER, 2020; Meta Fab Incorporated, 2024).

O processo de conformação mecânica evoluiu ao longo do tempo e atualmente permite mudanças controladas de geometria. Ele é aplicável a uma ampla variedade de metais, desde pequenas escalas até peças de mais de 1 tonelada, e a diferentes níveis de complexidade ou precisão, sendo possível trabalhar com grandes volumes de produção. A maioria dos metais é gerada a partir do estado fundido e depois transformado por um grande número de processos de conformação determinados por certos requisitos da indústria moderna como baixo custo de produção, alta produtividade com baixo desperdício, qualidade assegurada, uso de diferentes materiais etc, e nesse sentido verifica-se uma crescente demanda pelo forjamento de precisão (LANGE, 1997).

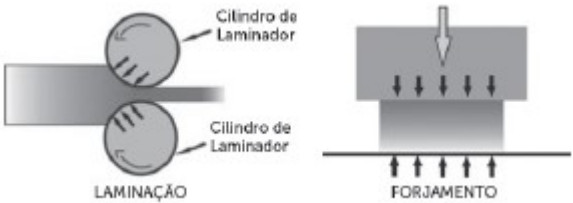
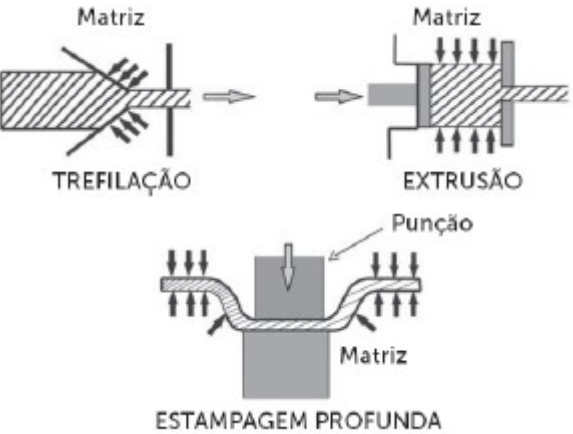
A conformação mecânica é utilizada para dar origem a formas mais complexas do que as que a originaram e objetiva produzir características funcionais e/ou estéticas. Seus produtos podem ser obtidos por deformação plástica, onde o volume e a massa se mantém constantes, ou por usinagem, pela extração seletiva do metal. No campo da deformação plástica, aplica-se tensões ao material maiores que a de escoamento e menores do que a do ponto de ruptura para gerar mudanças estruturais e a conformação desejada (DIETER, 1981).

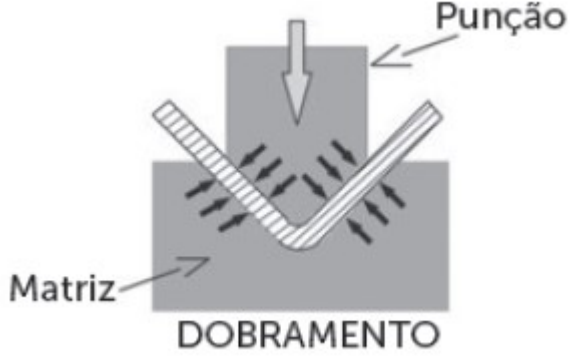
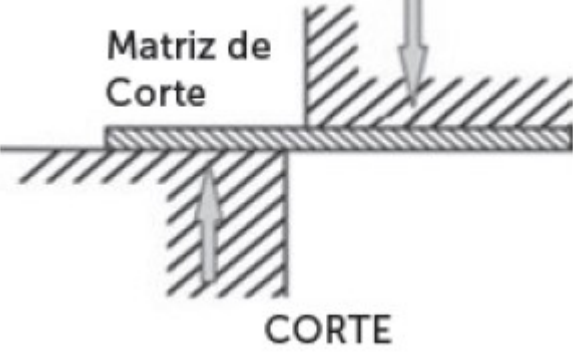
O controle das propriedades dos materiais tem relevância equivalente à da mudança de forma. Segundo Dieter (1981, p.452) “bolhas e porosidades presentes em lingotes fundidos podem ser eliminadas através do forjamento ou laminação a quente, o que proporciona uma melhoria na ductilidade e na tenacidade a fratura” e exemplifica a variação de propriedades que pode ocorrer durante o encruamento do metal, sendo necessário o seu controle.

A conformação mecânica conta com uma grande diversidade de processos que são utilizados individual ou simultaneamente de acordo com a situação específica. Para Bresciani Filho (1995) eles podem ser agrupados e classificados segundo:

- O tipo de esforço predominante (Quadro 1);
- À temperatura de trabalho;
- À forma do material ou do produto final;
- Ao tamanho da região de deformação (localizada ou geral);
- Ao tipo de fluxo do material (estacionário ou intermitente);
- Ao tipo de produto obtido (semi-acabado ou acabado).

: Classificação dos processos de conformação mecânica por tipo de esforço.

Tipo de esforço	Exemplos	Esquema
Compressão direta	Laminação e forjamento	 LAMINAÇÃO FORJAMENTO
Compressão indireta	Trefilação de fios e tubos, extrusão e estampagem profunda	 TREFILAÇÃO EXTRUSÃO ESTAMPAGEM PROFUNDA
Tração	Tracionamento de chapas	 matriz TRACIONAMENTO

Tipo de esforço	Exemplos	Esquema
Dobramento	Dobramento de chapas	 Punção Matriz DOBRAMENTO
Cisalhamento	Corte de chapas	 Matriz de Corte CORTE

Fonte: Bolanho (2017).

Os processos de conformação também podem se diferenciar em trabalhos a frio ou a quente a depender da relação entre a temperatura em que ocorrerá o esforço e a de recristalização do material. No trabalho a frio a deformação plástica é realizada em uma temperatura abaixo daquela de recristalização do material, resultando no encruamento, com ganho de resistência mecânica e redução de ductilidade. “O trabalho a frio é uma ferramenta para aumentar a resistência mecânica de certos metais não ferrosos, quando é impossível fazê-lo por tratamento térmico” (BRESCIANI FILHO, 1995, p.10). No trabalho a quente o esforço é realizado em uma faixa de temperatura e tempo acima da recristalização, que viabiliza a redução de energia interna acumulada pela deformação e retorno da estrutura cristalina a uma condição mais estável.

2.2 O Forjamento

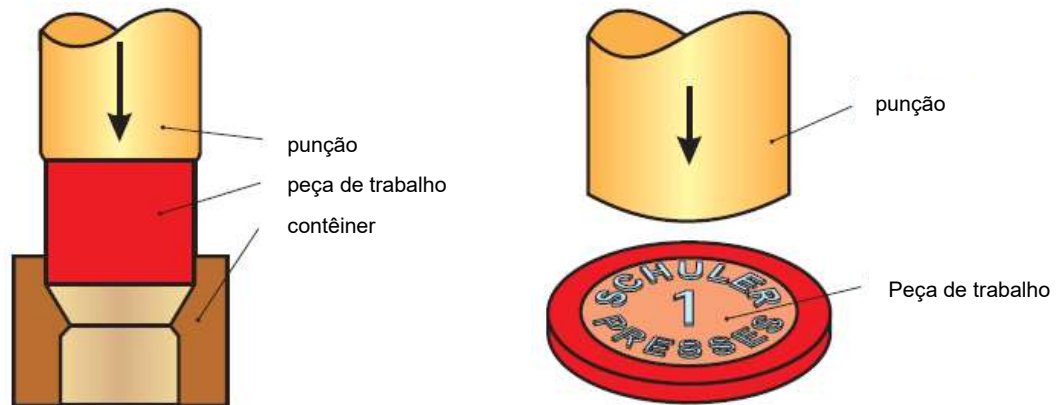
O forjamento é um processo de conformação por esforço de compressão direta. Segundo Dieter (1981) ele se utiliza do fenômeno de deformação plástica para moldar em grande escala de produção uma forma determinada em outra, pela ação de um martelo ou prensa. Assim, se alcança significativas mudanças na espessura da peça em comparação com aquelas que ocorrem em chapas metálicas.

O forjamento apresenta classificações em função do ferramental utilizado e das especificações do produto (SCHAEFFER, 2020) e a Figura 1 exemplifica algumas dessas classes:

- Forjamento em matriz fechada, que ocorre quando o material é conformado entre duas matrizes gravadas em baixo relevo com as impressões que se deseja reproduzir na peça, sob a ação de alta pressão em uma cavidade fechada;
- Forjamento em matriz aberta, que ocorre pela compressão de duas matrizes planas e geralmente é usada em peças grandes e com formas relativamente simples;
- Extrusão, onde um material é forçado a passar por uma abertura de seção transversal menor.
- Cunhagem, que é realizada normalmente a frio e empregando uma matriz fechada ou aberta, com o diferencial de possibilitar a impressão de imagens bem definidas e a área de seção pequena.

Figura 1: Processos de forjamento em matriz fechada e aberta.





Fonte: Adaptado de Schuler (1998).

“No forjamento em matriz fechada o metal deve adotar a forma esculpida previamente nas duas matrizes, havendo fortes restrições ao livre espalhamento do material” (CETLIN & HELMAN, 2018, p.154). Em virtude dessa característica é possível obter peças de precisão com baixas tolerâncias dimensionais (DIETER, 1981). E observando o alto custo do ferramental, esse tipo de processo é geralmente utilizado para grandes volumes de produção. Usualmente a forma final da peça é alcançada pelo uso de mais de uma matriz e etapa de trabalho.

A precisão dimensional e outras características da peça a ser forjada variam em função da temperatura de trabalho conforme pode ser visto no Quadro 2. Em deformações a quente a precisão dimensional e a qualidade da superfície diminuem em virtude da imprevisibilidade da expansão térmica e do desgaste da matriz, enquanto que no forjamento a frio é possível obter peças com maior precisão e melhor acabamento. Entretanto, nesse caso é preciso lidar tanto com o encruamento, e aumentos de resistência e dureza, como, também, com a redução da ductilidade e da forjabilidade.

Quadro 2: Comparação entre processo de formação a quente, a morno e a frio.

Formação	Quente	Morno	Frio
Peça de trabalho	0,05 – 1.500 kg	0,001 – 50 kg	0,001 – 30 kg
Precisão (grau de tolerância ISO)	IT 14 – 16	IT 11 – 14	IT 8 – 11
Qualidade Superficial Rz	> 50 – 100 μm	> 30 μm	> 10 μm
Tensão de escoamento função (T, material)	$\pm 20 - 30 \%$	$\pm 30 - 50 \%$	100%

Formação	Quente	Morno	Frio
Formabilidade função (T, material)	$\varphi \leq 6$	$\varphi \leq 4$	$\varphi \leq 1.6$
Custos de formação Estudo de VDW 1991	Até 113%	100%	Até 147%
Usinagem necessária	Alta	Baixa	Muito baixa

Fonte: Schuler (1998).

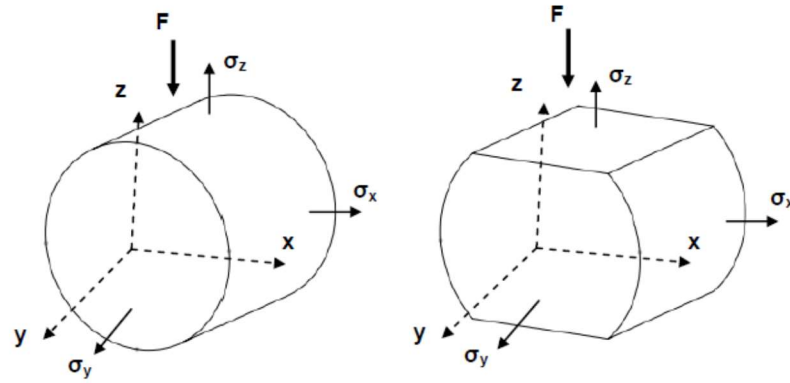
O forjamento deve ser tratado como um sistema que necessita da definição de uma variedade de parâmetros dentre os quais as características da matéria prima e da ferramenta, as condições de interface entre ambas, o equipamento a ser utilizado, os requisitos do produto final e o regime de deformação plástica que será aplicado (SHIRGAOKAR, 2005).

2.3 Fundamentos da deformação plástica

A tensão é dada pela relação entre uma força e a área onde ela atua. Uma vez que um dado elemento de volume esteja submetido ao carregamento externo (F), um conjunto de forças internas e opostas σ_x , σ_y e σ_z se originam (SCHAEFFER, 2020). A Figura 2 demonstra essa situação.

A combinação das forças de oposição atuantes é dada pela tensão equivalente (σ_{eq}) e as teorias de von Mises (Eq. 1) e de Tresca (Eq. 2) determinam a relação dessas forças com o escoamento. Uma vez que a tensão oriunda do carregamento externo atinja a tensão equivalente do material, ocorrerá o escoamento e a deformação plástica do material (Eq. 3). Esse ponto é dado pela tensão de escoamento (k_f). (SCHAEFFER, 2020).

Figura 2: Tensões em um elemento de volume.



Fonte: Schaeffer (2006).

Admite-se σ_1, σ_2 e σ_3 como tensões principais atuantes em planos ortogonais e, por convenção de sinais, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (CETLIN & HELMAN, 2018). Enquanto na teoria de von Mises o escoamento é dependente apenas das tensões principais, para Tresca é preciso conhecer as tensões máxima e mínima e por isso é, muitas vezes, preterido.

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad \text{Eq. 1}$$

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad \text{Eq. 2}$$

$$\sigma_{eq} = kf \quad \text{Eq. 3}$$

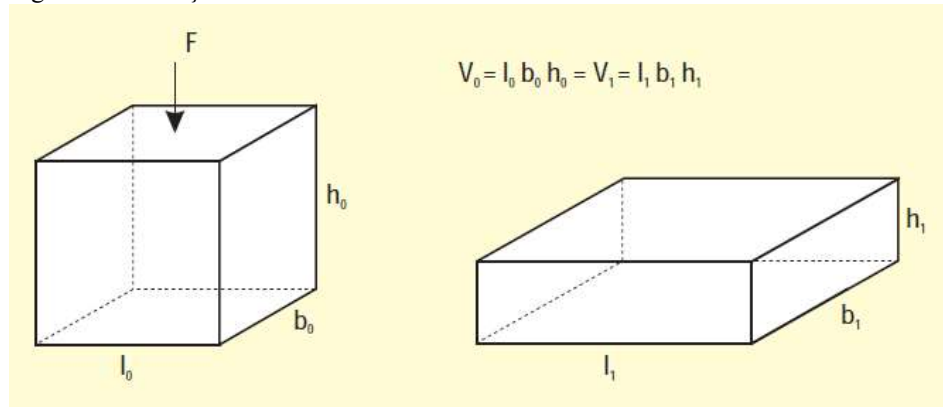
Assim, quando se exerce uma carga sobre uma peça metálica além de um certo limite e essa, mesmo após a retirada desse carregamento, não recupera as suas dimensões iniciais, está caracterizada a transição entre do regime elástico para o plástico (DIETER, 1981). O valor da tensão de escoamento é influenciado por fatores específicos do material como a deformação (ϕ), a velocidade de deformação (ϕ'), a temperatura (T), a composição química ou a microestrutura (Eq. 4) e é obtida por ensaios mecânicos como o de tração ou o de compressão (SCHAEFFER, 2020).

$$kf = (\phi, \phi', T, \text{material}) \quad \text{Eq. 4}$$

A deformação (φ), para fins da determinação do escoamento plástico, deve ser considerada como atual (ou verdadeira) e não como relativa (ou de engenharia) para evitar imprecisões no cálculo.

Em conformidade com a Lei da Constância do Volume, ilustrada na Figura 3, é aceito que o volume do corpo permanece inalterado durante a deformação. Dieter (1981) menciona que o metal é incompressível e que mesmo após ser submetido a grandes deformações, tem desvios de densidade inferiores a 0,1%. Considerando a mudança de dimensões em um elemento de volume para um corpo qualquer a deformação φ_1 em um eixo é acompanhada pelas outras dimensões φ_2 e φ_3 de modo que, observadas as convenções de sinais, o seu somatório seja zero (Eq. 5) (SCHULER, 1998; SCHAEFFER, 2020).

Figura 3: Mudança de dimensões em um elemento de volume.



Fonte: Schuler (1998).

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$$

Eq. 5

Outro parâmetro do forjamento, a velocidade de deformação (φ') é obtida pela razão entre a velocidade da ferramenta e a altura instantânea do corpo e é dependente de fatores como a direção de deformação, a própria deformação e a velocidade da ferramenta. A velocidade de deformação, que é influenciada pela velocidade da ferramenta e o tipo de maquinário, se relaciona de modo direto com tensão de escoamento. Assim, o aumento na velocidade de deformação ocasiona um aumento da tensão de escoamento do material (SCHAEFFER, 2020).

2.4 A curva tensão-deformação ou curva de escoamento

Segundo Dieter (1981) a curva tensão-deformação verdadeira é também conhecida como curva de escoamento. Ela fornece a tensão necessária para ocorrer o escoamento plástico de um metal em qualquer nível de deformação, em carregamento uniaxial. E essa curva deve ser modelada sempre em termos de tensão verdadeira (σ) e deformação verdadeira (ε), uma vez que as variáveis de engenharia consideram as dimensões originais do corpo de prova e desconsideram as mudanças que ocorrem ao longo da deformação. Apesar da possibilidade de se relacionar a tensão com a razão entre força aplicada e a área da seção transversal ou, da mesma forma, a deformação como uma relação na mudança do comprimento da amostra, o fato de esses parâmetros referenciais se alterarem ao longo do ensaio pode gerar imprecisões em cálculos que envolvam grandes deformações plásticas.

Xu (2013) concorda com Dieter e observa que a curva de escoamento apresenta limitações na descrição do comportamento mecânico do material, pois se refere às dimensões iniciais do corpo de prova sendo que essas variam continuamente ao longo do ensaio a medida que a deformação ocorre.

No campo da conformação mecânica, caracterizado por deformações massivas nas peças, a solução para obtenção de dados mais realistas do material estaria em se converter a tensão e a deformação de engenharia na tensão e deformação verdadeiras, adotando a área da seção transversal instantânea. É importante observar que a tensão e a deformação verdadeiras são basicamente iguais a tensão e a deformação de engenharia em pequenas deformações (FARIDMEHR et al., 2014).

Assumindo que as deformações sejam pequenas, e pela Lei da Constância do Volume, a tensão verdadeira (σ) e a deformação verdadeira (ε) se correlacionam com a tensão de engenharia (s) e a deformação de engenharia (e) pelas equações Eq. 6 e Eq. 7, considerando a deformação linear média como a variação da razão do comprimento com o comprimento inicial. (DIETER, 1981).

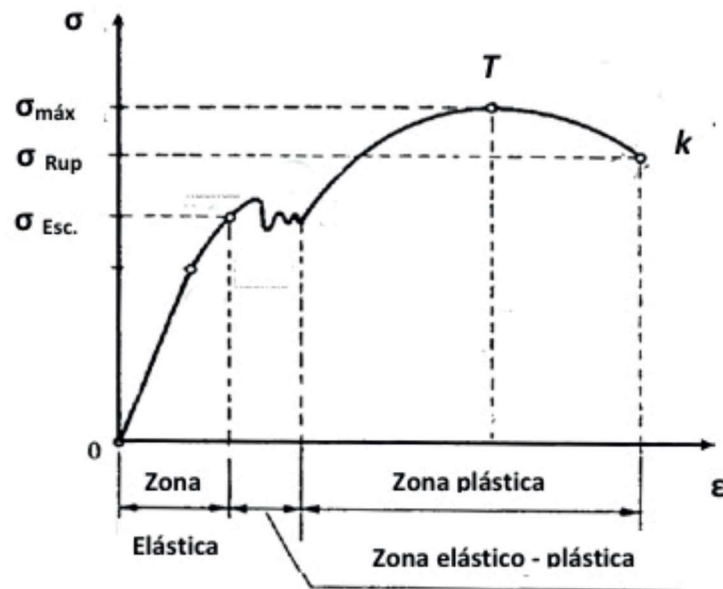
$$\varepsilon = \ln(e + 1) \quad \text{Eq. 6}$$

$$\sigma = s(e + 1) \quad \text{Eq. 7}$$

Segundo Schaeffer (2020) é fundamental conhecer a tensão de escoamento de um material a ser forjado para quantificar força, trabalho, preenchimento e desgaste da ferramenta

etc. A tensão de escoamento é encontrada na curva tensão deformação como uma representação gráfica. Ela é modelada com dados de força e deslocamento obtidos por meio de ensaios de tração, torção ou compressão e fornece características do material como a própria tensão de escoamento, mas também, o limite de resistência ou de tensão máxima antes que ocorra a falha, entre outras informações, conforme Figura 4. Para os processos de conformação mecânica, que se utilizam do fenômeno da deformação plástica, a região de maior relevância está entre o limite da tensão de escoamento (σ_{esc}), onde efetivamente se inicia a deformação plástica do material, e o limite de resistência (σ_{Rup}).

Figura 4: Curva tensão deformação esquemática.



Fonte: Bolanho (2017).

Para Alves et al. (2011) a curva de escoamento é um dos parâmetros fundamentais para o processo de forjamento, pois nela está representada a reação de um material e como será a sua resposta elástica e plástica durante a aplicação do esforço, auxiliando na definição do tipo e da carga de máquina que será utilizada.

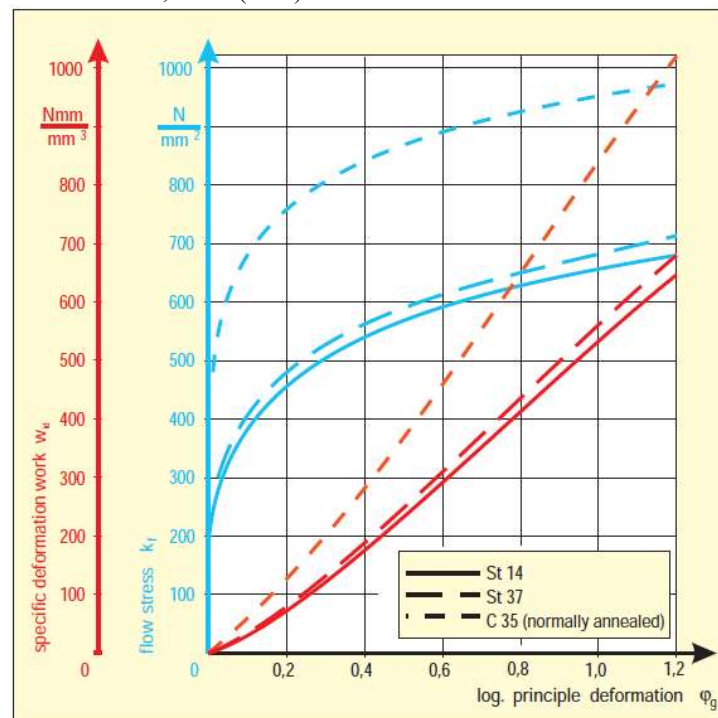
O conhecimento da tensão de escoamento é fundamental para quantificar a força de compressão, o trabalho e o preenchimento da matriz, dentre outros parâmetros. O seu estudo afirma que no forjamento é usual a utilização do ensaio de compressão para obtenção desse parâmetro. O teste pode ser realizado “a quente ou a frio, com velocidades de deformação constantes ou variáveis, dependendo das características de aplicação do material ensaiado” (KNOLL, 2007, p.74).

Alves et al. (2011) concorda com Knoll ao afirmar que o dado mais importante para a modelagem do desempenho de um material é a sua curva de escoamento, pois caracteriza a relação entre a deformação e o encruamento e determina a força e o trabalho de um processo.

“O trabalho de conformação específico pode ser obtido por meio de integração gráfica ou numérica, utilizando-se de curvas de escoamento disponíveis exatamente da mesma maneira como na tensão de escoamento”. E se não houver curva de escoamento disponível, a mesma pode ser determinada por meio dos testes de tração e compressão (SCHULER, 1998, p.29).

A Figura 5 apresenta as curvas de escoamento e trabalho específico para aços ao carbono St 14, St 37 (DIN) e C35. O St37 é um aço estrutural ao carbono com classes equivalentes (como AISI 1006). Ele é usado principalmente na construção por apresentar boa ductilidade e conformabilidade (REDSTONE MANUFACTURING, 2024). O St14 (DIN 1623) é amplamente aplicado às indústrias de conformação de chapas metálicas por também proporcionar boa conformabilidade (ABOUTALEBI et al., 2010). Por fim, o C35 é um aço de médio carbono fornecido como forjado ou na condição normalizada, oferecendo excelente forjabilidade (FH, 2024).

Figura 5: Curvas de escoamento e trabalho específico para aços ao carbono St 14, St 37 (DIN) e C35 normalizado.



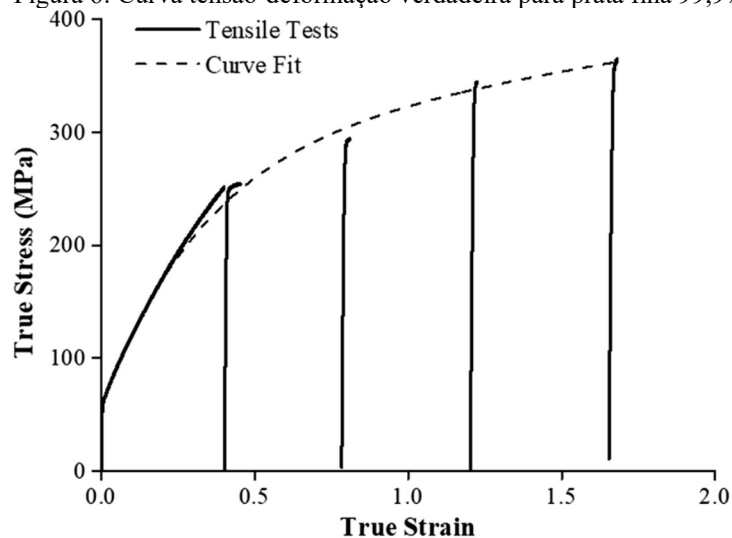
Fonte: Schuler (1998).

2.5 Relação do encruamento e da microestrutura com a curva de escoamento

O estudo de Guo (2009) explica que as características constitutivas do material influenciam a curva de escoamento e cita que dentre elas as mais importantes são a composição, o tratamento térmico histórico e a capacidade do material de se deformar antes que ocorra uma falha. E, para uma determinada microestrutura, a tensão de escoamento se correlaciona com essas características e é expressa em função da força aplicada, da velocidade de deformação e da temperatura.

A deformação plástica é capaz de gerar o encruamento do material desde o seu estado totalmente recozido e, na ausência de anisotropia, a resistência ao escoamento é resultante somente da deformação plástica equivalente e independentemente do caminho de deformação. O estudo de CHO et al (2021) investigou a relação entre o limite de escoamento e a dureza da prata pura (99,9%) para amostras em vários estágios de laminação e confirmou por meio da alteração da curva tensão–deformação um nível significativo de endurecimento que independe do caminho, alcançando a deformação de 1.7, conforme pode ser visto na Figura 6.

Figura 6: Curva tensão-deformação verdadeira para prata fina 99,9%.



Fonte: CHO et al (2021).

Dieter (1981) também discorre sobre o uso do endurecimento por trabalho a frio quando certas ligas ou metais não se sensibilizam pelo tratamento térmico. O autor menciona que a taxa de encruamento pode ser verificada pela inclinação da curva e que metais de estrutura cúbica de face centrada (CFC) apresentam um valor menor do que os de estrutura hexagonal compacta

(HC). Afirma, ainda, que adições de elementos em solução sólida em geral aumentam o encruamento em relação ao metal puro e explica que o trabalho a frio produz elongações dos grãos na direção da deformação principal. O Quadro 3 apresenta a estrutura cristalina de alguns metais.

Quadro 3: Estrutura cristalina dos metais mais importantes.

Cúbica de face centrada (CFC)	Cúbica de corpo centrado (CCC)	Hexagonal densamente empacotada (HDE)
Ferro (<i>de 910 °C a 1.390 °C</i>)	Ferro (<i>T < 910 °C</i>)	Titânio
Níquel	Berílio (<i>T > 1.250 °C</i>)	Berílio (<i>T < 1.250 °C</i>)
Cobre	Cobalto (<i>T > 450 °C</i>)	Cobalto (<i>T < 450 °C</i>)
Alumínio	Tungstênio	Cério (<i>-150 °C < T < -10 °C</i>)
Ouro	Molibdênio	Zinco
Chumbo	Cromo	Magnésio
Platina	Vanádio	Zircônio
Prata	Nióbio	Háfio (<i>T > 1.950 °C</i>)

Fonte: Adaptado de Meyers e Chawala (1982).

2.6 A produção de moedas

A moderna produção de moedas não se restringe mais a servir como meio de pagamento. Casas cunhadoras como a *United State Mint* fabricam não somente moedas de circulação, mas também moedas confeccionadas em metais preciosos ou raros com o objetivo de atender aos mercados de investimento e colecionismo.

Moedas de circulação são produzidas em larga escala e precisam resistir ao tempo e às adversidades que colocam a prova sua durabilidade. Elas apresentam níveis de nitidez, detalhe e acabamento mais baixos do que àquelas voltadas ao colecionismo. As moedas colecionáveis ou para investimento, por outro lado, são produzidas em pequenos lotes e com níveis de exigência mais elevados (Xu J. et al, 2021).

A globalização abriu a possibilidade de comercialização desses produtos em todo o mundo e gerou o interesse em pesquisa e desenvolvimento para se alcançar formas cada vez mais complexas e se utilizar novos materiais alternativos (PRAGANA, 2020). A Figura 7 apresenta alguns desses produtos acabados.

Figura 7: Exemplificação de moedas de circulação, de investimento e comemorativa.



Fonte: *United State Mint* (2024).

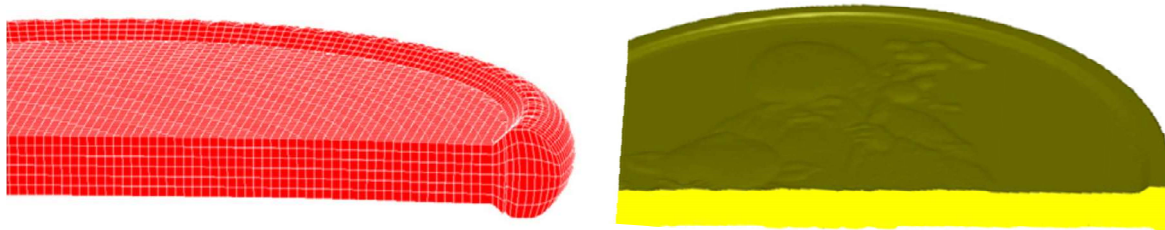
Independentemente do tipo de moeda a produção conta com um disco metálico plano e uma série de etapas e processos de conformação mecânica sequenciais que irão dar forma e acabamento específicos ao produto. Uma das primeiras etapas é a obtenção do disco, também chamado de *blank*. No caso da *United State Mint*, por exemplo, os discos das moedas de circulação como o *Niquel* e o *Quarter Dollar* são extraídos de longas bobinas do metal, enquanto que de moedas de circulação como o *Penny* ou moedas comemorativas e ativo financeiro são de fabricação própria (*United State Mint*, 2024).

Em uma etapa seguinte ocorre a criação de orlas, que são elevações da espessura que se prolongam em toda o perímetro do disco. Os discos inicialmente lisos e planos ganham contornos elevados pela passagem forçada das peças em uma ranhura ligeiramente mais estreita que seu diâmetro, empurrando o metal para cima para formar uma orla, que auxilia na cunhagem (*United State Mint*, 2024).

A orlagem é uma operação de rebordo onde o disco pré-formado é dobrado ao longo de seu diâmetro para gerar um perfil adequado. São necessárias tolerâncias dimensionais estreitas, pois a redução do diâmetro final não deve exceder, aproximadamente, 1%.

Essa operação determina o sucesso geral do processo de cunhagem (LEITÃO, 1997) e a Figura 8 apresenta, inicialmente, o esquema de um disco orlado em visão seccionada e, depois, a peça cunhada, com a transformação da orla curvada para plana.

Figura 8: Esquema de um disco orlado seccionado.



Fonte: Adaptado de Xu *et al* (2012 & 2021).

A cunhagem é a última etapa da produção do ponto de vista da conformação mecânica. Os discos orlados são enviados para prensas e dispostos entre matrizes para serem submetidos a compressão em ambos os lados ao mesmo tempo, forçando o metal fluir para formar o desenho, e um anel chamado de virola (ou colar) é posicionado ao redor para evitar que ele se expanda demais, formando o design do bordo (*United State Mint*, 2024).

Algumas prensas de moedas como as americanas usam de 35 a 100 toneladas métricas de pressão para golpear as moedas, enquanto outras atingem até 540 toneladas de força a depender do acabamento requerido. As moedas circulantes, não circuladas e de ouro são cunhadas uma vez, enquanto que moedas de prova são cunhadas pelo menos duas vezes (*United State Mint*, 2024).

Devido ao nível de deformação acumulada durante todas as etapas de conformação mecânica há a necessidade de recozimento dos discos para amolecer o material e recuperar a ductilidade inicial da peça bruta antes da fase final de cunhagem (LEITÃO, 1997).

2.7 A cunhagem na produção de moedas

A cunhagem é utilizada desde a antiguidade para a produção de moedas e remonta à época em que as matrizes precisavam ser manufaturadas por artesãos conhecidos como gravadores. Após a primeira revolução industrial e o desenvolvimento das prensas a vapor são, então, estabelecidas as casas cunhadoras impulsionando a produção em massa (PRAGANA, 2020).

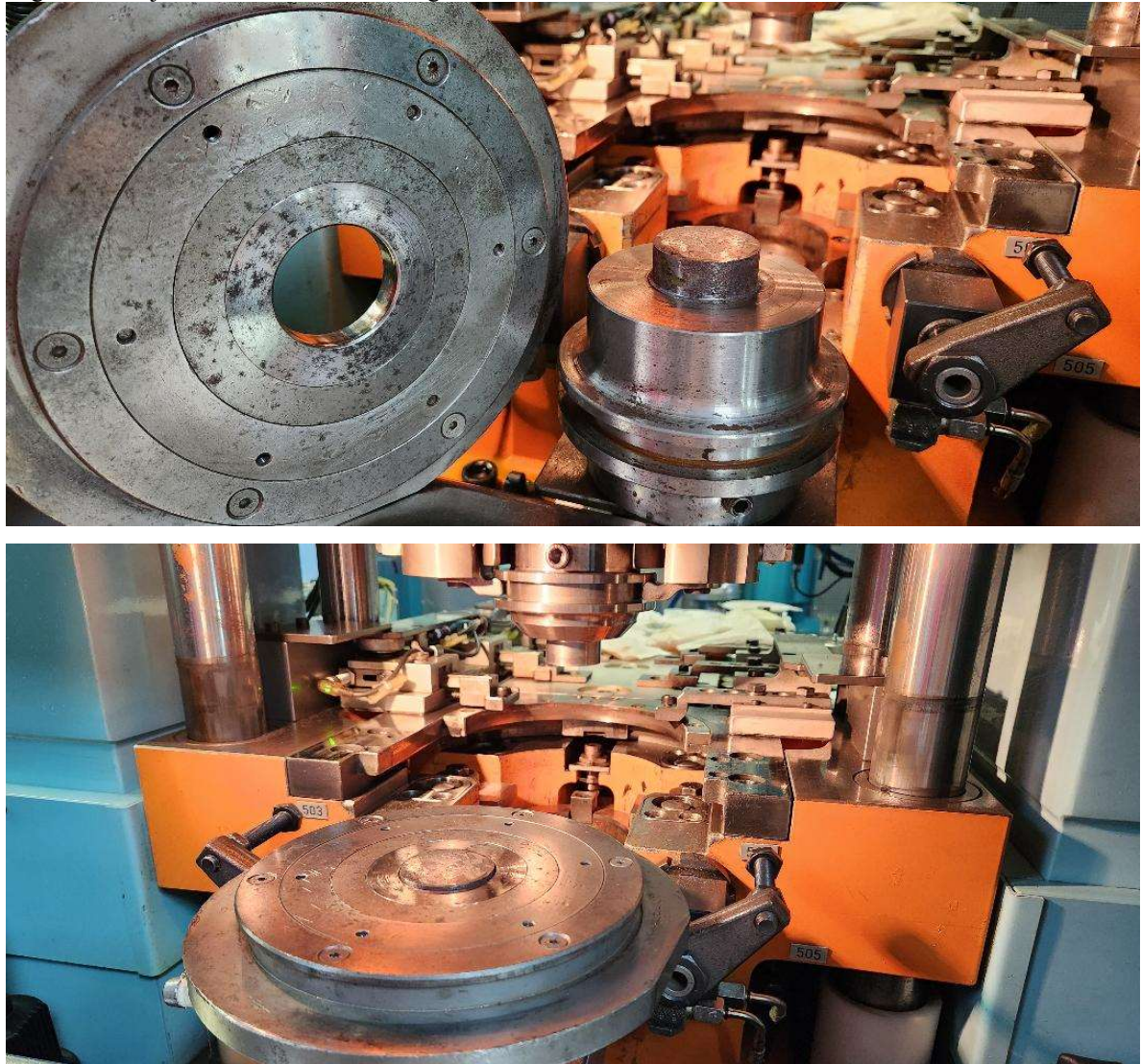
Ike & Plancak (1998); Bufa et al (2007) afirmam que a despeito do seu longo tempo de utilização, por ser a cunhagem de moedas uma atividade desenvolvida pelos governos para a distribuição do meio circulante, o *know-how* tem consequentemente sido mantido em segredo

e são encontradas poucas informações e estudos relacionados. Os autores descrevem a cunhagem de moedas como um processo de deformação plástica de materiais metálicos que envolve o forjamento a frio em matriz fechada, onde um disco da matéria prima é prensado entre duas matrizes e um anel de retenção chamado de virola. A característica marcante desse processo que o diferencia do forjamento em matriz fechada tradicional é que as deformações ocorrem na ordem do micrometro e afetam apenas a topografia da peça. Ike & Plancak (1998) mencionam, ainda, que nesse processo a aplicação de altas cargas compressivas é conjugada com um baixo fluxo do metal para preenchimento das microcavidades dos cunhos e a subsequente formação de relevos em todas as faces previstas pelo layout da moeda.

As tolerâncias dimensionais devem ser controladas com rigor, sendo necessária uma avaliação criteriosa para a escolha adequada dos parâmetros de trabalho tais como velocidade e curso da matriz, lubrificação e pressão pois os mesmos afetam fortemente a qualidade das peças obtidas (BUFA et al, 2007).

Leitão (1997) também define a cunhagem de moedas como uma operação de forjamento em matriz fechada onde uma peça bruta é comprimida entre as matrizes enquanto é retida e posicionada por um colar. IKE & PLANCAK (1998) acrescentam que o que o diferencia do forjamento em matriz fechada tradicional é a pequena relação entre a alteração de geometria da superfície e o diâmetro da peça, bem como entre a altura de protrusão ou profundidade da cavidade (o relevo) e a espessura. Apenas a topografia da peça é alterada sem que haja um grande fluxo de metal e a deformação plástica é limitada à camada superficial, pois ocorre na ordem do micrometro para formar uma textura com múltiplos micro relevos. Os autores mencionam que a cunhagem em si é um processo simples de correspondência entre matriz e peça, entretanto, em função da necessidade de precisão em escala reduzida alguns fatores dificultam a sua conclusão e, dentre eles, o preenchimento insuficiente da matriz com o metal. Para Leitão (1997), por outro lado, “a cunhagem é uma operação tridimensional muito complexa devido à geometria, distribuição e variedade de detalhes a serem impressos no disco pela matriz”. Um exemplo de ferramental de cunhagem de moedas pode ser visto na Figura 9.

Figura 9: Conjunto ferramental de cunhagem.



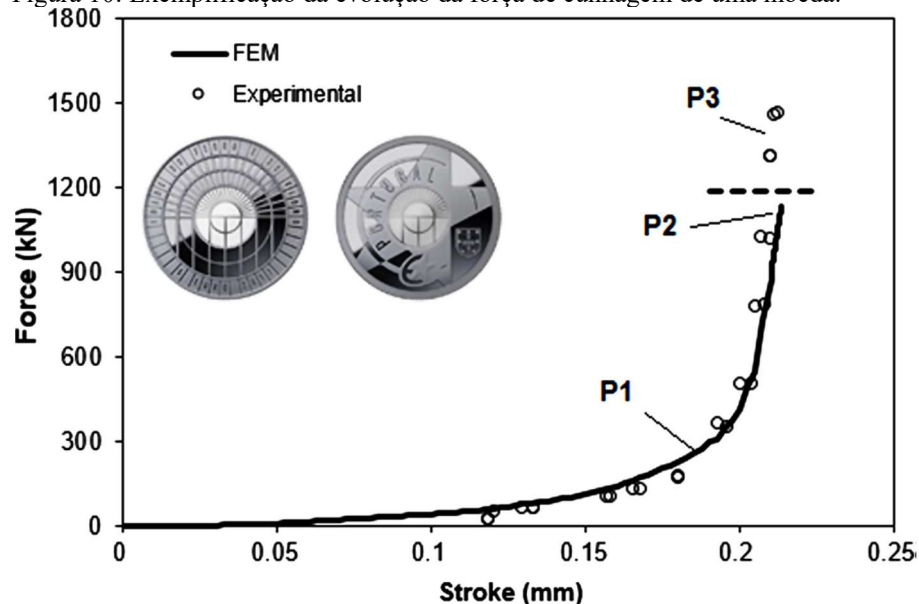
Fonte: Próprio autor (2024).

Para Alexandrino (2017) na cunhagem a força inicial é relativamente baixa até que todas as superfícies do disco sejam comprimidas e o material fique preso, iniciando seu escoamento para preenchimento das cavidades. Essa força vai aumentando acentuadamente para o preenchimento completo de detalhes mais intrincados da matriz e atinge, logo em seguida, uma força final que visa garantir cantos vivos, características bem definidas e um acabamento superficial brilhante.

Bocharov et al (1962) observa que na cunhagem de moedas a pressão aumenta sem limites até que a resistência da matriz, ou a capacidade da prensa, seja excedida, pois durante a compressão o metal é forçado a fluir para preencher as múltiplas microcavidades da ferramenta até que atinja o grau máximo e fique confinado, cessando toda a deformação plástica. O trabalho de Alexandrino (2018) mostra esse tipo de reação, podendo ser inicialmente baixa até a fase de

confinamento do metal para depois se seguir um rápido aumento até “P1” em virtude do preenchimento de cavidades e detalhes mais intrincados do desenho. Continuando a compressão, verifica-se um súbito aumento da força para “P2” e nesse ponto espera-se que características do relevo da moeda como cantos vivos, imagens bem definidas e até um acabamento superficial brilhante sejam alcançados. A última posição “P3” é resultante do curso da matriz além do necessário, dando origem à deformação plástica localizada do ferramental e à produção de moedas com diâmetros finais um pouco maiores que o originalmente. Todas essas etapas podem ser vistas na Figura 10.

Figura 10: Exemplificação da evolução da força de cunhagem de uma moeda.



Fonte: Alexandrino (2018).

É importante conhecer a pressão no exato momento em que todas as cavidades foram preenchidas, pois essa é a pressão mínima que deve ser aplicada para se obter uma reprodução perfeita da matriz no disco gerando a moeda. Para Xu (2021) as numerosas cavidades na superfície da moeda fazem com que o metal sofra de grande e complexa deformação elástico-plástica, podendo ocorrer de parte deles ser espremido para fora do espaço entre os moldes sob ação mecânica.

Dieter (1981) menciona que apesar da importância de se utilizar apenas a quantidade suficiente de metal para o preenchimento das cavidades de uma matriz, é comum se utilizar um pouco mais. Assim, o excedente escora para fora na forma de rebarba e depois é removida. Entretanto, deve-se ter cuidado pois o excesso pode ocasionar aumento na carga de compressão e até a quebra da matriz. Nesse ponto, Schaeffer (2020) faz considerações sobre a

deformabilidade, que é a capacidade de um material ser deformado sem a aparição de defeitos. O autor menciona que esses defeitos podem ocorrer caso haja uma distribuição desigual de forças durante a deformação e no forjamento a frio eles são classificados em 4 grupos:

- Fraturas dúcteis, superficiais ou internas;
- Imperfeições superficiais (galling);
- Defeitos relacionados ao fluxo do material, como dobras, preenchimento ineficiente, produto não concêntrico e flambagem;
- Alterações indesejáveis nas propriedades mecânicas.

A deformabilidade é vista como uma função do material e de parâmetros do processo, conforme pode ser visto no Quadro 4.

Quadro 4: Parâmetros que influenciam a deformabilidade.

Material	Processo
Curva de escoamento; Composição Química; Microestrutura; Histórico de deformação; e Inclusões.	Temperatura; Velocidade de deformação; Geometria das ferramentas; Condições de lubrificação; Estado de tensão.

Fonte: Schaeffer (2020).

Em termos dos principais fatores metalúrgicos, o Quadro 5 mostra que um maior teor de liga em geral reduz a ductilidade, enquanto que qualquer heterogeneidade na microestrutura tem efeito adverso na deformabilidade (Schaeffer, 2020).

Quadro 5: Principais fatores metalúrgicos na forjabilidade a frio.

Parâmetros metalúrgicos		Curva de escoamento	
		Tensão de escoamento	Coefficiente de encruamento
Composição química	C	Aumenta muito	Aumenta
	Si	Aumenta muito	Aumenta muito
	Mn, P, Ni, Mo	Aumenta	Aumenta
	V, Nb, Ti	Aumenta	Efeito não conhecido
	S	Diminui	Diminui
	Cr	Diminui	Aumenta
	Al, B, Ca	Não altera	Não altera
	N	Aumenta muito	Aumenta muito

Parâmetros metalúrgicos		Curva de escoamento	
		Tensão de escoamento	Coefficiente de encruamento
Microestrutura	Redução do tamanho do grão	Aumenta	Aumenta
	Carbonetos lamelares	Aumenta	Aumenta
	Segregação	Não altera	Não altera

Fonte: Schaeffer (2020).

O trabalho de Altan et al. (1983) aborda a dependência da tensão de escoamento de um material a fatores como a dureza e espessura do disco, o escoamento do material durante a compressão; o mecanismo de deformação; requisitos do produto; entre outros. Segundo os autores, discos largos e matrizes com maior convexidade demandam maior força de cunhagem, assim como materiais com dureza comparativamente mais elevada que, portanto, são mais difíceis de deformar plasticamente.

Kiran & Shaw (1983), autores de grande representatividade para o desenvolvimento dos primeiros fundamentos do processo de cunhagem de moedas, o descrevem como sendo realizado em três fases. Inicialmente ocorre a penetração de endentações (ou padrões de relevo) pouco espaçadas da matriz no disco. À medida que a pressão aumenta a área real de contato entre ambos também aumenta. A carga dividida pela área aparente equivale à tensão bruta de escoamento, e ocorre a expansão do disco. Continuando a compressão, durante a interação grosseira entre a matriz e o disco, não se verifica aumento da área real. Isso continua até o desaparecimento dos espaços, quando a pressão nas laterais da retenção (ou colar) se desenvolve. O conjunto comporta-se como um corpo rígido. Nesse momento a interação entre as matrizes e o disco é intensiva e somente o material na superfície da peça flui, numa atuação rígido-plástico, se constituindo na última fase. Segundo os autores, o padrão a ser transferido das matrizes para a peça é formado por uma série de elementos que interagem, como mostrado na Figura 11, representando maior complexidade ao escoamento. Dadas as dimensões da ordem do micrometro em que ocorrem as deformações, o efeito das variáveis metalúrgicas como a formação da microestrutura e imperfeições presentes na rede cristalina são de suma importância na deformação. (DIETER, 1981).

Figura 11: Elementos de relevo em matrizes de cunhagem de moedas.



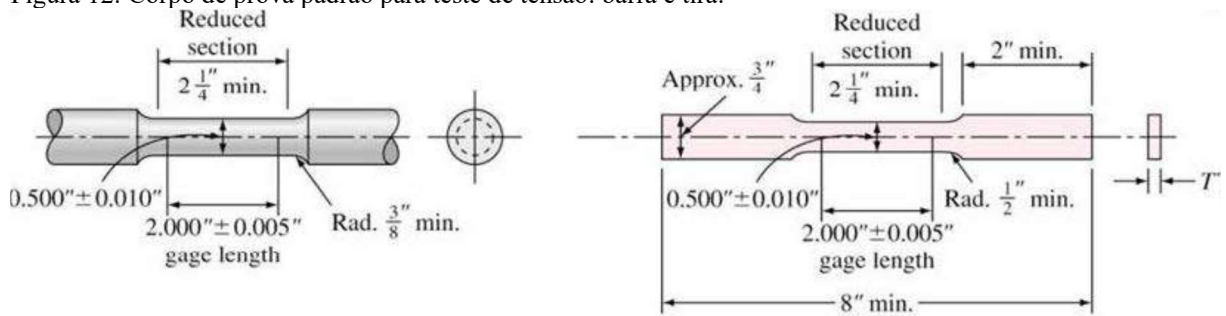
Fonte: Alexandrino (2018).

2.8 Ensaios para a determinação da curva de escoamento

2.8.1 Ensaio de Tração

Com a crescente demanda por processos de fabricação, em conjunto com a necessidade do controle da qualidade dos materiais utilizados em *designs* ou em infraestruturas de engenharia, a determinação das propriedades mecânicas não pode ser negligenciada. No caso de materiais sujeitos a carregamento é imprescindível o conhecimento de características intrínsecas como resistência e rigidez, pois isso irá importar na vida útil do material e, por conseguinte, na durabilidade e na confiabilidade das estruturas de engenharia que ele irá compor (FARIDMEHR et al., 2014). O teste de tração é considerado como o mais comum para a obtenção de propriedades mecânicas como o limite de escoamento, o módulo de elasticidade, a tenacidade, a resiliência etc, sendo inclusive utilizado para a avaliação e aceitação de materiais especificados. O ensaio é realizado com o uso de um corpo de prova padrão com o comprimento e a área da seção transversal conhecidas (Figura 12), submetido a certa carga axial de tração longitudinal até que atinja o ponto de ruptura sob a ação de uma taxa de extensão específica, e durante esse período são efetuados registros da sua carga e deformação (FARIDMEHR et al., 2014).

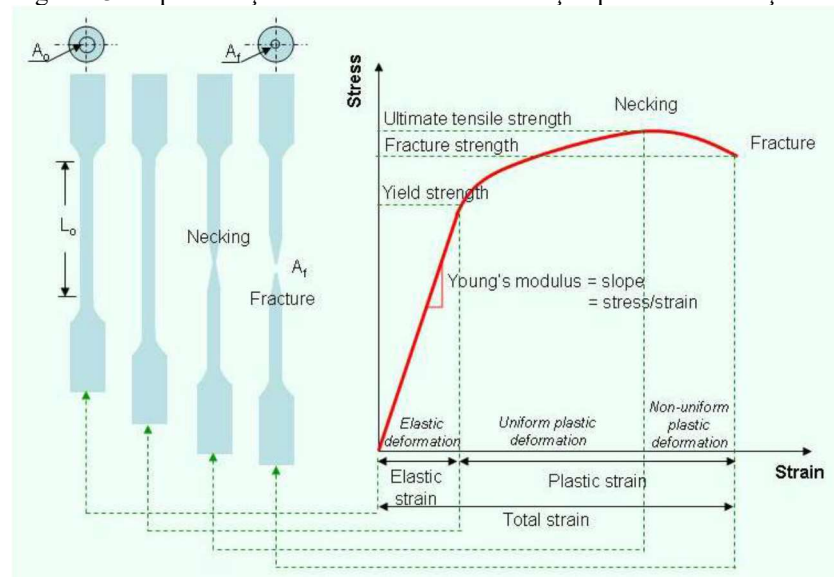
Figura 12: Corpo de prova padrão para teste de tensão: barra e tira.



Fonte: Faridmehr et al. (2014).

O alongamento da amostra inicia a sua fase elástica até o limite de não retorno a sua condição original mesmo retirado o carregamento. Esse valor pode ser extraído da curva tensão-deformação e representa a tensão de resistência ao escoamento, muito utilizado como fator de segurança em projetos estruturais ou de componentes de engenharia. Além desse ponto, o aumento na tensão é acompanhado do endurecimento por trabalho e de uma redução da seção até que seja alcançado o ponto máximo da curva, que é a maior tensão antes do ponto de fratura visto na Figura 13.

Figura 13: Representação da curva tensão deformação para teste de tração.

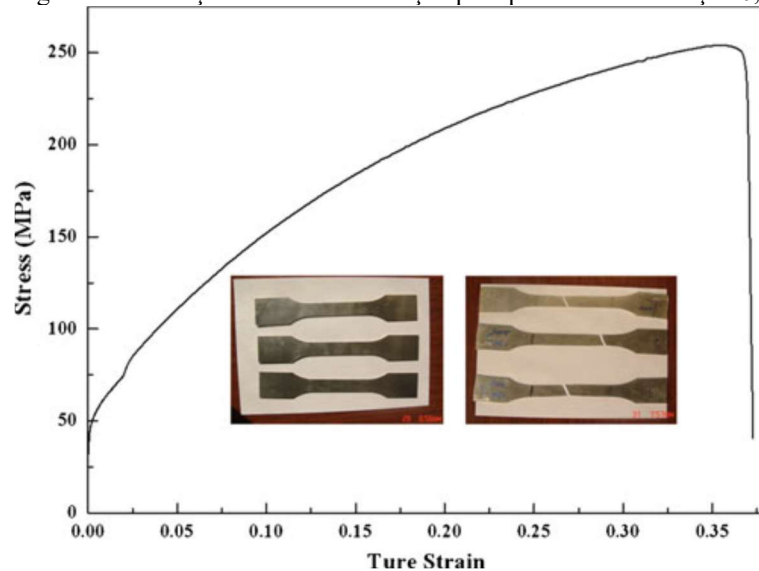


Fonte: Faridmehr et al. (2014).

Meyer e Chawala (1982) citam que o estrangulamento (ou estricção) visto na Figura 14 corresponde ao início da instabilidade ou deformação não uniforme no ensaio de tração, dado em geral na carga máxima durante o carregamento. Ela ocorre quando o aumento de tensão, acompanhado redução da seção transversal, ultrapassa a capacidade do material de suportar a

carga. No caso da modelagem da curva de escoamento para processos de conformação a frio para peças a granel os níveis de deformação estão acima de 1 enquanto que para chapas somente até 1.

Figura 14: Estricção em ensaio de tração para prata em deformação 0,35.



Fonte: Zhong, W. (2012).

2.8.2 Ensaio de Compressão Tradicional

No ensaio de compressão o corpo de prova também é submetido a uma carga axial crescente. Tanto a carga quanto a deformação são monitoradas por um transdutor revelando características específicas de um dado material tais como a resistência ao escoamento, a curva tensão-deformação e a tensão máxima. Essas informações são usualmente utilizadas em análises de estruturas e de processos de usinagem e fabricação de metais (ASTM E9, 2009).

Apesar de o teste de compressão não ser afetado pelo efeito de estrangulamento, como acontece no de tensão, a flambagem e o embarrilamento (Figura 15) surgem como interferentes importantes e devem ser minimizados.

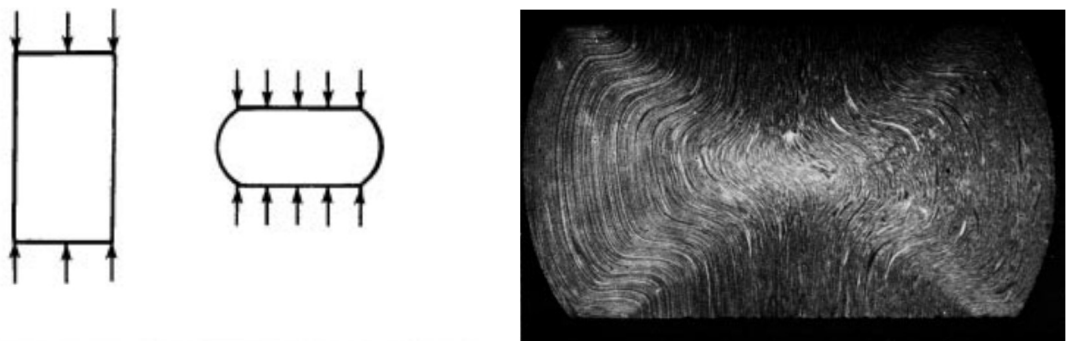
É recomendável que as amostras tenham a forma de cilindros sólidos e é sugerido o uso de três configurações pré-determinadas, dentro de uma faixa de dimensões e de relações entre o comprimento (L) e o diâmetro (D).

Amostras designadas como curtas são atribuídas a materiais que em serviço serão utilizados para transportar carga perpendicularmente a superfície, a exemplo de rolamentos, e respeitam a relação $0,8 < L/D < 2,0$. Já amostras de comprimento médio são normalmente

aplicadas para determinar as propriedades gerais de resistência de um material, com uma relação $L/D = 3,0$. Por fim, amostras longas servem para determinar o módulo de elasticidade, com uma relação $8,0 < L/D < 10,0$.

A norma também menciona a possibilidade de se utilizar amostras com formato retangular ou de uma folha plana, sendo preciso verificar a possibilidade do uso de suporte lateral para apoiá-la de modo que a mesma não flambe em decorrência das dimensões (ASTM E9, 2009).

Figura 15: Efeito de embarrilamento durante a compressão de uma amostra cilíndrica.



Adaptado de ASTM E9 (2009).

A preparação dos corpos de prova envolve algumas medidas como a atenção ao acabamento superficial, sendo recomendável uma rugosidade de $1,6 \mu m$ ou melhor, à planicidade e ao paralelismo das extremidades, e, no caso de folhas, a usinagem de uma das faces onde existam marcas de cortes, ranhuras ou rebarbas de processos predecessores de cisalhamento ou estampagem. E a medida de comprimento da amostra (L) após a compressão não deve ser menor do que metade do seu diâmetro (D) para não interferir com o posicionamento do dispositivo de aquisição de dados. O procedimento de teste envolve aspectos como o desengraxe e a lubrificação das superfícies de contato do ferramental da máquina de teste com as faces da amostra bem como o cuidado com a centralização da amostra para garantir um carregamento concêntrico (ASTM E9, 2009).

Para Alves et al. (2011) os ensaios de compressão são notadamente empregados para a determinação da curva de escoamento em comparação aos de tração. Tal predileção está associada à sua capacidade de avaliar a resposta do material em deformações verdadeiras maiores do que a unidade. Além disso as condições operacionais de processos reais como forjamento, laminação e extrusão, que são realizados sob altas cargas compressivas, podem ser reproduzidas com maior fidedignidade.

Segundo os autores a modelagem da curva é fortemente influenciada pela qualidade das medições e pelas condições de atrito na interface entre o ferramental e o corpo de prova. O atrito impede que as superfícies do corpo de prova se expandam livremente criando um efeito de embarrilamento, que prejudica o desempenho da curva.

O estudo estabelece uma relação e $1 < L/D < 3$, tanto motivada pela dificuldade para operar o extensômetro diretamente na amostra, no limite inferior, como para que se evite falha por flambagem, no limite superior. Essas restrições geométricas inibem a utilização do ensaio de compressão para a construção da curva de escoamento de materiais que se encontram na forma de chapas.

Rastegaev (1940) efetuou uma alteração do ensaio de compressão para diminuir a influência do atrito, mas não foi capaz de garantir que as amostras permanecessem cilíndricas visto que em altas deformações as paredes ao redor das faces finais são dobradas e não planas, levando a erros na medição do comprimento.

2.8.3 Ensaio de Compressão em Discos Empilhados

Pawelski (1967) foi pioneiro ao estudar um método alternativo ao ensaio de compressão tradicional. Ele avaliou que o uso do cilindro sólido era eficiente para determinar a resistência à deformação pela facilidade de aplicação, mas apresentava imprecisão no caso de amostras pouco espessas, em virtude da baixa relação entre a comprimento e o diâmetro. E essa condição faz com que outros métodos sejam aplicados para determinar a resistência à deformação em tiras ou chapas como o ensaio de tração.

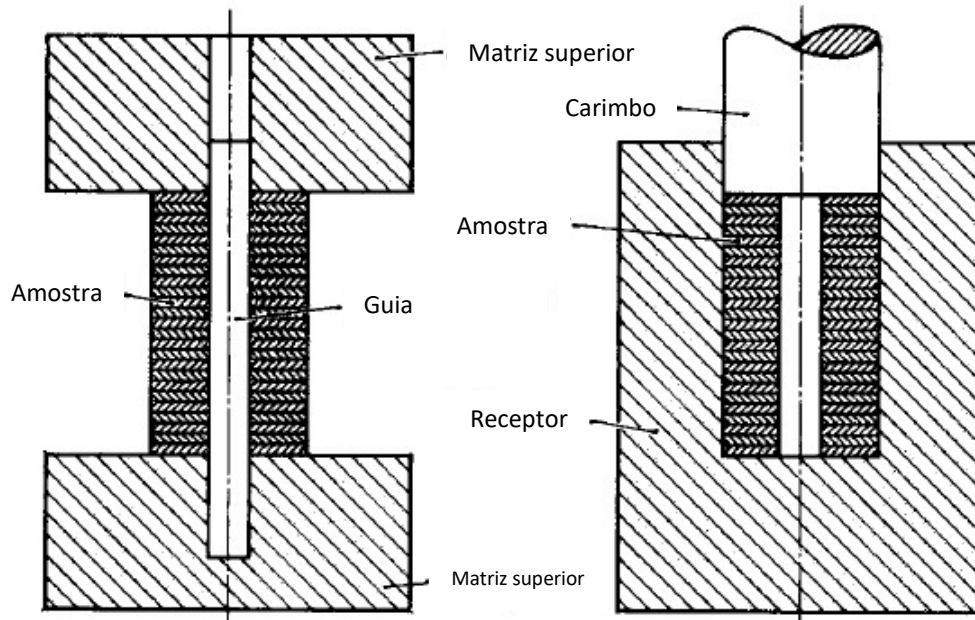
Observando a imprecisão do ensaio de tração, principalmente em materiais forjados a frio onde a resistência é muito baixa, bem como a facilidade de uso do ensaio de compressão, o autor propôs utilizar chapas cortadas em discos e empilhá-las em várias camadas umas sobre as outras reproduzindo a forma de um corpo de prova sólido.

O estudo abordou cenários que contemplaram o teste de compressão em discos ocos perfurados e orientados com guia interna e externa, conforme Figura 16. Dentre as conclusões, o autor registrou que durante a compressão das pilhas existe a possibilidade de ocorrer movimentação das camadas individuais umas em relação às outras.

Uma vez que a lubrificação pode ser realizada de maneira desigual, ou que o próprio material utilizado como lubrificante pode conter variações em suas propriedades, é possível a manifestação de desvios da simetria axial dos discos ou orientação. Como resultado as pilhas

se desestabilizam, mesmo com uma ligeira redução no comprimento. No decorrer da compressão as áreas de algumas camadas ficam relativamente menores do que outras e a deformação se concentra nelas, podendo ocorrer uma falha.

Figura 16: Compressão de discos empilhados com amostra guiada e sem guia.



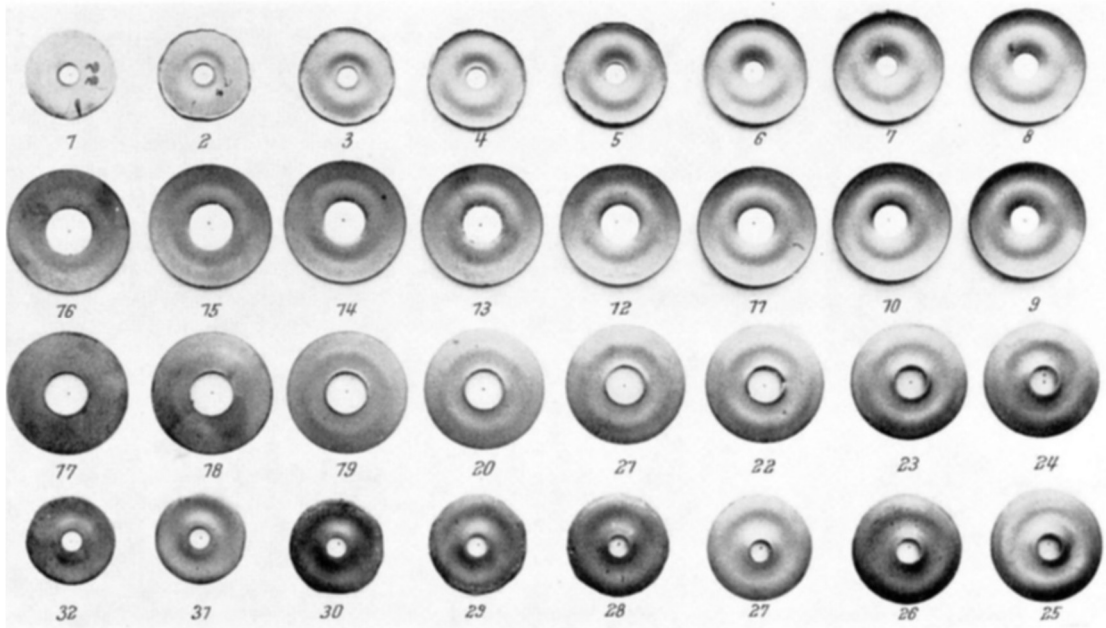
Fonte: Pawelski (1967).

Segundo Pawelski (1967) o torneamento cônico da ferramenta proporciona uma boa centralização no teste de compressão em cilindros sólidos. Apesar disso não é possível aplicá-lo em discos de baixa espessura.

O autor cita como alternativa ao torneamento cônico o uso de um cilindro oco com orientação interna do pino passante, sendo que nesse caso deve-se evitar a lubrificação das juntas de separação. O atrito seco entre as camadas individuais é suficientemente grande para evitar movimentos relativos maiores.

Após a compressão em 73% as camadas foram desmontadas e pôde ser visto uma deformação radial uniforme e um representação onde as fatias mais próximas do contato das placas de compressão apresentaram uma expansão menor do que aquelas localizadas mais ao centro, conforme Figura 17.

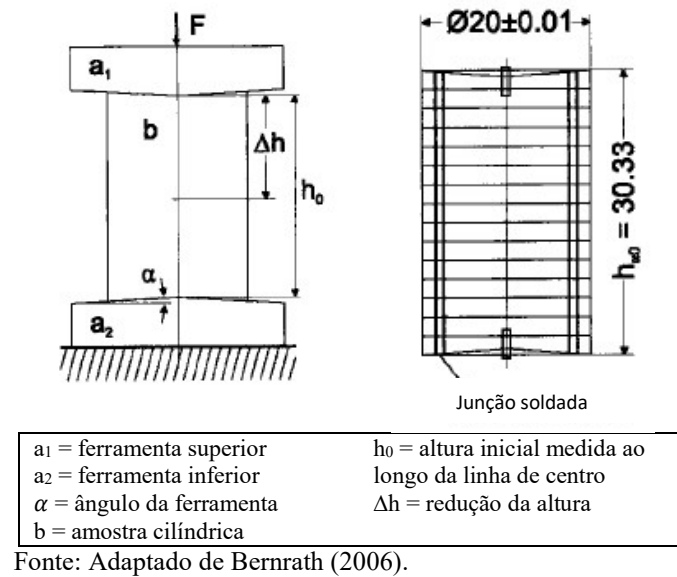
Figura 17: Estratificação de discos deformados (extremidade: 1 a 8; meio: 9 a 24; extremidade: 25 a 32).



Fonte: Pawelski (1967).

Bernrath (2006) foi convergente com o conceito de aplicação do teste de compressão em discos empilhados quando a peça for pouco espessa para produzir um corpo de prova sólido, citando linhas de produção de chapas metálicas finas com laminação ou fundição de tiras. Na compressão cônica, mostrada na Figura 18, com a lubrificação adequada foi possível obter uma redução de altura de 45 a 50% sob tensão uniaxial, adotando como diferencial na preparação da amostra a soldagem longitudinal para transformá-la em um corpo fixo e com camadas concêntricas (Bernrath, 2006 apud Siebel, 1927). Nesse caso foi utilizada uma pré carga de cerca de 20% abaixo da tensão de escoamento para a uniformizar a rugosidade do material nas faces de contato.

Figura 18: Teste de compressão em discos com arranjo cônico e soldagem longitudinal.



Bernrath (2006) analisou a compressão de duas ligas de aço, 50CrV4 e ST14. O aço 50CrV4 é fornecido em diversas formas como barras laminadas a quente, barras trefiladas, fios, tiras de mola e peças forjadas, usadas em serviços pesados como eixos, virabrequins, bielas, molas de compressão (Vigamet, 2024). Já o aço ST14 é laminado a frio com alto grau de tração e qualidade superficial e comporta propriedades mecânicas superiores, especialmente para usinagem (Gnee Stell, 2024).

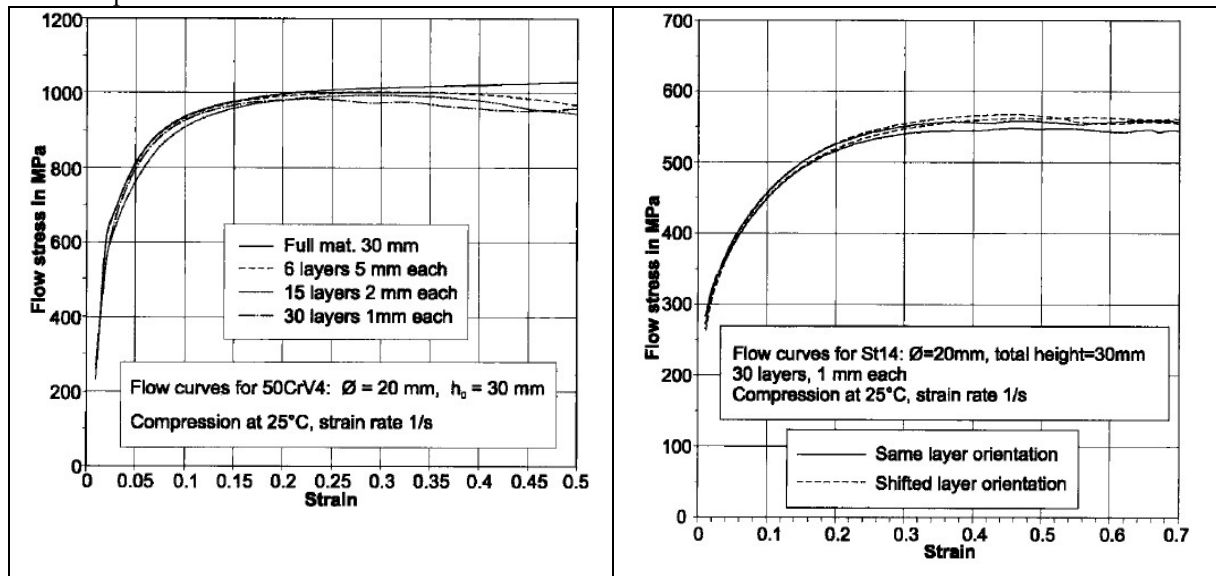
A modelagem das curvas contou, inicialmente, com corpos de prova cilíndricos sólidos de ambos os materiais nas dimensões de 30 mm de altura e 20 mm de diâmetro para serem utilizados como referência. Em seguida foram comprimidos corpos de prova formados por discos empilhados para a complementação do estudo.

Para o aço 50CrV4 foram utilizados discos de 1, 2 e 5 mm de espessura com material extraído das mesmas barras e para acompanhar a geometria do corpo de prova sólido foram montadas pilhas de 30, 15, 6 unidades discos, respectivamente. Já para o aço ST14 a pilha contou com 30 discos de 1 mm de espessura.

Em ambos os casos a relação resultante entre a altura e o diâmetro dos corpos de prova empilhados foi de 1,5. O autor decidiu por não utilizar ferramentas ou recursos para guiar a concentricidade dos discos e não efetuou lubrificação.

As curvas de escoamento da Figura 19 mostram perfis com poucas diferenças entre a amostra sólida e a multicamadas. Alguma diferença na tensão de escoamento foi observada em determinados pontos da curva, mas não excederam 10% e pareceram aumentar com o número crescente de camadas.

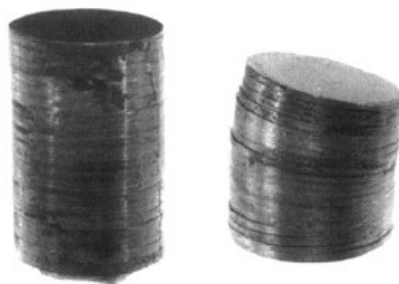
Figura 19: Modelagem das curvas de escoamento de aços 50CrV430 e ST14 pelo ensaio de compressão em discos empilhados.



Fonte: Bernrath (2006).

Apenas o corpo de prova com uma pilha de 30 discos apresentou instabilidade e flambou, conforme mostrado na Figura 20, mas para os demais espécimes os testes de compressão multicamadas foram considerados como uma técnica válida para determinar a curva de escoamento em condições de conformação isotrópica se houver indisponibilidade de material em dimensões apropriadas para preparar uma amostra sólida.

Figura 20: Amostra multicamada de aço ST14 antes da deformação e apresentando flambagem após a compressão.



Fonte: Bernrath (2006).

Diferentemente de Bernrath o estudo de Merklein (2009) foi realizado com uma liga de alumínio. Nele o autor menciona que, entre a ampla gama de ensaios existentes, o teste de compressão em pilhas apresenta a vantagem de atingir valores de deformação verdadeira iguais ou acima da unidade em comparação aos de tração.

Em seu estudo foi adotada uma adaptação da norma técnica aplicável ao ensaio de compressão padrão para a deformação de um corpo de prova formado por 10 discos de alumínio de 2,1 mm de espessura e 25 mm de diâmetro empilhados, extraídos de uma barra laminada, formando uma relação aproximadamente unitária entre altura e diâmetro do corpo de prova. A velocidade de deformação foi de 5 mm/min.

Merklein também discorre sobre cuidados no preparo das pilhas como a importância de organizá-las de modo mais concêntrico possível ou de se efetuar a lubrificação da interface de contato ferramenta-disco. É compreendido que devem ser evitados efeitos diferenciais de atrito que alterem muito a cilindridade da amostra, pois desse fato decorre uma mudança na homogeneidade das tensões e deformações.

O experimento conta com o uso de uma folha de teflon para atuar como lubrificante sólido entre a amostra e as placas de compressão da ferramenta. Ficou expresso que é essencial assumir que a deformação irá ocorrer de maneira isotrópica, com deformações radiais uniformes, e isso é garantido pela lubrificação.

A premissa de que a amostra irá se deformar uniformemente permite calcular a deformação pela teoria de escoamento de von Mises. Por outro lado, essa mesma teoria não é aplicável quando o material apresenta uma anisotropia e uma geometria final elíptica, podendo levar a necessidade de uso de 2 sistemas de medição em ângulo de 90 graus.

No preparo da pilha o autor ressalta o cuidado de gerar discos a partir de uma matriz utilizando laser para garantir a redução de interferências superficiais ao mínimo além de auxiliar com um empilhamento compacto e, também, a aplicação de uma pré carga como forma de atenuar o efeito de borda, auxiliando na compactação.

A visão de Alves et al. (2011) se alinha com a perspectiva dominante de cuidados no preparo das amostras. Em seu trabalho é utilizada uma liga de alumínio AA-2011, recozida por aquecimento a 420 °C por 1 hora e, posteriormente, resfriada, para a definição de relações de desempenho entre a amostra sólida e pilhas de discos de diferentes espessuras.

Na fase de preparo do cilindro sólido padrão, nas dimensões de 25 mm de altura por 25 mm de diâmetro, e dos discos, com espessuras de 3.125 mm, 6.25 mm e 12.5 mm, novamente se percebe a premissa de utilização de uma mesma barra. A Figura 21 apresenta a amostra sólida e as pilhas com discos de 12.5 mm e 6.25 mm, respectivamente.

Foi adotada uma relação unitária entre a altura e o diâmetro dos corpos de prova, bem como uma velocidade de deformação de 100 mm/min, e as curvas demonstraram notável semelhança com a amostra padrão a despeito de um reduzido desvio que se mostrou abaixo de 2%.

A pesquisa de Alves conclui que a preparação das pilhas foi fundamental para que todas as camadas estivessem concêntricas e que a área de seção transversal fosse idêntica, garantindo uma deformação homogênea e sem atrito ao longo da interface de contato com as placas.

O teste de compressão em pilha mostra que é capaz de atender à crescente demanda por informações precisas e confiáveis de curvas de escoamento.

Figura 21: Forma inicial de corpos de prova fabricados em liga de alumínio AA-2011.



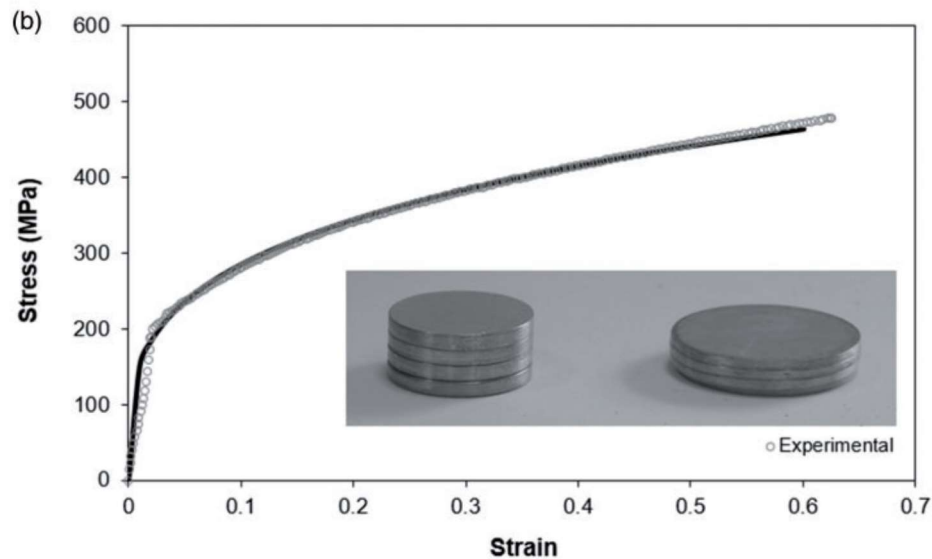
Fonte: Alves (2011).

Em uma nova perspectiva, Alexandrino (2017) relata a modelagem consistente da curva tensão-deformação de um liga prata-cobre (Ag500) (Figura 22) para fins de comparação com a simulação pelo método de elementos finitos (FEM).

O ensaio de compressão é realizado com corpos de prova formados por 4 discos de 15 mm de diâmetro e 1,65 mm de espessura extraídos de discos maiores de 32,65 mm de diâmetro. Ao contrário das outras obras, a extração dos corpos de prova não foi realizada de uma barra e sim de moedas cunhadas. Nesse caso foi fundamental a extração da orla ao redor das moedas, pois excediam a espessura e poderiam influenciar de maneira diferencial a fase de compressão.

Os testes foram realizados à temperatura ambiente em uma prensa de teste universal de 1200 KN e com velocidade da ferramenta de 10 mm/min.

Figura 22: Modelagem da curva tensão-deformação verdadeira da prata (Ag500) pelo ensaio de compressão em discos empilhados.



Fonte: Alexandrino (2017).

As matrizes planas utilizadas no ensaio apresentaram uma rugosidade de $0,319 \mu\text{m}$ e o autor evitou que o acabamento fosse polido como no caso de matrizes de cunhagem de moedas, pois a rugosidade caracteristicamente baixa dessas superfícies poderia levar a valores da força muito pequenos.

Apesar de se diferenciar em termos de material e do processo de preparação, o estudo de Alexandrino reforça a confiabilidade e usabilidade do método de compressão em pilhas.

Graf (2019) explica a importância de se conhecer o fluxo de um material com precisão bem como a carga de máquina necessária para haver deformação nos processos de conformação mecânica. O autor afirma que as curvas de escoamento são úteis nesse sentido, agregando informações como o processo de endurecimento do metal.

O estudo de Graf (2019) com o uso de discos empilhados reforça a tese de que é essencial evitar o movimento relativo entre as camadas para que os resultados das curvas de escoamento sejam compatíveis com o método tradicional.

O autor discorre sobre a necessidade de a tensão de cisalhamento máxima entre camadas ser equivalente à da amostra completa para não resultar na redução da tensão de escoamento e desvios sensíveis da curva. E, além disso, menciona que o atrito entre a ferramenta e a amostra não pode ser muito baixo para não resultar em instabilidade.

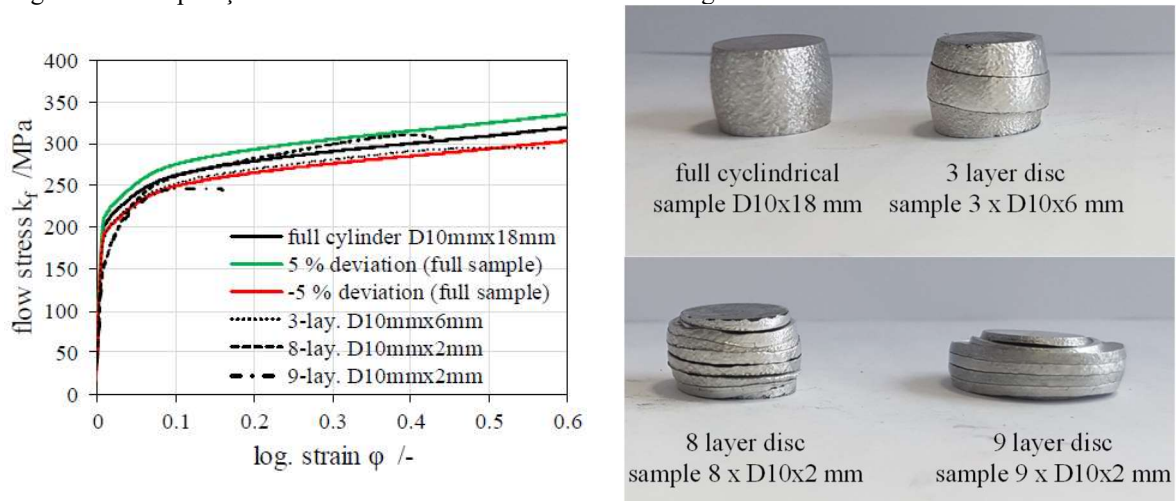
O atrito e a expansão da superfície correlacionam-se diretamente com a rugosidade das camadas de contato. Considerando que a ferramenta se aproprie da superfície de maior dureza no conjunto é prevista uma transferência de topografia dessa para a peça durante a compressão.

Assim, é importante que a ferramenta tenha uma topografia mais fina para que não iniba o fluxo do material. Superfícies rugosas podem criar cavidades onde os lubrificantes ficarão presos, podendo levar a desigualdades de lubrificação e, por outro lado, a rugosidade das superfícies sem contato com a ferramenta pode aumentar dependendo da microestrutura próxima à superfície.

O trabalho de Graf (2019) contou com o uso de uma ferramenta de metal duro polido com rugosidade superficial média de $0,13 \mu\text{m}$ e tiras finas de alumínio com uma rugosidade de $0,55 \mu\text{m}$ que foi aumentada para $1,1 \mu\text{m}$ apenas na área de contato entre discos.

Foram utilizados corpos de prova com 10 mm de diâmetro, porém com 3 geometrias diferentes de empilhamento para a montagem da curva de escoamento (3 discos de 10 por 6 mm; 8 discos de 10 por 2 mm; e 9 discos de 10 por 2mm) e um cilindro sólido de 10 mm de diâmetro e 18 mm de altura. Os perfis das pilhas de 3 discos e 8 discos mostraram-se compatíveis com o cilindro sólido utilizado como referência, com um desvio de 5% considerado aceitável. Apenas a pilha maior de 9 discos foi desconsiderada pois o grande número de planos de deslizamento levou à sua instabilidade. A Figura 23 apresenta essa distribuição.

Figura 23: Comparação de curvas de escoamentos em diferentes geometrias.



Fonte: Graf (2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Critérios para realização do ensaio de compressão em discos empilhados.

De maneira geral, a obtenção dos corpos de prova buscou conciliar a compatibilização dos recursos tecnológicos existentes com os padrões dimensionais recomendados pela literatura

para ensaios de compressão tradicional e em discos empilhados. Tal medida visou facilitar as rotinas de produção em função da origem e da forma da matéria prima. A definição da geometria dos corpos de prova observou, basicamente, os seguintes critérios:

- Mínima alteração das matérias primas existentes;
- Limitação da altura da pilha para evitar o efeito de flambagem.

Para o ensaio da prata esterlina (925) a modelagem da curva contou com o uso de cilindros sólidos para serem utilizados como referência de comparação da pilha, conforme mencionado nos estudos de Bernrath (2006) e Graf (2019), enquanto que para o cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$) tais comparações foram realizadas apenas com a literatura, pois o material encontrava-se em estoque na forma de discos prontos para cunhagem (Alexandrino, 2017).

Para a modelagem das curvas os dados de carga (F) e deslocamento do cabeçote (D_c), capturados pelos softwares, foram convertidos, inicialmente, em tensão de engenharia (S) e deformação de engenharia (e) adotando-se as equações Eq.7 e Eq.8 e os valores da área inicial (A_0) e da altura inicial (h_0) dos corpos de prova que constam dos quadros a seguir (Quadro 6 e Quadro 7). Em seguida, a tensão verdadeira (σ) e a deformação verdadeira (ε) foram obtidas pelas equações Eq.9 e Eq.10.

$$S = \frac{F}{A_0} \quad (\text{Eq.7})$$

$$e = \frac{D_c}{h_0} \quad (\text{Eq.8})$$

$$\sigma = s (1 - e) \quad (\text{Eq.9})$$

$$\varepsilon = - \ln (1 + e) \quad (\text{Eq.10})$$

Quadro 6: Dimensões dos corpos de prova de prata esterlina (925).

Corpo de prova	Diâmetro inicial D_0 (mm)	Área inicial A_0 (mm ²)	Altura inicial h_0 (mm)
C1	39,99	1599,20	19,72
C2	40,08	1606,41	19,61
P1	40,03	1602,40	19,78
P2	40,07	1605,60	19,97
P3	40,01	1600,80	20,84
P4	40,08	1606,41	20,73

Fonte – próprio autor (2024).

Quadro 7: Dimensões dos corpos de prova de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$).

Corpo de prova	Diâmetro inicial D_0 (mm)	Área inicial A_0 (mm^2)	Altura inicial h_0 (mm)
A	13,0	169,0	6,4
B	13,0	169,0	6,4
C	13,0	169,0	6,4
D	13,0	169,0	6,4
E	13,0	169,0	9,6
F	13,0	169,0	9,6

Fonte – próprio autor (2024).

3.2 Descrição do preparo dos corpos de prova.

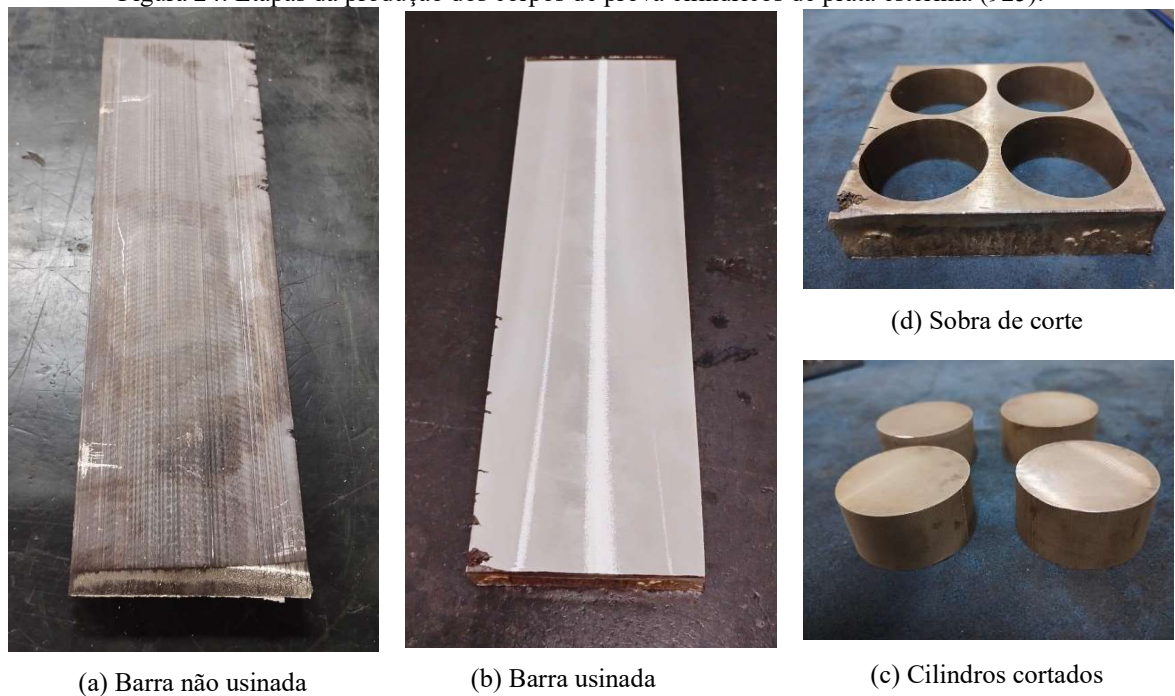
A liga de prata esterlina (925) foi produzida em forno de lingotamento contínuo, gerando barras com 22 mm de espessura. Essa dimensão foi escolhida por ser a maior disponível e possibilitar a remoção de excesso de material para compatibilização da altura dos corpos de prova cilíndricos. Ambas foram inspecionadas visualmente e houve a segregação de duas unidades que apresentavam um aspecto superficial mais uniforme com relação a porosidades ou imperfeições.

A primeira barra de prata esterlina (925) foi enviada para a produção dos cilindros sólidos seguindo as etapas enumeradas abaixo:

1. Usinagem de 1 mm de metal de ambas as faces por fresamento, passando de 22 mm para 20 mm de espessura;
2. Corte dos cilindros por eletroerosão a fio.

A eletroerosão a fio foi escolhida por proporcionar uma secção mais limpa, livre de cisalhas, evitando interferências na área de contato durante a compressão (MERKELEIN, 2009) e ao final os cilindros apresentaram dimensões de 20 mm de altura e 40 mm de diâmetro com uma relação entre a altura e o diâmetro de 0,5. A Figura 24 ilustra o sequenciamento das atividades de produção dos corpos de prova sólidos de prata esterlina (925).

Figura 24: Etapas da produção dos corpos de prova cilíndricos de prata esterlina (925).



Fonte: Próprio autor (2024).

A segunda barra de prata esterlina (925) foi enviada para a produção de discos cumprindo etapas de conformação mecânica e tratamento térmico:

3. Remoção de 1 mm de espessura de ambas as faces por fresamento, passando de 22 mm para 20 mm de espessura;
 4. Redução de espessura em 50% por laminação, passando de 20 mm para 10 mm;
 5. Tratamento térmico a 600 °C por 20 minutos em forno convencional;
 6. Redução de espessura em 50% por laminação, passando de 10 mm para 5 mm;
 7. Tratamento térmico a 600 °C por 20 minutos em forno convencional;
 8. Redução de espessura por laminação para 2,15 mm;
 9. Corte dos discos.
 10. Segregação de uma quantidade para tratamento térmico à 600 °C por 20 minutos em forno convencional.
- Buscando a compatibilização da espessura da barra de prata esterlina (925) com a espessura dos discos e a formação de uma relação entre o comprimento e a altura da pilha próxima de 0,44 (Alexandrino (2017)), foi definido um empilhamento de 9 discos de prata e isso resultou em uma relação entre o comprimento e a altura de 0,495, próxima da literatura. Todos os corpos de prova foram produzidos em duplicata conforme Quadro 8.

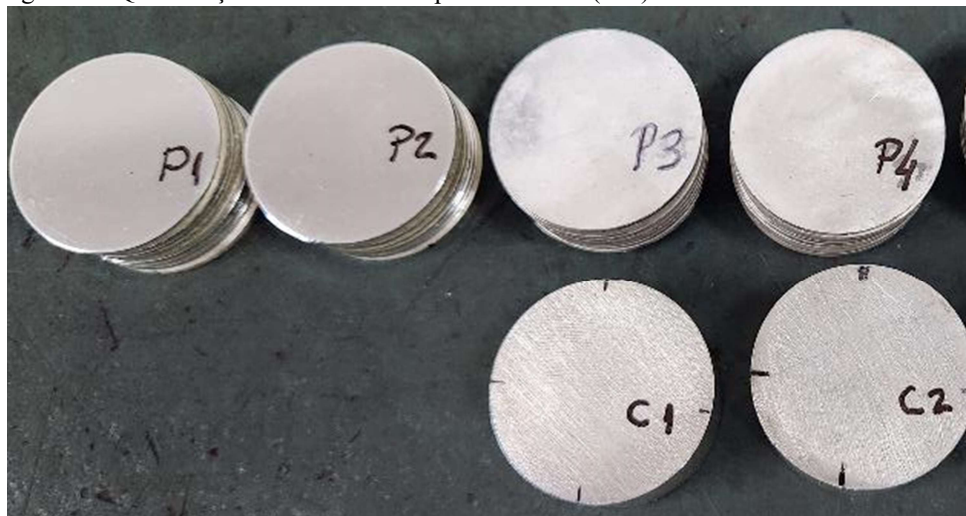
Quadro 8: Arranjo de montagem das amostras de prata esterlina (925).

Amostra	Camadas (un.)	Altura inicial h_0 (mm)	Diâmetro inicial d_0 (mm)	Relação h_0/d_0
Cilindro	---	20,0	40,0	---
Cilindro	---	20,0	40,0	---
Pilha não recozido	9	19,8	40,0	0,495
Pilha não recozido	9	19,8	40,0	0,495
Pilha recozido	9	19,8	40,0	0,495
Pilha recozido	9	19,8	40,0	0,495
Pilha recozido	9	19,8	40,0	0,495
Pilha recozido	9	19,8	40,0	0,495

Fonte: Próprio autor (2024).

Os corpos de prova foram limpos com um pano de microfibras, organizados e qualificadas como a nomenclatura “C” para corpo de prova cilíndrico e “P” para pilha de discos (Figura 25). As amostras P1 e P2 apresentavam uma superfície brilhante, pois não passaram pelo forno de recozimento, enquanto P3 e P4 apresentaram uma superfície fosca decorrente do tratamento térmico em atmosfera não inerte. Para a formação das pilhas foram segregados discos com imperfeições ou heterogeneidades que pudessem comprometer o ensaio e as melhores superfícies foram escolhidas para assumir a primeira e a última posição de contato com as placas de compressão.

Figura 25: Qualificação das amostras de prata esterlina (925).



Fonte: Próprio autor (2024).

Para o ensaio do cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$) o material já estava pronto e com orlas em ambas as faces e foi preciso utilizar uma máquina de eletroerosão a fio para a extraí-las e isso resultou na geração discos menores com superfícies lisas, conforme Figura 26. Considerando que as orlas são regiões ligeiramente mais elevadas em relação as faces, caso fossem mantidas poderiam criar zonas de instabilidade durante a deformação e levar a caminhos preferenciais de lubrificação indesejáveis (GRAF, 2019). Um ponto importante é que os discos já estavam no estado recozido como requisito da especificação e isso colabora com a homogeneidade e a deformação isotrópica do material. A etapa de preparação das amostras contou ainda com uma inspeção visual e seleção dos melhores discos para garantir ao máximo a uniformidade da pilha durante a deformação.

Figura 26: Disco de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$) orlado e sem orla.



Fonte – próprio autor (2024).

O teste com o cuproníquel envolveu o empilhamento dos discos em 6 conjuntos e 2 geometrias diferentes, sendo a primeira com uma relação entre a altura e o diâmetro de 0,5 e a segunda, de 0,7. Tal diferenciação objetivou avaliar efeitos da deformação em velocidades distintas. As amostras foram produzidas em duplicata e o arranjo de montagem encontra-se no Quadro 9.

Quadro 9: Arranjo de montagem das amostras de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$).

Amostra	Camadas (un.)	Altura inicial $h_0(\text{mm})$	Diâmetro inicial $d_0 \text{ (mm)}$	Relação h_0/d_0
A	4	6,4	13,0	0,5
B	4	6,4	13,0	0,5
C	4	6,4	13,0	0,5
D	4	6,4	13,0	0,5
E	6	9,6	13,0	0,7
F	6	9,6	13,0	0,7

Fonte: Próprio autor (2024).

3.3 Caracterização dos corpos de prova

3.3.1 Determinação da Composição Química

A análise da composição química foi realizada para determinar os teores dos elementos de liga e verificar a presença de impurezas indesejáveis, pois as características constitutivas influenciam a curva de escoamento e dentre elas se encontra a composição química.

Para a prata esterlina (925) se utilizou o método Gay-Lussac combinado com espectrofotometria de absorção atômica. A barra foi broqueada em três pontos gerando triplicatas que foram abertas com uma solução de HNO_3 1:1 a quente e comparadas ao padrão na faixa de 0,5 a 14 mg/l de prata.

Para o cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$) foi utilizado um espectrômetro de emissão óptica - SPARK, modelo Foundry Master PRO. Foram manipulados 3 discos de um mesmo lote.

3.3.2 Determinação da Rugosidade.

O ensaio de rugosidade foi realizado para verificar as condições das superfícies de contato dos corpos de prova com os ferramentais e entre as camadas de discos tendo em vista a manutenção das condições de compressão (GRAF, 2019).

Utilizou-se um rugosímetro Mitutoyo SJ-210 (Figura 27) e as medições contaram com amostra do cilindro padrão de prata esterlina (925) e de discos da prata e de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$). No caso do cilindro padrão foi necessário ajustar a superfície com lixa fina para reduzir as marcas de usinagem e proporcionar condições de medição.

Figura 27: Rugosímetro utilizado em amostras de prata esterlina (925) e cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$).



Fonte: Próprio autor (2024).

3.3.3 Determinação da Microestrutura e Dureza.

A investigação desses parâmetros foi realizada em amostras de discos de prata esterlina (925) não recozida e recozida para confirmar os estados inicial e final do material e o alívio de tensões decorrentes do trabalho a frio, acumuladas durante todas as etapas de conformação mecânica.

O recozimento recupera a ductilidade inicial da peça bruta antes da fase final de cunhagem. No caso do cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$) a investigação foi realizada somente em discos recozidos, pois o material já foi fornecido nesse estado.

As amostras de prata esterlina (925) e de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$) foram cortadas em uma máquina de corte BUEHLER Abrasimatic 300 e seguiram para embutimento a quente em um equipamento ALLIED Techpress 2. O lixamento e o polimento foram realizados em lixadeira-politriz Buehler Ecomet 300 e, por fim, a análise metalográfica foi conduzida em um microscópio óptico da Olympus GX-51 (Figura 28).

Figura 28: Lixadeira e microscópio utilizados na análise metalográfica da prata esterlina (925).



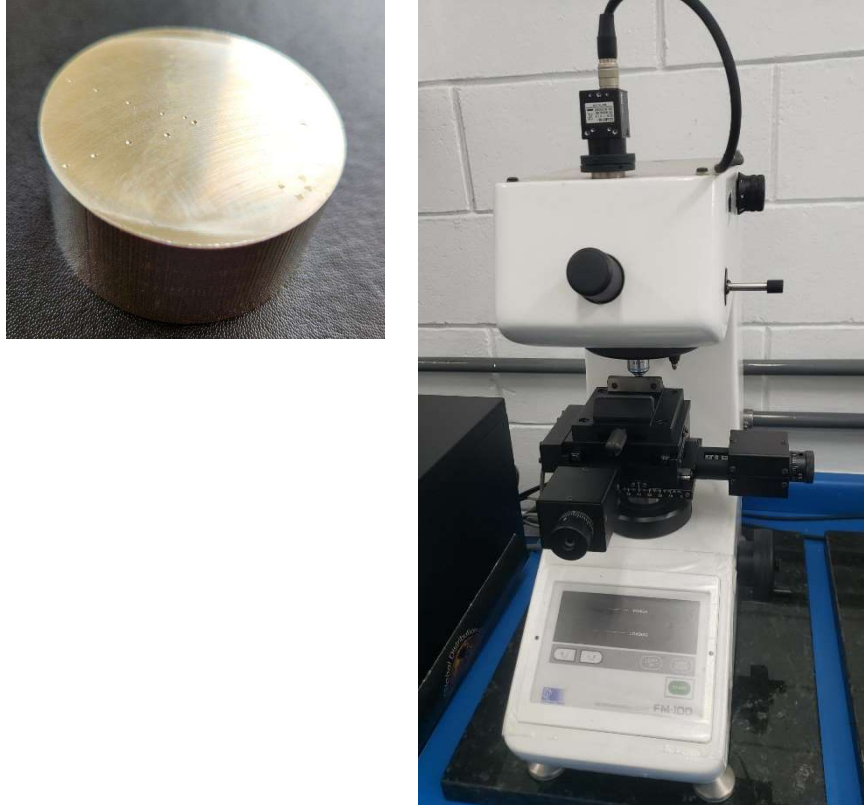


Fonte: Próprio autor (2024).

A análise de dureza foi realizada para confirmar se o material se encontrava em condições de cunhagem, pois esse tipo de parâmetro afeta a forjabilidade e o desgaste de ferramentais (ALTAN et al., 1983).

Após o embutimento os valores de dureza foram medidos de acordo com a norma *ISO 6508-1 Metallic Materials - Rockwell Hardness Test - Part 1- Test Method* e o ensaio foi realizado em um equipamento Fure Tech Microhardness FM 100 (Figura 29) com um endentador piramidal. A medida foi obtida na escala Vickers em 5 pontos dos discos recozidos, discos não recozidos e na sobra de corte do cilindro: ao centro; em posições relativas ao raio ($1/4r$, $1/2r$ e $3/4r$); e na borda radial.

Figura 29: Análise de dureza em amostras de prata esterlina (925) e Cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$).



Fonte: Próprio autor (2024).

3.3.4 Modelagem das Curvas de Escoamento

Os corpos de prova cilíndricos C1 e C2 de prata esterlina (925) foram comprimidos a velocidade de 10,2 mm/min e esse valor foi escolhido pela sua previsão em literatura com amostras e condições semelhantes (Alexandrino, 2017). Em seguida, as pilhas P1 à P4 foram deformadas nas mesmas condições. O Quadro 10 fornece informações do planejamento experimental e dados adicionais estão disponíveis no Apêndice A.

Quadro 10: Planejamento experimental para o ensaio de compressão da prata esterlina (925).

Amostra	Camadas (um.)	Altura h_0 (mm)	Diâmetro d_0 (mm)	Relação h_0/d_0	Velocidade (mm/min)
C1	---	20,0	40,0	---	10,2
C2	---	20,0	40,0	---	10,2
P1	9	19,8	40,0	0,495	10,2

Amostra	Camadas (um.)	Altura h_0(mm)	Diâmetro d_0 (mm)	Relação h_0/d_0	Velocidade (mm/min)
P2	9	19,8	40,0	0,495	10,2
P3	9	19,8	40,0	0,495	10,2
P4	9	19,8	40,0	0,495	10,2

Fonte – próprio autor (2024).

Os testes foram conduzidos a temperatura ambiente em uma prensa PANAMBRA VERSAT de 1000 quilonewton de força (Figura 30) e tanto a aquisição como o pós processamento de dados foi efetuado com o auxílio do software Maxitest, que permitia configurar diversos parâmetros, dentre os quais a velocidade do cabeçote e a deformação final. Inicialmente, as amostras tiveram as dimensões aferidas com um paquímetro Absolute Digimatic e essas medidas serviram para ajustar manualmente o software Maxitest para caracterização da área em que a carga iria atuar durante a compressão.

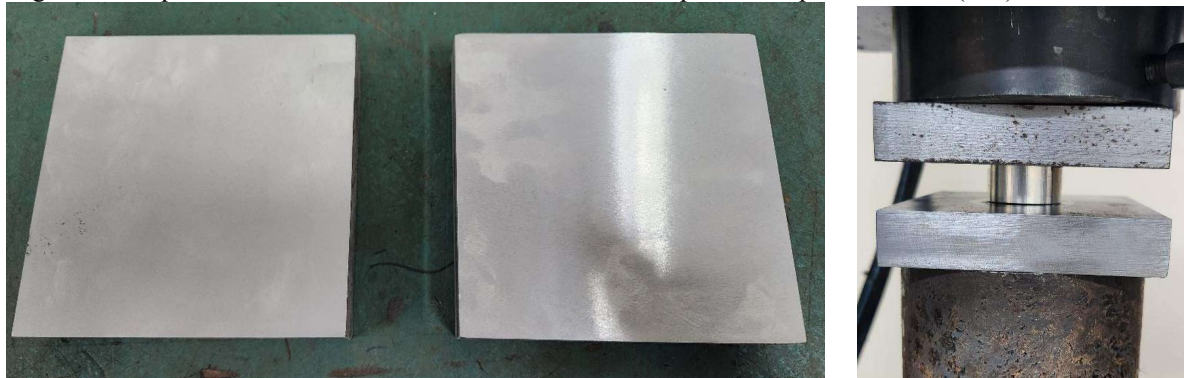
O ferramental contou com o uso de duas placas quadradas de aço carbono, com 150 mm de lado por 30 mm de espessura, retificadas, conforme mostrado na Figura 31. A placa inferior precisou ser apoiada sobre calços para proporcionar altura suficiente e um alinhamento final foi realizado com nível bolha STANLEY GP, sendo essa condição monitorada. Ao longo dos testes foi necessário retificar a ferramenta novamente para corrigir o aparecimento de uma depressão gerada ao longo dos testes. A deformação foi estabelecida em 40% (equivalente a 8 mm) e foi preciso utilizar o paquímetro para conferência medindo-se a distância entre placas após a deformação.

Figura 30: Máquina utilizada no ensaio de compressão da prata esterlina (925) - prensa PANAMBRA.



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 31: Esquema do ferramental utilizado no ensaio de compressão da prata esterlina (925).



Fonte: Próprio autor (2024).

Antes de cada ensaio as placas foram lubrificadas manualmente com graxa a base de teflon, distribuída manualmente para reduzir o atrito decorrente do contato entre a superfície do disco e o ferramental da máquina. As pilhas de discos foram envolvidas com fita crepe, conforme Figura 32, para garantir um melhor alinhamento e ajudar a prevenir efeitos de flambagem em decorrência de deslocamentos diferenciais durante a compressão. Um benefício

adicional observado com o uso da fita foi a prevenção de lubrificação acidental entre camadas devido a manipulação.

Uma pré carga foi aplicada manualmente para remoção de folgas do equipamento e prevenção de desvios na modelagem da curva. Essa medida também favorece o assentamento da pilha, deixando-a mais compacta possível, pois os discos são fabricados por puncionamento e apresentam algum grau de flexão que reduz a zona de contato entre eles. Os dados de carga e deslocamento foram transpostos e trabalhados em planilha eletrônica para obtenção da curva tensão-deformação verdadeira.

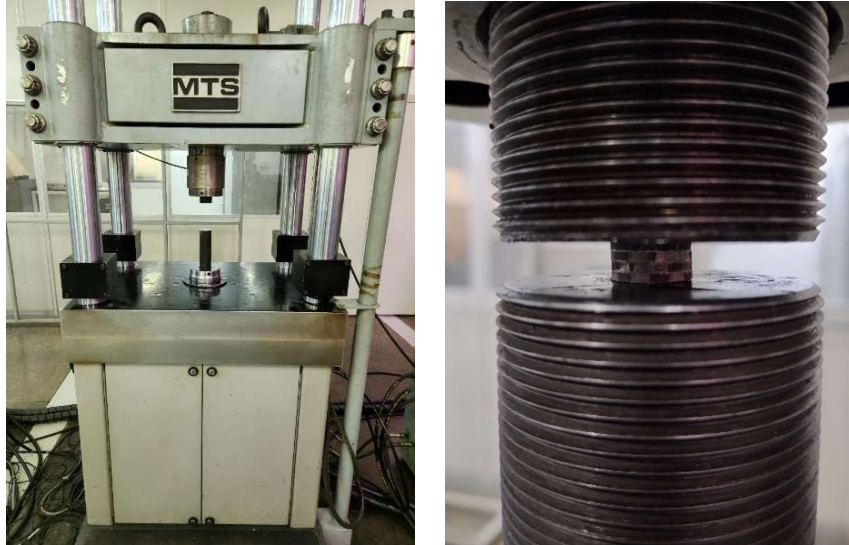
Figura 32: Exemplificação do uso de fita para fixação e centralização dos discos de prata esterlina (925).



Fonte: Próprio autor (2024).

Os testes do cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$) foram conduzidos a temperatura ambiente em uma prensa MTS de 100 toneladas (Figura 33), com controle de velocidade. Os dados de força e deslocamento foram capturados e trabalhados diretamente em planilha eletrônica para obtenção da curva tensão-deformação verdadeira. O ferramental de compressão tinha um acabamento liso e não precisou ser calçado, pois se encontrava com a altura necessária.

Figura 33: Máquina utilizada no ensaio de compressão do cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$) – prensa MTS.



Fonte: Próprio autor (2024).

Novamente, amostras foram limpas com um pano de microfibra e para a formação das pilhas foram retirados discos considerados não conformes, que pudessem comprometer o ensaio, sendo que as melhores superfícies foram mantidas nas extremidades de contato com o ferramental.

Antes de cada ensaio foi utilizada a mesma graxa a base de teflon do ensaio da prata esterlina (925), distribuída manualmente para reduzir o atrito decorrente do contato entre a superfície do disco e o ferramental da máquina. Além disso, as pilhas foram alinhadas e posicionadas cuidadosamente no centro do cabeçote objetivando a manutenção da forma cilíndrica do conjunto ao longo da compressão. Uma pré carga de 10 Newton foi programada via software para remoção de folgas do equipamento e assentamento da pilha, deixando-a mais compacta possível para reduzir instabilidades e remover vazios entre os discos.

O planejamento experimental que consta do Quadro 11 envolveu o empilhamento dos discos em 6 conjuntos e 2 geometrias diferentes, sendo a primeira com uma relação entre a altura e o diâmetro de 0,5 e a segunda, de 0,7. A primeira geometria serviu como referência para avaliar efeitos da deformação em duas velocidades distintas, de 49,8 e 10,2 mm/min. O teste foi então repetido mantendo-se a velocidade de 10,2 mm/min, mas agora com uma relação altura-diâmetro de 0,73 milímetros. O quadro a seguir apresenta o planejamento experimental e dados adicionais estão disponíveis no Apêndice B.

Quadro 11: Planejamento experimental para o ensaio de compressão do cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$).

Amostra	Camadas (un)	Altura h_0 (mm)	Diâmetro d_0 (mm)	Relação h_0/d_0	Velocidade (mm/min)
A	4	6,4	13,0	0,5	0,83
B	4	6,4	13,0	0,5	0,83
C	4	6,4	13,0	0,5	0,17
D	4	6,4	13,0	0,5	0,17
E	6	9,6	13,0	0,7	0,17
F	6	9,6	13,0	0,7	0,17

Fonte – Próprio autor (2024).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise da composição química

A composição química das amostras de prata esterlina (925) se encontrava na faixa de trabalho, entre 92,5% a 92,8% em prata e não foram detectados elementos indesejáveis na forma de óxidos de silício ou alumínio (Quadro 12).

Quadro 12: Resultado da análise química da liga de prata esterlina (925).

Componente	Teor
Prata	92,63%
Cobre	Restante

Fonte – próprio autor (2024).

A composição química das amostras de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$) se encontrava fora da faixa de trabalho, entre 24,0% e 26,0%, e foram detectados pequenos percentuais de Fe, Mn e Sn (Quadro 13).

Quadro 13: Resultado da análise química da liga de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$).

Elemento	Cu	Ni	Zn	Sn	Mn	Fe	Nb	P
% p/p	71,20	28,40	0,11	0,09	0,07	0,04	<0,01	<0,01

Fonte – próprio autor (2024).

Apesar dos elementos Fe, Mn e Sn terem sido em percentuais baixos a adição de elementos em solução sólida em geral aumenta o encruamento (SCHAEFFER, 2020). Além disso, o teor maior de níquel pode contribuir com o aumento da resistência ao escoamento em

virtude da sua característica de responder ao trabalho a frio e não ao tratamento térmico (DIETER, 1981).

4.2 Análise da rugosidade.

A rugosidade média das amostras de prata esterlina (925), denominadas “cilindro”, se encontrava dentro da faixa de trabalho prevista na norma ASTM E09, que recomenda $1,6 \mu m$ ou menor, conforme pode ser visto no Quadro 14. Já uma das literaturas utilizadas como referência para o ensaio de compressão com discos empilhados cita um valor de $0,55 \mu m$ no contato do corpo de prova com a ferramenta e de $1,1 \mu m$ entre discos (GRAF, 2019).

Nesse sentido as amostras “discos recozidos” apresentaram valores médios compatíveis para a zona de contato com ferramental, na faixa de $0,503 \mu m$ de rugosidade média, porém significativamente menores se considerada para o contato entre os discos. Já os “discos não recozidos” apresentaram valores menores para as duas condições.

Os valores baixos de rugosidade entre camadas chamam a atenção pela necessidade de se manter a tensão de cisalhamento máxima entre camadas equivalente à da amostra completa para não resultar na redução da tensão de escoamento e desvios sensíveis da curva (GRAF, 2029).

A rugosidade média das amostras “cilindro” e “disco não recozido” apresentaram valores próximos mais baixos do que da amostra “disco recozido” e esse comportamento é sugestivo da influência do óxido superficial formado pelo recozimento da prata em atmosfera não inerte.

Quadro 14: Medição de rugosidade para cilindro padrão e discos de prata esterlina (925).

Amostra		Medições			Rugosidade (μm)		
					Mínimo	Médio	Máximo
Disco recozido	1	0,365	0,291	0,379	0,291	0,503	0,780
	2	0,400	0,651	0,569			
	3	0,508	0,580	0,780			
Disco não recozido	1	0,127	0,221	0,175	0,065	0,216	0,398
	2	0,092	0,065	0,153			
	3	0,366	0,345	0,398			
Cilindro		0,106	0,083	0,072	0,072	0,087	0,106

Fonte: Próprio autor (2024).

Para as amostras A, B e C de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$) a rugosidade média foi de $0,326 \mu\text{m}$ e pode ser considerada próxima da faixa de trabalho prevista na literatura para o contato com o ferramental, mas baixa para o contato entre camadas, conforme pode ser visto no Quadro 15.

Quadro 15: Medição de rugosidade para cilindro padrão e discos de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$).

Medições	Rugosidade (μm)					
	Disco A		Disco B		Disco C	
	Face 1	Face 2	Face 1	Face 2	Face 1	Face 2
1	0,268	0,220	0,333	0,274	0,311	0,304
2	0,333	0,355	0,272	0,437	0,234	0,272
3	0,275	0,302	0,466	0,315	0,401	0,329
4	0,316	0,368	0,359	0,298	0,288	0,385
5	0,310	0,433	0,367	0,284	0,448	0,292
6	0,356	0,380	0,354	0,398	0,331	0,068
Média	0,326					

Fonte: Próprio autor (2024).

4.3 Análise da microestrutura e dureza

Para a prata esterlina (925) a amostra “cilindro” apresentou grandes descontinuidades de formato quase esféricos, possivelmente decorrente de gases aprisionados durante a solidificação. Não foram percebidas descontinuidades significativas nas amostras de discos “recozidos” e “não recozidos” possivelmente em virtude de elas serem submetidas a compressão nas etapas de laminação a frio, atuando na redução das mesmas.

A literatura menciona que bolhas e porosidades presentes em lingotes fundidos podem ser eliminadas através do forjamento ou laminação, o que proporciona uma melhoria na ductilidade e na tenacidade a fratura (DIETER, 1981).

Com relação à microestrutura as amostras apresentaram os seguintes resultados:

- O “cilindro” apresentou microestrutura dendrítica com fase mais clara, alfa, mais rica em prata, cujos grãos se solidificam em forma de tronco com galhos, e fase beta, mais rica em cobre, que aparece mais escura nas imagens por ser mais reativa, se solidifica nos vazios entre os “galhos” (Figura 34 e Figura 35).

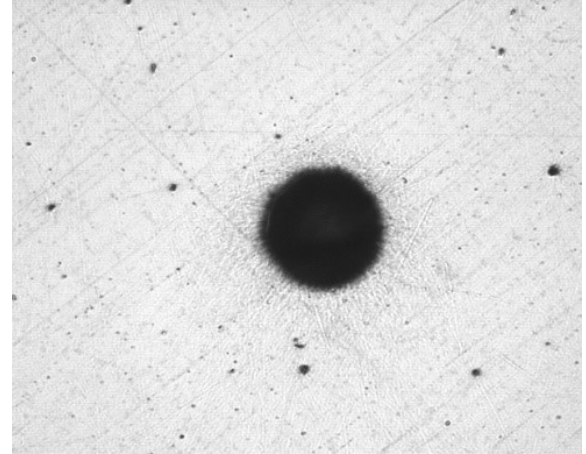
- Os discos “recozidos” apresentaram estrutura de metal CFC recozido com contornos de grão bem definidos, presença de maclas e aspecto geométrico característico (Figura 36).
- Os discos “não recozidos” apresentaram contornos de grão alterados, com fortes marcas de acúmulo de discordâncias dentro dos grãos, sem maclas, e com ligeira orientação de grão (Figura 37).

As etapas de trabalho a frio e recozimento alteraram o aspecto dendrítico que a microestrutura apresentava logo após solidificar.

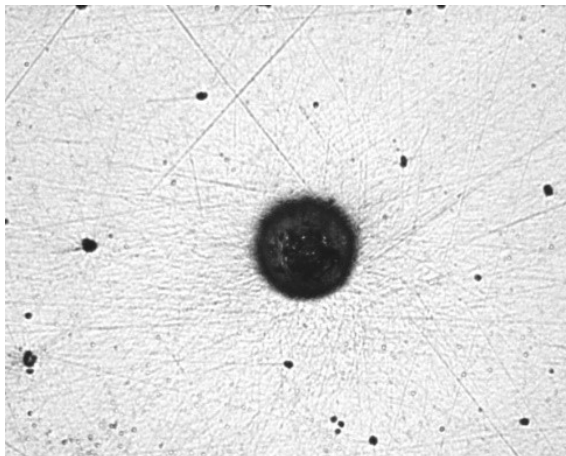
Figura 34: Fotomicrografias “cilindro”, prata esterlina (925) não atacada, magnificação de 100 vezes.



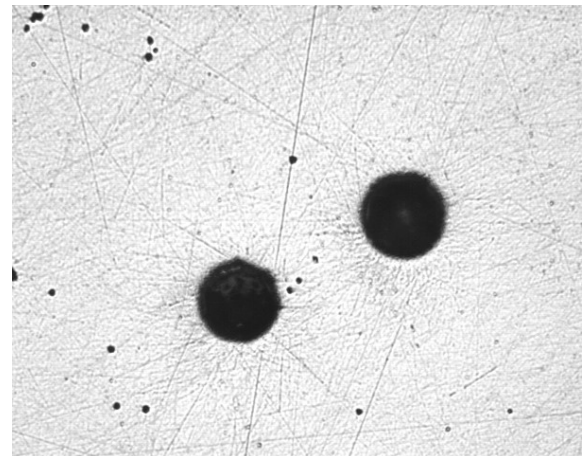
2 Bolhas de $122 \times 126 \mu m$



Bolha de $122 \times 119 \mu m$



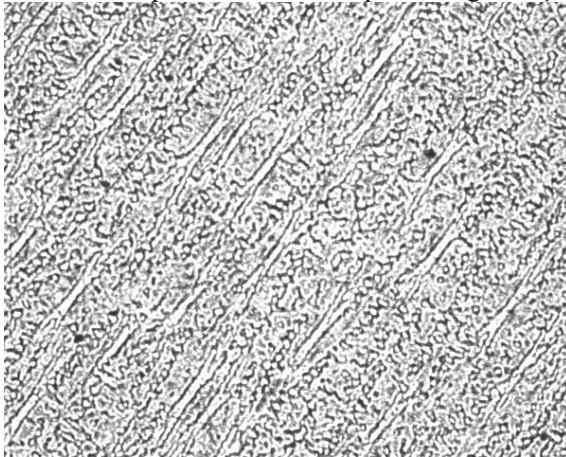
Bolha de $103 \times 99 \mu m$



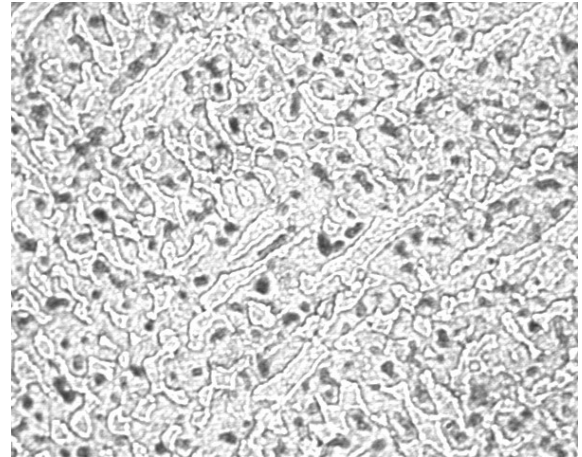
2 Bolhas de 84×85 e $79 \times 79 \mu m$

Fonte: Próprio autor (2024).

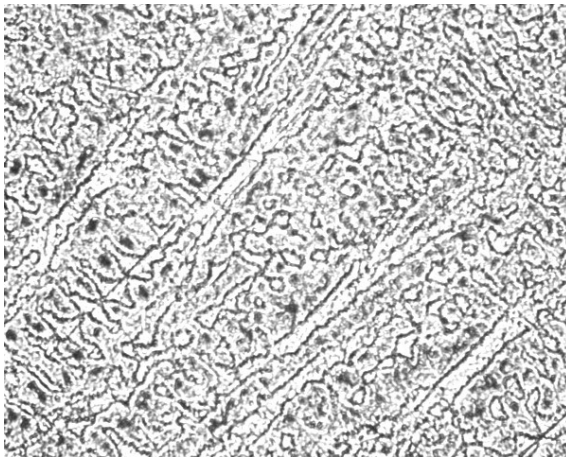
Figura 35: Fotomicrografias “cilindro”, prata esterlina (925) atacada com solução de ácido sulfúrico e dicromato de potássio em meio aquoso, magnificação de 100, 200 e 500 vezes.



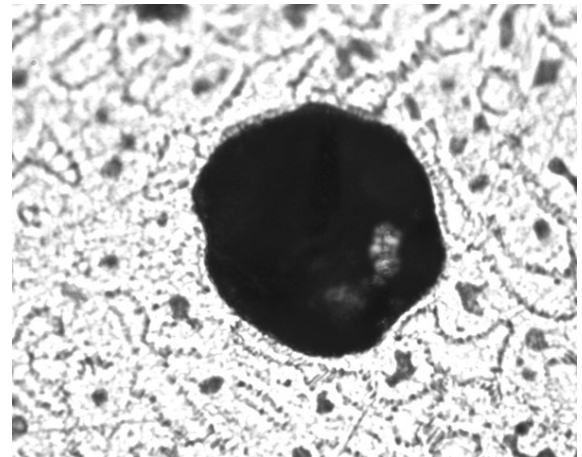
100 vezes



200 vezes



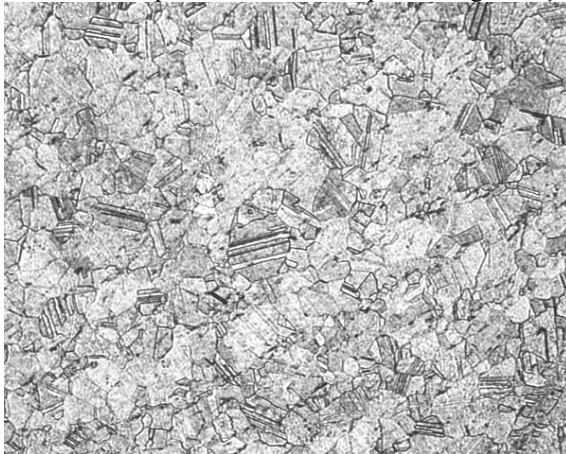
200 vezes



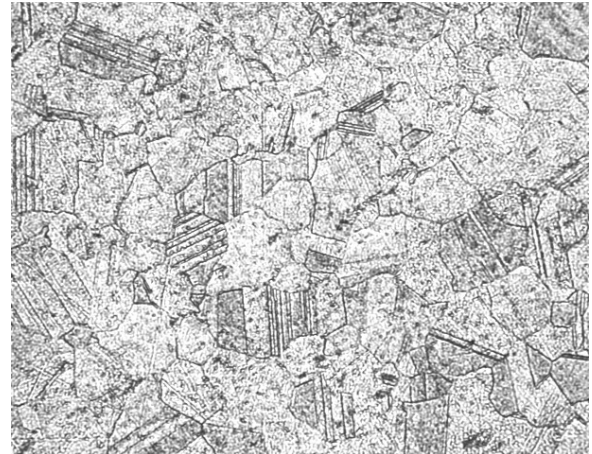
500 vezes

Fonte: Próprio autor (2024).

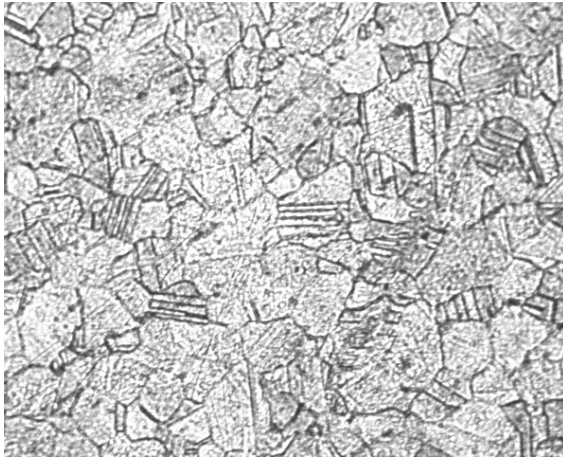
Figura 36: Fotomicrografias “disco recozido”, prata esterlina (925) atacada com solução de ácido sulfúrico e dicromato de potássio em meio aquoso, magnificação de 100, 200 e 500 vezes.



(a) 100 vezes



(b) 200 vezes



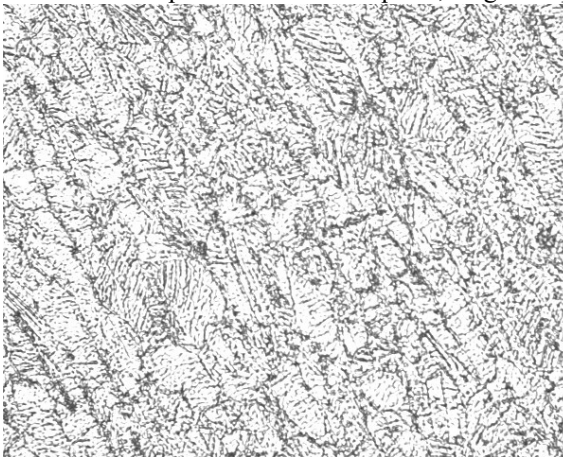
(c) 200 vezes



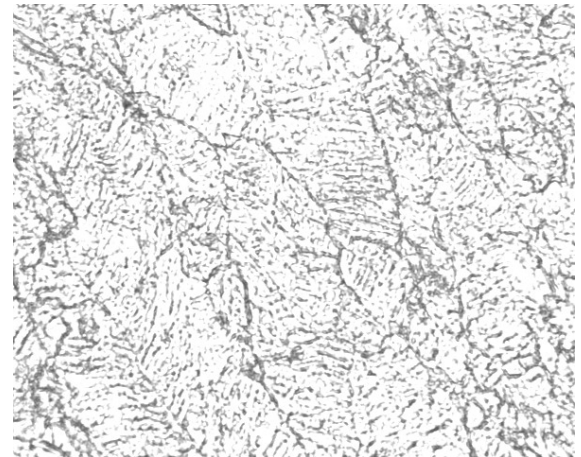
(d) 500 vezes

Fonte: Próprio autor (2024).

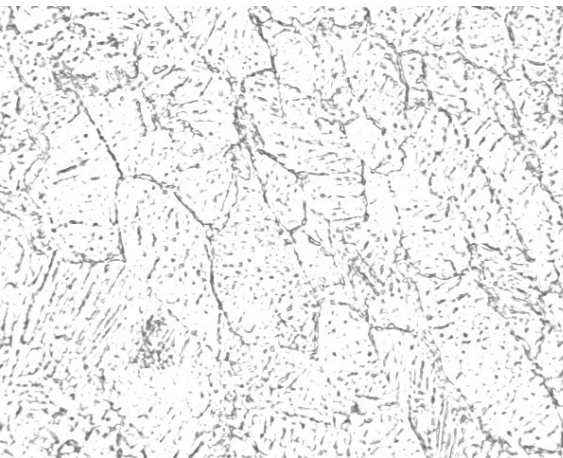
Figura 37: Fotomicrografias “disco não recozido”, prata esterlina (925) atacada com solução de ácido sulfúrico e dicromato de potássio em meio aquoso, magnificações de 200 e 500 vezes.



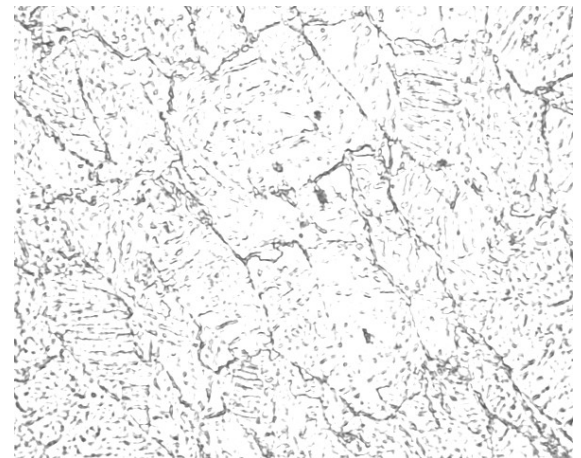
(a) 200 vezes



(b) 500 vezes



(c) 500 vezes



(d) 500 vezes

Fonte: Próprio autor (2024).

Quanto a dureza, os valores médios da prata esterlina (925) para o disco recozido se apresentaram abaixo da faixa recomendada para as escalas HR15T (67 a 93) ou HR30T (29 a 82) de acordo com a norma *ISO 6508-1 Metallic materials - Rockwell hardness test - Part 1- Test method* e foi preciso executar a escala Vickers.

O Quadro 16 mostra um valor de dureza da amostra “cilindro” maior do que a do “disco recozido”, compatível com o encruamento decorrente da usinagem e do corte por eletroerosão. E a dureza da amostra “disco recozido” esteve abaixo do “disco não recozido”, comprovando que o tratamento térmico foi efetivo. A ductilidade perdida durante as etapas de conformação mecânica foi recuperada com o recozimento dos discos (LEITÃO, 1996).

Quadro 16: Medição de dureza Vickers para corpos de prova de prata esterlina (925).

Amostra		Dureza Medida HV1,0							
		Posição Radial					Estatística		
		C	1/4r	1/2r	3/4r	B	Min.	Méd.	Máx.
Disco recozido	1	62	59	62	61	58	58	63	66
	2	64	63	64	66	64			
	3	64	63	62	62	66			
Disco não recozido	1	136	143	140	135	125	125	136	143
	2	137	135	136	136	136			
	3	137	137	136	133	133			
Cilindro		97	103	95	97	92	92	97	103

Fonte: próprio autor (2024).

Para o cuproníquel de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$) as fotomicrografias mostraram grãos de dimensões aproximadamente equiaxiais de aspecto poligonal com contornos de grão nítidos e geométricos, apresentando maclas ou contornos de subgrão retos, confirmando o estado recozido. Há presença de pequena proporção de inclusões não metálicas ou partículas de segunda fase (Figura 38).

Figura 38: Fotomicrografias disco de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$) atacado com solução de cloreto férrico, ácido nítrico e ácido clorídrico em meio aquoso, magnificações de 200 e 1000 vezes.



(a) 200 vezes



(b) 200 vezes



(c) 1000 vezes



(d) 1000 vezes



(e) 1000 vezes



(f) 1000 vezes

Fonte: Próprio autor (2024).

Os valores de dureza do cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$) estiveram em torno de 130 HV, acima do que preconiza a literatura técnica pesquisada que é de 70 a 100 HV, com valor típico de 80 HV para o metal recozido (COPPER.ORG, 2024).

A dureza ligeiramente aumentada do cuproníquel (Cu₇₅Ni₂₅) pode ser vista no Quadro 17 e é sugestiva de que a presença de pequena percentagem de elementos de liga, indesejados para cunhagem.

As imagens metalográficas parecem mostrar pequena proporção de partículas de segunda fase que talvez tenham precipitado durante o recozimento. As análises químicas revelam pequenos teores de manganês, ferro e estanho que podem endurecer esta liga mesmo em pequenas quantidades. Essa dureza mais elevada pode refletir em um aumento da força de cunhagem, pois materiais nessa condição são mais difíceis deformar (ALTAN et al, 1986).

Quadro 17: Medição de dureza Vickers para corpos de prova de cuproníquel (Cu₇₅Ni₂₅).

Disco	Dureza (HV)			
	Medições			Média
1	133,72	137,36	135,79	134,44
2	136,32	136,84	134,23	
3	133,22	130,72	131,72	

Fonte: Próprio autor (2024).

4.4 Análise da geometria

No caso da prata esterlina (925) os corpos de prova de forma geral uma deformação axial homogênea sem desvios significativos da geometria e, portanto, isotrópica. O corpo de prova C2 mostrou uma forma ligeiramente elíptica após a compressão, conforme Figura 39, e essa aparência é sugestiva de uma distribuição desigual de forças que pode ter se manifestado durante o encruamento do material, influenciado pela presença de defeitos (SCHAEFFER, 2020). O resultado da micrografia corrobora tal afirmação.

Figura 39: Corpos de prova C1 e C2 após a compressão.



Fonte: Próprio autor (2024).

A Figura 40 apresenta a estratificação dos corpos de prova P1 e P2 após a compressão em 40%. As camadas foram desmontadas e pôde ser visto uma deformação radial uniforme onde as fatias em contato com as placas de compressão apresentaram uma expansão menor do que aquelas localizadas mais ao centro, indicando um ligeiro embarrilamento (ASTM E9, 2000).

Apenas a camada intermediária de P2 apresentou um desvio desse desempenho que pode ser atribuído tanto a desestabilização das placas de compressão como a baixa rugosidade dos discos não recozidos, levando ao escorregamento da camada e a uma reação anisotrópica (MERKLEIN, 2009).

Figura 40: Estratificação dos corpos de prova P1 e P2 após a compressão.



Fonte – próprio autor (2024).

Observou-se que os corpos de prova P3 e P4 se mantiveram unidos mesmo após serem retirados do ferramental e manipulados. Essa atuação pode ser decorrente da camada de óxido proveniente do recozimento que recobria os discos e de um efeito de adesividade. As pilhas se mantiveram com uma forma cilíndrica bastante homogênea, com pouco embarrilamento, sugerindo que a adesividade tenha evitado o movimento relativo entre as camadas (GRAF, 2019). Apenas a pilha P3 apresentou certo deslizamento e a provável causa é que a deformação das placas de compressão provocou alguma instabilidade a pilha fazendo com que ela se deslocasse logo no início da deformação (Figura 41).

Figura 41: Pilhas P3 e P4 após a compressão.



Fonte – próprio autor (2024).

No caso do cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$) os corpos de prova apresentaram uma geometria quase cilíndrica ao final da compressão, indicando a manutenção da integridade das amostras após o esforço de deformação. Apenas para o corpo de prova B foi verificada a penetração de alguns discos em contato com o ferramental da prensa em discos adjacentes, conforme indicado na Figura 42.

Figura 42: Corpo de prova de prova B com penetração em disco adjacente.



Fonte – próprio autor (2024).

Para contornar o efeito da baixa rugosidade superficial, característica da matéria prima utilizada na fabricação de moedas, e assegurar a prevalência das condições de aderência na interface de contato entre os discos (ALVES et al., 2011; BERNRATH, 2006), foi aplicada uma baixa velocidade de deslocamento do cabeçote, ajustada de 49,8 para 10,2 milímetros por minuto. Assim, os deslizamentos entre camadas foram mantidos controlados. A lubrificação da superfície de contato com a ferramenta e outros fatores como a concentricidade da pilha, a baixa proporção entre a altura e o diâmetro e a seleção de peças com os melhores acabamentos aparentam ter atuado positivamente nesse sentido (Figura 43).

Figura 43: Pilha de discos de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$) antes e após a compressão.



Fonte – Próprio autor (2024).

4.5 Análise das curvas de escoamento

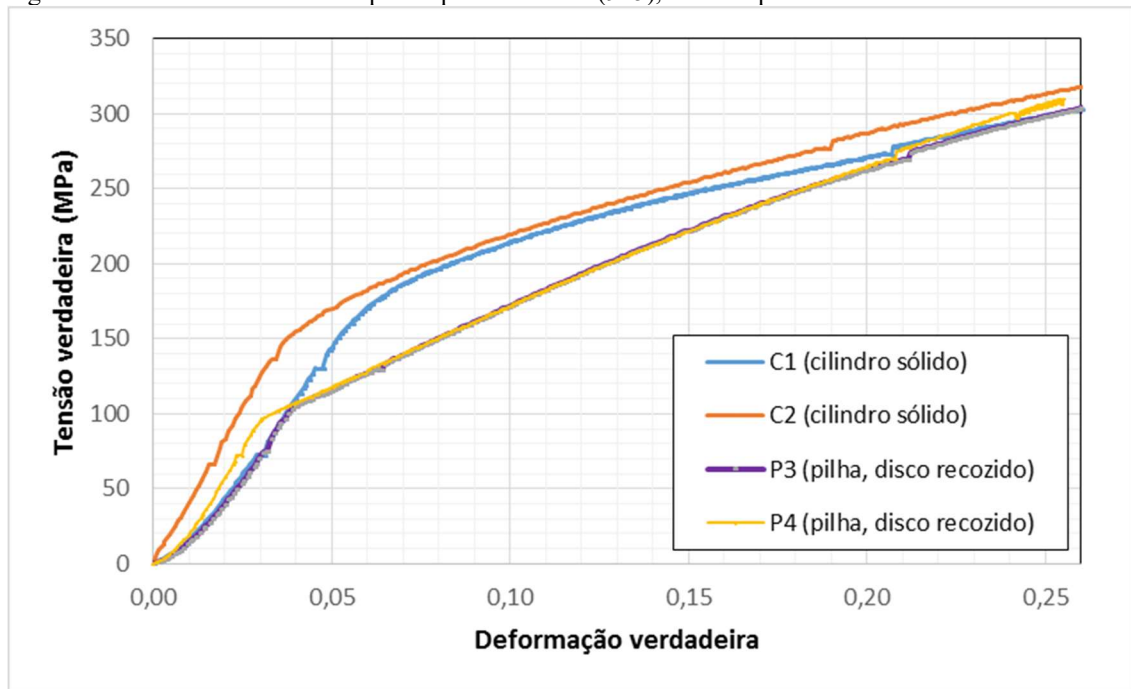
Analisando a prata esterlina (925), e ao considerar como aceitável um grau máximo de desvio de 10% (BENRATH, 2006), a Figura 44 mostra que os perfis das curvas para os corpos de prova sólidos C1 e C2 foram correspondentes entre si na fase plástica, na faixa de deformação verdadeira $0,06 < \varepsilon < 0,16$, com desvio de C2 a partir de $\varepsilon = 0,16$. O desvio de C2 é sugestivo de alguma anisotropia do material ou de uma desigualdade na lubrificação (ALTAN et al., 1983) decorrente da deformação da placa de compressão ou mesmo de alguma instabilidade da montagem do ferramental. Tal afirmação é corroborada pela análise da geometria de C2 que se apresentou elíptica, indicando desvio da curva de escoamento.

Os perfis das pilhas P3 e P4 se mostraram bastante coincidentes, exibindo uma pequena diferença de comportamento logo no começo, indicativo da existência de folgas remanescentes entre camadas e não totalmente eliminadas pela pré carga manual. Essa circunstância também é manifestada para os cilindros C1 e C2, provavelmente resultante da acomodação de folgas da máquina pois inexistem camadas.

Confrontando os perfis de C1 e C2 com os corpos de prova multicamadas P3 e P4 verifica-se um distanciamento inicial significativo que se reduz ao longo da compressão. Essa conduta é sugestiva de diferenças de microestrutura entre os materiais pelo fato de eles não terem sido maquinados de uma mesma matriz.

Além disso, o corpo de prova cilíndrico apresentou uma dureza maior do que a dos discos recozidos que compuseram as pilhas, fazendo com que fossem mais difíceis de deformar plasticamente (GRAF, 2019). A diferença de perfis torna-se menos pronunciada a medida que a deformação aumenta e o nível de encruamento também aumenta para P3 e P4, aproximando-os da tensão verdadeira de C1 e C2.

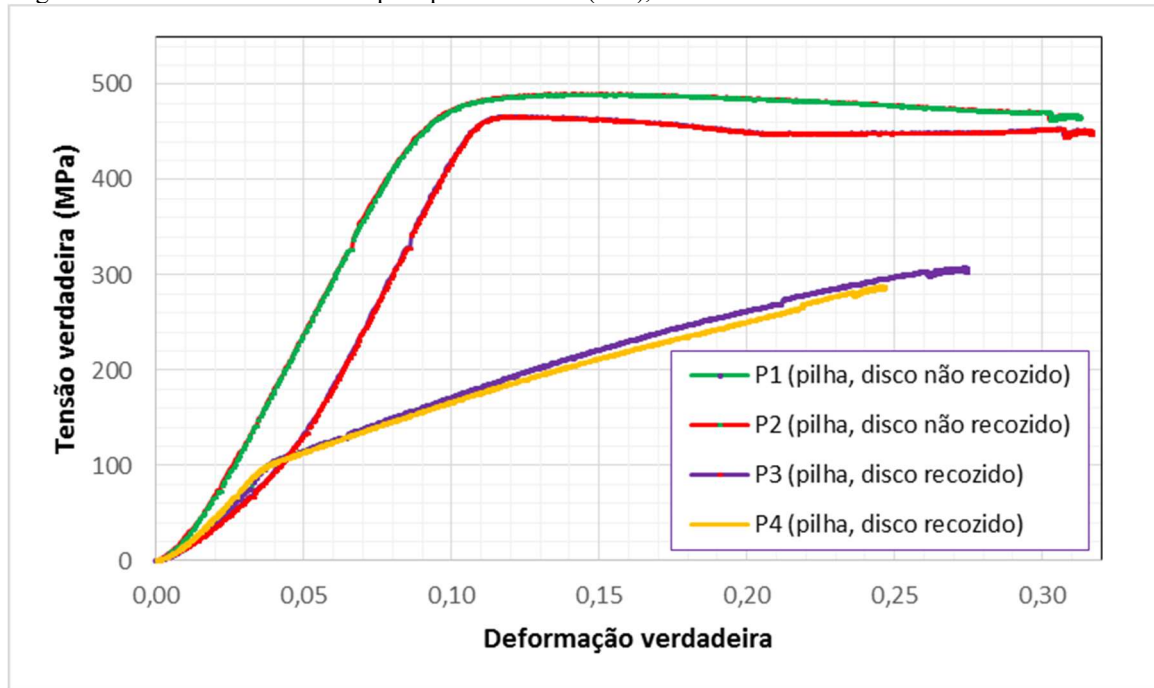
Figura 44: Curvas de escoamento para a prata esterlina (925), cilindro padrão e discos recozidos.



Fonte – Próprio autor (2024).

A Figura 45 confirma a diferença da tensão de escoamento entre o estado não recozido das pilhas P1 e P2 e o estado recozido das pilhas P3 e P4. A reação diferenciada de P1 e P2, com uma redução da tensão σ a partir da deformação $\epsilon = 0,11$, é sugestivo da movimentação de camadas e da manifestação de instabilidades. Tal efeito parece ser mais pronunciado para P2, que apresentou uma anisotropia na camada intermediária, conforme indicado na Figura 40. Os discos não recozidos que compuseram as pilhas detinham uma baixa rugosidade, ficando sujeitos ao escorregamento de camadas e às inconstâncias a medida que a deformação aumenta.

Figura 45: Curvas de escoamento para prata esterlina (925), discos não recozidos e recozidos.



Fonte – Próprio autor (2024).

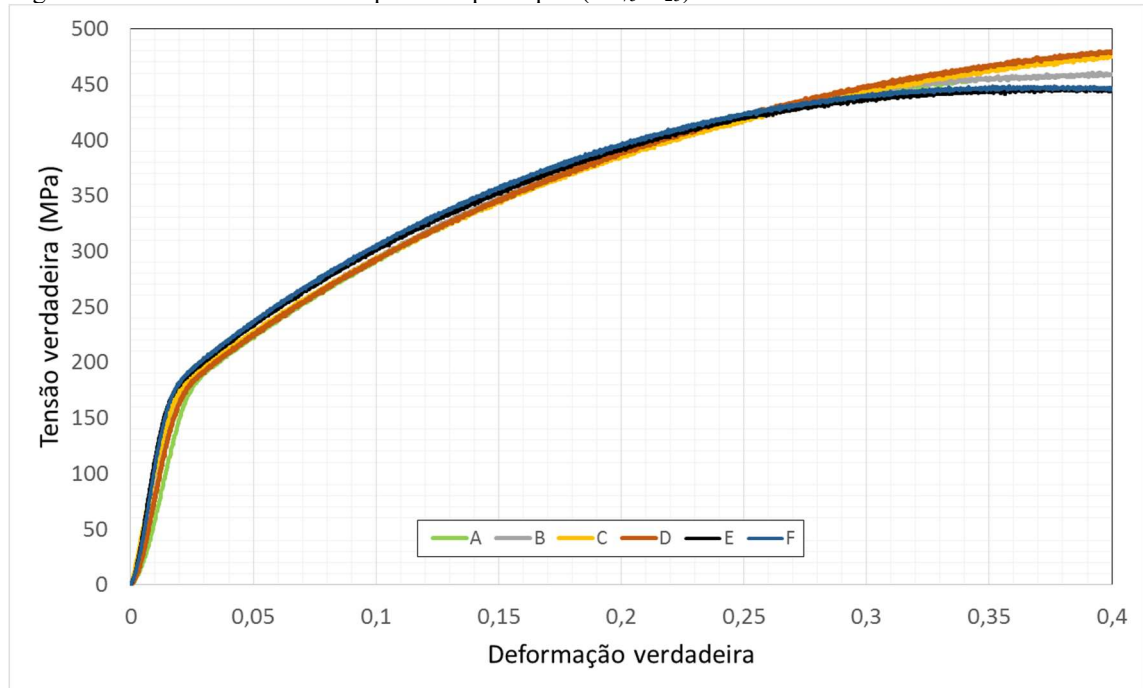
No caso do cuproníquel a Figura 46 mostra que, após a prensa MTS ter iniciado o seu trabalho, os seis corpos de prova também responderam com uma relação quase linear de variação da carga com a compressão. Esse desempenho corresponde a deformação elástica do material até o ponto dado pela inflexão, ou seja, de possibilidade de retorno à sua condição anterior se efetuada a retirada do carregamento.

Continuando com a compressão, começa a ocorrer a deformação permanente, de caráter plástico e o perfil das curvas sugere uma boa correlação entre os ensaios de compressão realizados com discos empilhados de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$) com a literatura.

Todo esse contexto demonstra que ainda que se considere a eventual manifestação de condições diferenciadas na organização dos conjuntos, da lubrificação dos cabeçotes da prensa realizados sem desengraxe prévio ou da baixa rugosidade dos discos, que poderiam importar no deslizamento e instabilidade das camadas (ALVES et al., 2011; BERNRATH, 2006), não se constatou alteração no perfil geral das curvas de escoamento.

A congruência geral de perfis, apresentado na Figura 46 pode ser assumido como o resultado das soluções de contorno aplicadas tais como a adoção de proporções L_0/D_0 e velocidades de deformação mais reduzidas.

Figura 46: Curvas de escoamento para o cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$).



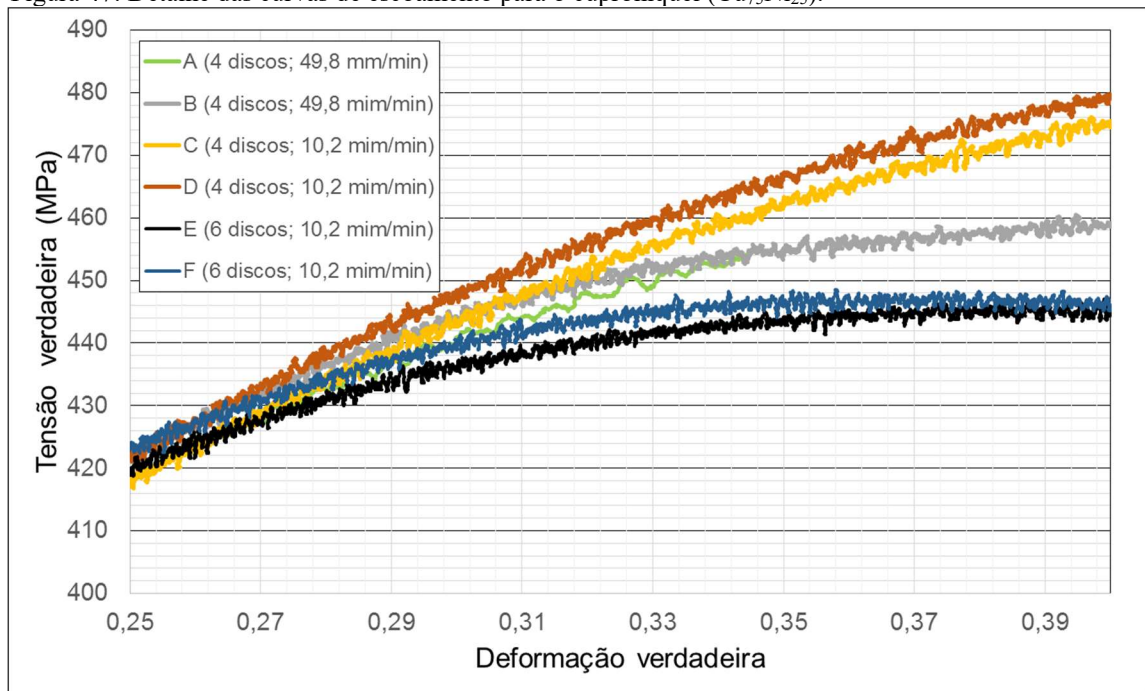
Fonte – Próprio autor (2024).

Analisando as curvas A e B da Figura 47 verifica-se que o padrão de deformação plástica se confirmou e as replicatas praticamente se sobrepuseram, denotando a existência de condições homogêneas entre as amostras. O perfil um pouco mais baixo pode ser decorrente da manifestação de condições de instabilidade da pilha ao final da compressão e em função da aplicação da velocidade de 49,8 mm/min, a mais proeminente do plano experimental.

As curvas C-D, por sua vez, apresentaram um pequeno desvio 5% entre elas que pode remeter a uma heterogeneidade pouco significativa entre as amostras. O perfil mais alto é indicativo de que não houve a manifestação de condições de instabilidade da pilha ao final da compressão, possivelmente como resultado da redução da velocidade do ferramental de 49,8 para 10,2 mm/min com a relação L_0/D_0 mantida inalterada.

Por fim, as curvas E-F também apresentaram um pequeno desvio, mas chama a atenção o perfil mais baixo com um trecho onde a tensão se manteve praticamente constante com a deformação e iniciando uma queda a partir de 0,38. Essa conduta é sugestiva da razão inversa da força com a relação L_0/D_0 relatada por Alves et al. (2011), uma vez que a mesma sofreu um aumento de 0,5 para 0,7. Já a queda do valor de tensão pode ser resultante da movimentação de camadas e de uma instabilidade na pilha.

Figura 47: Detalhe das curvas de escoamento para o cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$).



Fonte – Próprio autor (2024).

CONCLUSÃO

O ensaio de compressão em discos empilhados é aplicável para a modelagem da curva de escoamento quando se requer a determinação de informações do processo de forjamento e há indisponibilidade da matéria prima na geometria necessária a produção de corpos de prova sólidos.

As curvas delineadas com o uso de discos empilhados de prata esterlina (925) recozida apresentaram um desvio da ordem de 10% entre si, enquanto que as de cuproníquel ($\text{Cu}_{75}\text{Ni}_{25}$), de 5%, confirmando suas respectivas compatibilidades com a literatura congênere.

Por outro lado, apesar da razoável concordância de resultados das amostras de cilindros sólidos entre si - a exceção da faixa de deformação verdadeira $0,06 < \varepsilon < 0,16$ - o seu distanciamento para os discos empilhados não recozidos impossibilita uma correlação.

Os discos de prata esterlina (925) não recozida exibiram trechos com índices de desvio entre si acima dos 10%. Apesar disso, as curvas foram capazes de ilustrar a diferença em termos do tratamento térmico entre os dois grupos de amostras.

O uso de materiais de diferentes características mecânicas permitiu identificar as seguintes influências ao comportamento das curvas:

- A preparação dos corpos de prova deve obedecer ao uso de uma mesma matriz e processo de fabricação, tanto para o corpo de prova sólido como para as pilhas, para que se replique parâmetros de microestrutura, dureza e rugosidade;
- A rugosidade entre camadas se apresentou como fator preponderante de controle e devem ser evitados valores muito baixos desse parâmetro, pois favorecem o escorregamento de camadas e a instabilidade das pilhas principalmente a medida em que a deformação aumenta;
- O pré carregamento tanto das amostras sólidas como das pilhas é fundamental para evitar desvios no início das curvas, e essa condição torna-se ainda mais relevante dependendo da condição do equipamento e da superfície dos discos.
- A montagem do ensaio não deve negligenciar cuidados como as condições de interface das placas de compressão e dos corpos de prova, bem como a concentricidade da pilha.
- O uso de uma baixa proporção entre a altura e o diâmetro das pilhas bem como de uma velocidade comparativamente menor do cabeçote influenciaram positivamente a modelagem das curvas.

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Verificar se o uso do pino passante em discos com baixa rugosidade superficial representa uma solução de contorno eficiente para a estabilização da pilha;
- Efetuar a validação dos resultados experimentais pelo método dos elementos finitos (FEM).

REFERÊNCIAS

ABOUTALEBI, Farhad Haji; FARZIN, Mahmoud; POURSIINA, Mehrdad. Numerical simulation and experimental validation of a ductile damage model for DIN 1623 St14 steel. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 53, n. 1-4, p. 157-165, 24 jul. 2010. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-010-2831-z>.

ALEXANDRINO, P.; LEITÃO, P.J.; ALVES, L. M.; MARTINS, P. A. F. Numerical and experimental analysis of coin minting. **Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials**, [S.L.], v. 233, n. 5, p. 842-849, 15 maio 2017. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/1464420717709833>.

ALEXANDRINO, P.; LEITÃO, P.J.; ALVES, L. M.; MARTINS, P. A. F. **Finite element design procedure for correcting the coining die profiles**. *Manufacturing Review*, [S.L.], v. 5, p. 3, 2018. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/mfreview/2018007>.

ALTAN, T.; IK OH, S.; GEGEL, H. L., **Metal Forming Fundamentals and Applications**. 3a ed. USA: Ed. Carnes Publications, 1983.

ALVES, L. M.; NIELSEN, C. V.; MARTINS, P. A. F. Revisiting the Fundamentals and Capabilities of the Stack Compression Test. **Experimental Mechanics**, [S.L.], v. 51, n. 9, p. 1565-1572, 10 mar. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11340-011-9480-5>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E9: Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature**. Pensilvânia: ASTM Standards And Engineering Digital Library, 2000. 9p.

BERNRATH, G.; VOLLES, R.; KOPP, R. Multi-Layer Compression Tests under Hot Forming Conditions. **Steel Research International**, [S.L.], v. 77, n. 4, p. 265-270, abr. 2006. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/srin.200606384>.

BOCHAROV, Y.; KOBAYASHI, S.; THOMSEN, E. G. The Mechanics of the Coining Process. **Journal Of Engineering For Industry**, [S.L.], v. 84, n. 4, p. 491-501, 1 nov. 1962. ASME International. <http://dx.doi.org/10.1115/1.3667550>.

BOLANHO, P. D. **Manufatura Mecânica: Conformação dos Metais**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017, 256p.

BRESCIANI FILHO, E.; NERY, F. A. C.; BOTTON, S. T. **Conformação Pástica de Metais**. Campinas: Editora UNICAMP; 1985, v.1, p.7.

BUFFA, G.; FRATINI, L.; MICARI, F. The Relevance Of The Preform Design In Coining Processes Of Cupronickel Alloy. **Aip Conference Proceedings**, [S.L.], v. 908, p. 1005-1010, 2007. AIP. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2740942>.

CHO, D.; KIM, J.; KWON, H. C.; KIM, K. Strain Hardening Characteristics of 99.9% Pure Silver at Large Strains. **International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing**, [S.L.], v. 22, n. 6, p. 1061-1067, 26 mar. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12541-021-00502-4>.

DIETER, G. E. **Metalúrgica Mecânica**. Rio de Janeiro. Editora Guanabara Koogan S.A., 1981.

FARIDMEHR, I.; OSMAN, M. H.; ADNAN, A. B.; NEJAD, A. F.; HODJATI, R.; AZIMI, M. A. Correlation between Engineering Stress-Strain and True Stress-Strain Curve. **American Journal Of Civil Engineering And Architecture**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 53-59, 2 mar. 2014. Science and Education Publishing Co., Ltd.. <http://dx.doi.org/10.12691/ajcea-2-1-6>.

FH. Disponível em: < <https://www.fuhongforge.com/products/c35-steel/>>. Acesso em: 26 de fev. 2024.

Gnee Steel. **Product specification**. Disponível em: <https://www.gneesteel.com/products/cold-rolled-steel/st14-cold-rolled-steel-coil.html>. Acesso em: 23 de jun. 2024.

GRAF, M; HENSELER, T; ULLMANN, M; KAWALLA, R; PRAHL, U; AWISZUS, B. Study on determination of flow behaviour of 6060-aluminium and AZ31-magnesium thin sheet by means of stacked compression test. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, Chemnitz, v. 480, p. 012023, 5 mar. 2019. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/480/1/012023>.

GUO K. **Development of design tools for coining process using FEM**. 2009. 226f. Dissertação (PhD) – Carleton University, Ontario, Canada.

HELMAN, Horacio; CETLIN, Paulo Roberto. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Fundação Christiano Ottoni, 1993.

IKE, H.; PLANCAK, M. Coining process as a means of controlling surface microgeometry. **Journal Of Materials Processing Technology**, [S.L.], v. 80-81, p. 101-107, ago. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136\(98\)00101-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136(98)00101-0).

KNOLL, P. LIMA D.; SCHAEFFER, L. **Estudo descreve a obtenção da curva de escoamento do Alumínio por ensaio de compressão**. Revista Corte e Conformação de Metais, n.28, p.74, 2007.

KIRAN, M.C. Shaw, A. **Coining**. CIRP 32 (1983) 151–154.

LANGE, K. Modern metal forming technology for industrial production. **Journal Of Materials Processing Technology**, [S.L.], v. 71, n. 1, p. 2-13, nov. 1997. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136\(97\)00113-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136(97)00113-1).

LEITÃO, P.J.; TEIXEIRA, A.C.; RODRIGUES, J.M.C.; MARTINS, P.A.F. Development of an industrial process for minting a new type of bimetallic coin. **Journal Of Materials Processing Technology**, [S.L.], v. 70, n. 1-3, p. 178-184, out. 1997. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136\(97\)02914-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136(97)02914-2).

MERKLEIN, M.; KUPPERT, A. A method for the layer compression test considering the anisotropic material behavior. **International Journal Of Material Forming**, Springer, v. 2, n. 1, p. 483-486, ago. 2009. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-009-0592-8>.

MEYERS, M. A.; CHAWALA, K. K. **Princípios de Metalúrgica Mecânica**. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA, 1982.

Meta Fab Incorporated: **Get to Know Metal Fabrication – Quick History**. Disponível em: <<http://www.https://www.metafab.com/history-of-metal-fabrication/>>. Acesso em: 26 de fev. 2024.

PAWELSKI, O. **Über das Stauchen von Hohlzylindern und seine Eignung zur Bestimmung der Formänderungsfestigkeit dünner Bleche** Archiv für das Eisenhüttenwesen. V. 38 p. 437–442. 1967.

PRAGANA, J. P.; ROSENTHAL, S.; ALEXANDRINO, P.; ARAUJO, A.; BRAGANÇA, I. M.; SILVA, C. M.; LEITÃO, P. J.; TEKKAYA, A. E.; MARTINS, P. A. Coin minting by additive manufacturing and forming. **Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, [S.L.], v. 235, n. 5, p. 819-828, 17 nov. 2020. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0954405420971128>.

REDSTONE MANUFACTURING. Disponível em:

<<https://redstonemanufacturing.com/st37-equivalent-materials-metal-specifications/>>. Acesso em: 06 de mai. 2024.

REISS, W.; PÖHLANDT, K.. THE RASTEGAEV UPSET TEST-A METHOD TO COMPRESS LARGE MATERIAL VOLUMES HOMOGENEOUSLY. *Experimental Techniques*, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 20-24, jan. 1986. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1747-1567.1986.tb01367.x>.

SCHAEFFER L. **Forjamento: Introdução ao Processo**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2006.

SCHAEFFER L. **Forjamento: Tecnologia do Processo**. Porto Alegre: Gráfica da UFRGS, 2020.

SCHULER, L. **Metal Forming Handbook**. 4th ed. Goppingen, Germany. 1998.

SIEBEL, E.; POMP, A. **Die Ermittlung der Formänderungsfestigkeit von Metallen durch den Stauchversuch**. Verlag Stahleisen, 1927.

United State Mint. **Coin Production**. Disponível em:

<https://www.usmint.gov/learn/production-process/coin-production>. Acesso em: 27 de fev. 2024.

Vigamet. **51CrV4 / 1.8159, 58CrV4 / 1.8161, 59CrV4 / 1.2242 - specification and application**. Disponível em: <https://virgamet.com/strips-coils-51crv4-50crv4-58crv4-59crv4-50cv4-51cv4-spring-steel>. Acesso em: 23 de jun. 2024.

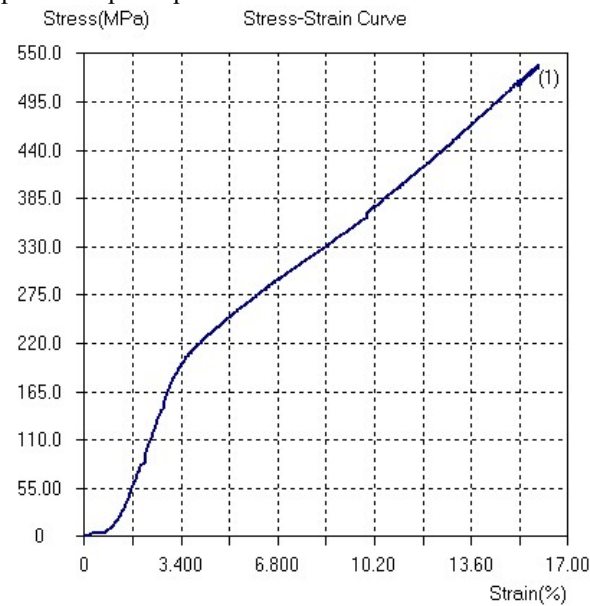
XU, J.; CHEN, X.; ZHONG, W.; WANG, F.; ZHANG, X. **An improved material point method for coining simulation**. *International Journal Of Mechanical Sciences*, [S.L.], v. 196, p. 106258, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.106258>.

ZHONG, W.; LIU, Y.; HU., Y.; LI, SHENGQIANG; LAI, M. Research on the mechanism of flash line defect in coining. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [S.L.], v. 63, n. 9-12, p. 939-953, 15 fev. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-3952-3>.

APÊNDICE

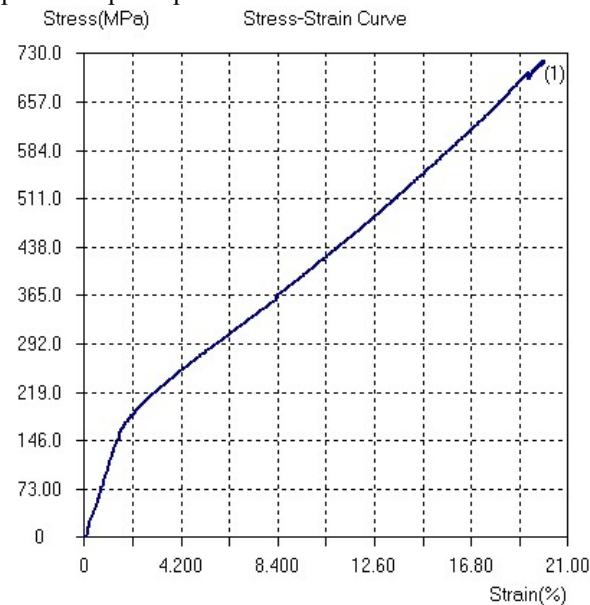
Apêndice A – Curvas tensão e deformação de engenharia para os corpos de prova de prata esterlina (925).

Figura A.1: Curva tensão e deformação de engenharia para o corpo de prova C1.



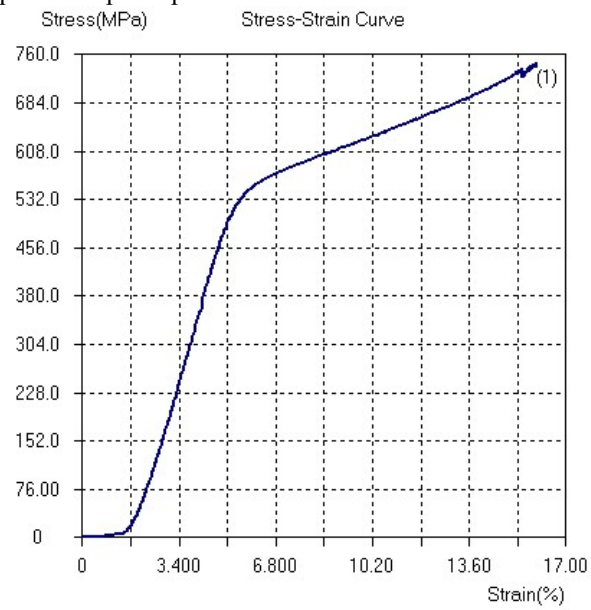
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura A.2: Curva tensão e deformação de engenharia para o corpo de prova C2.



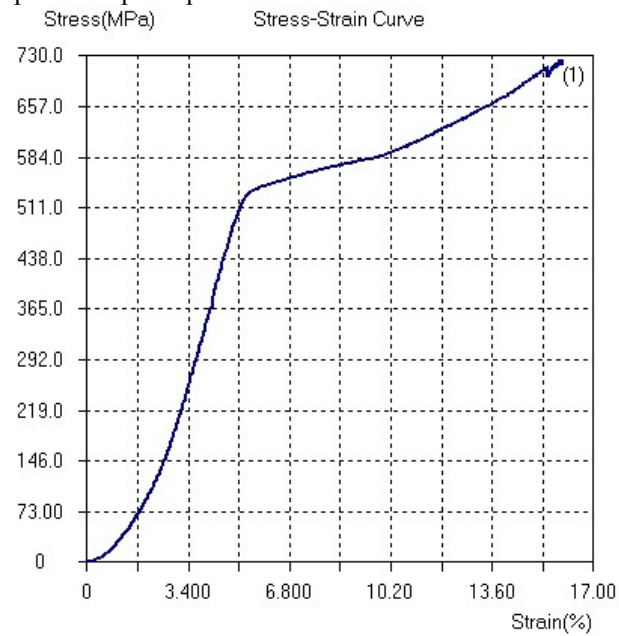
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura A.3: Curva tensão e deformação de engenharia para o corpo de prova P1.



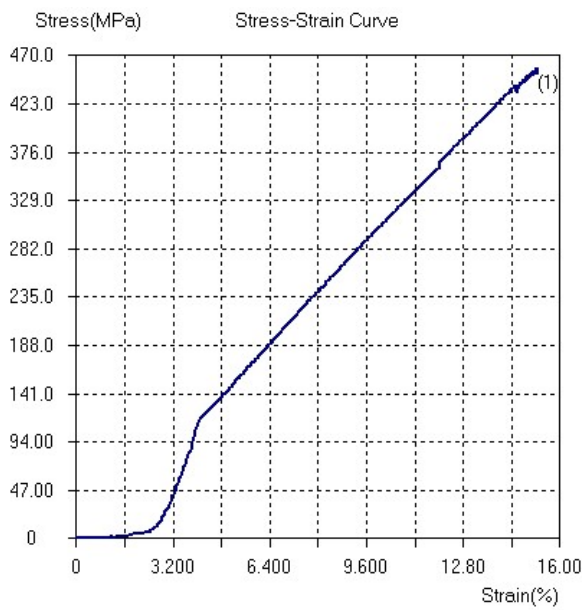
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura A.4: Curva tensão e deformação de engenharia para o corpo de prova P2.



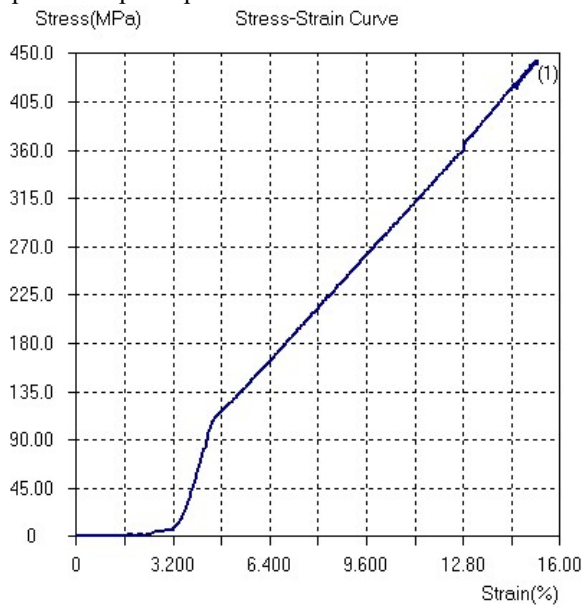
Fonte: Próprio autor (2024).

Figura A.5: Curva tensão e deformação de engenharia para o corpo de prova P3.



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura A.6: Curva tensão e deformação de engenharia para o corpo de prova P4.



Fonte: Próprio autor (2024).

Apêndice B –Curvas de tensão e deformação verdadeira para os corpos de prova de cuproníquel (Cu₇₅Ni₂₅).

Figura B.1: Medições de tensão e deformação de verdadeira para os corpos de prova A - F (trecho).

A		B		C		D		E		F	
Strain	Stress	Strain	Stress	Strain	Stress	Strain	Stress	Strain	Stress	Strain	Stress
0,00022	0,00661	8E-05	0,00414	0,0001	0,00399	8,7E-05	0,00144	0,00011	0,33257	6,6E-05	0,44365
0,00043	0,21024	6E-05	0,02072	0,0001	0,68365	0,0003	0,0567	0,00013	0,36836	0,00012	0,60559
0,00059	0,55125	4,6E-05	0,26177	0,00042	0,49174	0,00032	0,35206	0,00018	0,72433	0,00012	0,65091
0,0006	0,9131	7,7E-06	0,54484	0,00042	0,57036	0,00042	0,50805	0,00017	0,79914	0,0002	0,66893
0,00085	0,9248	0,00025	0,58877	0,00022	0,9386	0,00031	0,4995	0,00014	0,25333	0,00011	0,8872
0,00087	1,23749	0,00023	0,74855	0,00037	1,21277	0,00045	0,8275	0,00012	0,60187	0,00012	0,52578
0,00108	1,76498	0,0004	1,13164	0,00056	1,25883	0,00032	0,95166	0,00011	0,76012	8,3E-06	0,28834
0,00123	2,0253	0,00045	1,05323	0,00037	1,48801	0,00036	0,51161	0,00027	0,69279	0,00016	0,64285
0,00128	2,315	0,00048	1,03685	0,00054	1,72437	0,00059	0,78079	0,00014	0,74735	0,00016	0,62695
0,00152	2,72336	0,00047	1,46234	0,00061	1,46565	0,0007	1,14698	0,00017	0,88424	3,8E-05	0,52533
0,00152	3,18325	0,00062	1,44692	0,00059	1,47222	0,00048	1,22343	0,00021	1,03872	4,9E-05	0,5491
0,0015	3,42659	0,00039	1,29004	0,00065	2,00952	0,00047	1,18554	0,00027	0,94936	0,00029	0,7029
0,00152	3,86425	0,00043	1,1879	0,00066	1,97488	0,00054	1,34632	0,00031	1,45785	0,00025	0,66455
0,00164	4,56041	0,00054	1,30193	0,00065	1,9007	0,00071	1,48146	0,00024	1,83971	0,00025	0,89497
0,00187	4,75236	0,00055	1,10023	0,00056	1,94435	0,00077	1,42861	0,00036	1,61095	0,0002	1,6387
0,00197	5,26537	0,00045	1,18417	0,00063	2,24509	0,00065	1,77009	0,00019	1,71943	0,00018	1,39707
0,00226	5,97211	0,00053	1,72531	0,00058	2,15248	0,00056	2,30881	0,00036	1,98996	0,00038	1,32025
0,00216	6,66686	0,00062	1,47997	0,00053	2,29463	0,00092	2,00599	0,00045	2,22984	0,00043	1,51305
0,00244	7,2103	0,00076	1,3405	0,00083	2,89744	0,0005	2,12617	0,00049	2,14632	0,00029	1,71451
0,00274	7,95841	0,0006	1,58168	0,00091	2,76598	0,00062	2,33683	0,00043	2,40778	0,00037	1,81503
0,00273	8,69621	0,00048	1,79887	0,00079	2,81197	0,00069	2,5142	0,00051	2,51932	0,00028	1,76301
0,00306	9,14863	0,0005	1,71567	0,00081	3,13782	0,0008	2,42512	0,00049	1,95621	0,00022	1,93115
0,00316	9,61521	0,00064	1,71724	0,00064	3,34742	0,00093	2,73622	0,00041	2,17673	0,00031	1,67008
0,00313	10,4819	0,00059	1,99421	0,00065	3,40361	0,0009	2,9425	0,00048	2,46187	0,00034	1,5035
0,00336	11,0448	0,00072	1,81712	0,00087	3,53418	0,00118	2,55299	0,00041	2,29845	0,00035	1,9616
0,00362	11,4317	0,00063	1,83441	0,00093	3,85565	0,00101	2,76293	0,00056	2,27124	0,00045	2,06477
0,00378	11,9651	0,00065	2,36217	0,00077	3,6835	0,00094	3,16772	0,00064	2,3881	0,00045	2,15359
0,00401	12,6727	0,00089	2,56408	0,00076	3,70734	0,00109	3,09529	0,00052	2,56139	0,00048	2,3606
0,00371	13,0265	0,0009	2,61398	0,00079	4,3851	0,00126	2,94811	0,00057	2,37952	0,0005	2,62742
0,00387	13,6278	0,00092	2,8521	0,00104	4,51022	0,00111	3,01073	0,00072	2,69396	0,00058	2,63044
0,00409	14,3781	0,00078	3,02632	0,0009	4,68147	0,001	3,14669	0,00066	3,21934	0,00046	2,70592
0,004	14,6689	0,00086	2,98619	0,00109	4,98592	0,00116	2,83783	0,00062	2,89552	0,00058	3,39944
0,00415	15,122	0,00104	3,17403	0,00121	5,4051	0,00132	3,02829	0,00059	2,86961	0,00059	3,17129
0,00431	15,817	0,00107	3,80895	0,00106	5,57868	0,00128	3,57942	0,0006	3,08053	0,0006	3,06035
0,00453	16,5249	0,00094	3,70895	0,00128	5,80913	0,00123	3,16278	0,00064	3,16946	0,00059	3,24352
0,00469	17,3013	0,0008	3,71377	0,00117	6,54511	0,00104	3,16233	0,00055	3,07243	0,00062	3,44407
0,00472	18,0569	0,00102	3,84608	0,00116	6,63611	0,00105	3,25097	0,0006	3,28747	0,00057	3,41435
0,00472	19,0313	0,0011	4,11058	0,00123	6,53908	0,00107	3,3262	0,00071	3,38167	0,00065	3,46353
0,00504	19,5489	0,00108	4,17034	0,00104	6,79827	0,00111	3,36849	0,00072	3,00122	0,00075	3,76845
0,00517	20,2135	0,00105	4,33579	0,00129	7,04828	0,00117	3,55469	0,00073	3,26343	0,00067	3,51201
0,00524	21,3318	0,00096	4,68163	0,00133	7,14835	0,00122	3,87783	0,00075	3,71154	0,00076	3,26684

0,00517	20,2135	0,00105	4,33579	0,00129	7,04828	0,00117	3,55469	0,00073	3,26343	0,00067	3,51201
0,00524	21,3318	0,00096	4,68163	0,00133	7,14835	0,00122	3,87783	0,00075	3,71154	0,00076	3,26684
0,00549	22,2336	0,00127	4,50467	0,00131	7,26856	0,00129	3,62189	0,00074	3,77124	0,00093	3,77277
0,00543	23,0424	0,00131	4,32135	0,00129	7,66881	0,00146	3,86405	0,00073	3,86037	0,00074	3,86177
0,00548	23,8421	0,00128	4,8359	0,00127	7,54259	0,0015	4,41937	0,00082	3,94754	0,00073	3,72947
0,0057	24,7697	0,00124	4,97772	0,00145	7,38838	0,00163	4,48944	0,00074	4,21151	0,00069	3,67413
0,00593	25,522	0,00132	4,96096	0,00141	7,92989	0,00162	4,61232	0,00088	4,16901	0,00078	3,75472
0,00612	26,6264	0,00131	5,04923	0,00133	8,21836	0,00157	4,72562	0,0008	4,46843	0,0008	3,65421
0,00629	28,0282	0,00125	5,2713	0,00133	8,28144	0,00145	4,94536	0,00089	5,15317	0,0008	3,61663
0,00636	28,8321	0,00137	5,15807	0,00128	8,46549	0,0015	4,64598	0,00091	4,9678	0,00097	4,28399
0,00637	29,6406	0,0013	5,21644	0,00135	8,74016	0,00154	4,83925	0,00097	4,98932	0,00094	4,24738
0,00655	30,6375	0,00149	5,90545	0,0015	8,9067	0,00163	5,35128	0,00099	5,23727	0,00098	4,09223
0,00691	31,5459	0,00151	5,8108	0,00129	9,18885	0,00154	4,95753	0,00096	5,48052	0,00092	4,20575
0,00687	32,4155	0,00158	5,70069	0,00135	10,0923	0,00149	5,02248	0,00091	5,48435	0,00083	4,41306
0,007	33,3125	0,00161	5,92129	0,00172	10,215	0,00175	5,30258	0,0009	5,57274	0,00093	4,36114
0,00706	34,3544	0,00137	6,16727	0,00174	10,4284	0,00157	5,54284	0,00097	5,774	0,00095	4,31334
0,00732	34,902	0,00156	6,15824	0,00175	10,9769	0,00165	5,5974	0,00104	5,28015	0,00093	4,58986
0,00743	35,6524	0,0016	6,04618	0,00156	11,4488	0,00167	5,71531	0,00105	5,51364	0,00081	4,33476
0,00735	36,759	0,00161	6,22479	0,00146	11,6959	0,00157	5,91625	0,00108	5,97103	0,00103	4,07012
0,0074	37,6101	0,0016	6,02967	0,00171	11,8045	0,00175	5,55941	0,00108	5,99368	0,00097	4,52096
0,00744	38,4858	0,00156	5,92154	0,00173	12,2433	0,00183	5,72324	0,00127	5,96776	0,00096	4,67459
0,00775	39,4341	0,00166	6,38627	0,00165	12,2723	0,00178	6,29573	0,00128	6,0905	0,00092	4,64299
0,00815	40,5953	0,00149	6,45681	0,00163	12,2468	0,00184	6,45487	0,00118	6,37079	0,00095	4,72925
0,00815	41,7377	0,00161	6,41964	0,00194	12,903	0,00189	6,45557	0,00118	6,10821	0,00107	5,00024
0,0081	42,8769	0,00156	6,50693	0,00197	13,2671	0,00185	6,54924	0,00115	6,3322	0,00113	5,09654
0,00825	44,3853	0,00167	6,84618	0,00203	13,4636	0,00201	6,87881	0,00112	6,8108	0,00108	5,20649
0,00831	45,258	0,00161	6,90779	0,00188	13,8252	0,00229	6,87062	0,00117	6,42343	0,00108	5,95507
0,0084	46,3043	0,00175	7,22086	0,00191	14,1245	0,0019	7,101	0,00123	6,25068	0,00127	6,04119
0,0087	47,4448	0,00191	8,03114	0,00197	14,2446	0,00195	7,87722	0,00128	6,43717	0,0012	5,85942
0,00877	48,7367	0,00176	8,16886	0,00197	14,224	0,00199	7,5166	0,00134	6,71276	0,00124	6,07984
0,00902	49,9321	0,0018	8,17234	0,00207	14,9751	0,00199	7,37085	0,00127	6,70156	0,00115	6,29116
0,00908	51,0949	0,00188	8,44987	0,00198	15,0793	0,00206	7,63674	0,00116	6,83218	0,00103	6,29399
0,00922	52,4622	0,00192	8,76053	0,00203	15,1146	0,00196	7,91484	0,00127	6,96821	0,00117	6,25362
0,00924	53,378	0,0021	8,97528	0,00223	15,349	0,00212	7,94749	0,00132	6,49481	0,00106	6,51707
0,00946	54,3404	0,00194	9,13391	0,0019	15,646	0,00224	8,11665	0,00123	6,65116	0,00121	6,39772
0,00952	55,8316	0,00194	9,4462	0,0021	15,844	0,00231	8,53383	0,0014	7,05052	0,0012	6,13221
0,00978	56,9429	0,0019	9,39623	0,00213	16,084	0,00224	8,15412	0,00137	7,08358	0,00127	6,7715
0,00996	58,0168	0,00199	9,11378	0,00224	16,4799	0,00214	8,20104	0,00133	7,17962	0,00131	6,93641
0,01005	59,2804	0,00192	9,63539	0,00238	16,4782	0,00216	8,69696	0,00135	7,29004	0,00133	7,03008
0,01006	60,5586	0,00211	9,82092	0,00212	16,3109	0,00226	8,71127	0,00145	7,5678	0,00134	7,19195
0,01031	61,6399	0,00221	9,951	0,00211	17,0073	0,00255	8,63447	0,00136	7,44925	0,00134	7,51671
0,01031	62,6611	0,00219	10,1382	0,0021	17,2377	0,00238	8,76817	0,00134	7,74937	0,00149	7,53332
0,01022	64,2034	0,0023	10,5187	0,00232	17,3305	0,00243	9,14343	0,00146	8,4777	0,00145	7,57234

Fonte: Próprio autor (2024).