



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas -
Mestrado Profissional**

Renato Coutinho dos Santos

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS CORPOS DE PROVA DE COBRE COM
GEOMETRIA ESPECIAL PREPARADOS POR MEIO DE COMPRESSÃO
NO ESTADO PLANO DE DEFORMAÇÃO EM MATRIZ FORD**

Belo Horizonte

2025

Renato Coutinho dos Santos

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS CORPOS DE PROVA DE COBRE COM
GEOMETRIA ESPECIAL PREPARADOS POR MEIO DE COMPRESSÃO
NO ESTADO PLANO DE DEFORMAÇÃO EM MATRIZ FORD**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Mestrado Profissional da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de Concentração: Metalurgia de Transformação

Orientador: Prof. Pedro Henrique Rodrigues Pereira.

Belo Horizonte

2025

S237c

Santos, Renato Coutinho dos.

Comportamento mecânico dos corpos de prova de cobre com geometria especial preparados por meio de compressão no estado plano de deformação em matriz Ford [recurso eletrônico] / Renato Coutinho dos Santos. – 2025.

1 recurso online (76 f.: il., color.): pdf.

Orientador: Pedro Henrique Rodrigues Pereira.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia metalúrgica - Teses. 2. Método dos elementos finitos - Teses. 3. Energia (Mecânica) - Teses. 4. Cobre - Teses. I. Pereira, Pedro Henrique Rodrigues. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 669(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica,
Materiais e de Minas da UFMG - Mestrado Profissional

UFMG


COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS CORPOS DE PROVA DE COBRE COM GEOMETRIA ESPECIAL PREPARADOS POR MEIO DE COMPRESSÃO NO ESTADO PLANO DE DEFORMAÇÃO EM MATRIZ FORD

RENATO COUTINHO DOS SANTOS


Dissertação submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Aprovada em 26 de agosto de 2025.

Por:


 Documento assinado digitalmente
PEDRO HENRIQUE RODRIGUES PEREIRA
Data: 27/08/2025 09:34:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Pedro Henrique Rodrigues Pereira (UFMG)

 Documento assinado digitalmente
GILMAR CORDEIRO DA SILVA
Data: 26/08/2025 16:48:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Gi

Minas)

 Documento assinado digitalmente
ALISSON DUARTE DA SILVA
Data: 27/08/2025 08:36:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alisson Duarte da Silva (UFMG)

AGRADECIMENTOS

A *Deus*, em primeiro lugar, por ter me sustentado ao longo desta caminhada. Sem a presença divina em minha vida, este trabalho não teria sido possível.

A esposa *Kenia* e ao filho *Benício*, pela paciência, incentivo, amor, compreensão e força em todos os momentos.

Ao *Professor Dr. Alisson Duarte da Silva*, sou grato pelas sugestões técnicas que enriqueceram este trabalho, pelo incentivo e apoio constante durante a execução do projeto.

Ao *Professor Dr. Daniel Majuste* pela participação fundamental na aquisição do material para realização dos experimentos.

À *Engenheira Lorena Isabela de Oliveira Ribeiro* pela importante contribuição na idealização inicial desta pesquisa.

Ao *Graduando Lucas Figueiredo Monteiro* pelos compartilhamentos de ideias e informações técnicas para o estudo por meio das simulações pelo método dos elementos finitos.

Ao *Engenheiro Tiago Elias Gomes Oliveira* que colaborou na fase experimental deste trabalho com apoio técnico essencial, cuja ajuda foi muito valiosa.

À *Dra. Taíse de Souza* pelo incentivo e apoio em momentos fundamentais para o desenvolvimento do projeto.

Ao *Mestre Pedro Luiz Faria Perdigão* pelo incentivo, apoio e pelas valiosas orientações para o planejamento de algumas etapas do projeto.

Aos *Engenheiros Davidson Vaúna de Moraes, Alan de Vasconcelos Viana, Weberth Hovadich Gonçalves e Carlos Wagner da Silva* que sempre estiveram ao meu lado oferecendo apoio emocional e palavras de incentivo.

Aos *Mestres Marcílio Santos e Guilherme Francisco de Sales Silva*, pelos conselhos, apoio e disposição para ajudar em um dos momentos mais difíceis na execução das tarefas deste trabalho.

Ao *Professor Dr. Pedro Henrique R. Pereira*, pela orientação dedicada e criteriosa, pelos valiosos ensinamentos técnicos e humanos compartilhados ao longo desta jornada, e pela paciência e disponibilidade em cada etapa. Sua confiança, gentileza e apoio foram decisivos para a conclusão de cada fase do projeto.

Aos amigos e outros familiares que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste objetivo, deixo aqui minha sincera gratidão.

RESUMO

O ensaio de tração é muito importante nas análises das propriedades mecânicas de materiais para projetos de processamentos termomecânicos e demais aplicações. A confecção do corpo de prova para este teste exige várias etapas complexas de processamentos devido ao tamanho e geometria definidos em especificações que necessitam serem produzidas com precisões na forma, medidas e acabamentos. Além disso, com o avanço em pesquisas nas áreas de deformação plástica severa (SPD) que podem fabricar novos materiais com quantidades limitadas, tem-se aumentado a demanda por amostras fora do padrão de normas que podem atingir tamanhos a nível submicrométrico. Diante deste cenário, este trabalho estudou o comportamento mecânico em corpos de prova preparados em nova rota de processamento por meio da compressão no estado plano de deformação. Para isso, o material utilizado foi o cobre de elevada pureza. Este material se deforma plasticamente com certa facilidade devido a boa ductilidade. Então, o objetivo da pesquisa foi desenvolver novo método de preparação das amostras para o ensaio de tração em chapas finas laminadas. Foram realizadas laminação a frio, ensaio Ford seguidos de recozimento pleno em amostras de cobre. Em seguida, foram feitos testes de tração e desenvolvidas as curvas de fluxo para comparação e validação do ensaio preparado a partir da matriz Ford. Também foram realizadas simulações virtuais pelo método dos elementos finitos dos ensaios de tração e Ford para escolha do melhor caminho de tensão e deformação na definição do projeto para os experimentos físicos e virtuais para validação do novo método proposto. As dimensões das partes úteis das chapas foram: espessura de 0,5mm, larguras de 2, 5 e 20mm e comprimento de 2 e 4mm. Os resultados das curvas de fluxo determinadas a partir dos ensaios físicos e virtuais de tração foram congruentes. As chapas com larguras de 2mm e a chapa com largura de 5mm e comprimento de 4mm se deformaram sob estado uniaxial de tensões de acordo com o resultado apresentado pela simulação numérica. A chapa com largura de 20mm apresentou estado próximo ao plano de deformação. A chapa com largura de 5mm e comprimento de 2mm foram tracionadas sob estado intermediário entre uniaxial de tensões e estado plano de deformação. Neste caso, novos modelos matemáticos foram utilizados para o cálculo da curva de fluxo. O novo método se mostrou que pode ser viável como alternativa prática do ensaio físico da laminação, seguida de tração.

Palavras-chave: cobre; compressão no estado plano de deformação; ensaio de tração; método dos elementos finitos.

ABSTRACT

The tensile test is highly important in analyzing the mechanical properties of materials for thermomechanical processing and application projects. The preparation of the specimen for this test requires several complex processing steps due to the size and geometry defined by specifications, which must be produced with precision in shape, dimensions, and surface finish. Furthermore, with advances in research in the field of severe plastic deformation (SPD), which can produce new materials in limited quantities, there has been a growing demand for non-standard samples that can reach submicrometric dimensions. In this context, this study investigated the mechanical behavior of specimens prepared through a new processing route using plane strain compression. For this purpose, high-purity copper was used. This material plastically deforms with relative ease due to its good ductility. Thus, the objective of the research was to develop a new method for preparing samples for tensile testing in cold-rolled thin sheets. Cold rolling, Ford test, and full annealing were carried out on copper samples. Subsequently, tensile tests were performed, and flow curves were developed for comparison and validation of the samples prepared using the Ford die. Finite element simulations of both the tensile and Ford tests were also conducted to select the best stress and strain path for designing the physical and virtual experiments used to validate the new proposed method. The dimensions of the useful parts of the sheets were: thickness of 0.5 mm, widths of 2, 5, and 20 mm, and lengths of 2 and 4 mm. The results of the flow curves obtained from the physical and virtual tests were consistent. The sheets with widths of 2 mm, as well as the sheet with a width of 5 mm and a length of 4 mm, deformed under a uniaxial stress state, as indicated by the numerical simulation. The sheet with a width of 20 mm showed a state close to plane strain under tension. The sheet with a width of 5 mm and a useful length of 2 mm was stretched under an intermediate condition between uniaxial stress and plane strain. In this case, new mathematical models were used to calculate the flow curve. The new method proved to be a viable practical alternative for the physical testing route involving rolling followed by tensile testing.

Keywords: copper; finite element analysis; plane strain compression; tensile testing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1: Energia da falha de empilhamento das ligas de cobre em função da razão entre elétron de valência e átomo [2].....	20
Figura 3. 2: Efeito do teor de zinco e tamanho de grão no comportamento de aumento da resistência à tração [2].	20
Figura 3. 3: Desenho esquemático simplificado da operação de laminação. Adaptado de [5].	21
Figura 3. 4: Curvas esquemáticas do efeito do encruamento nas propriedades mecânicas [6].	22
Figura 3. 5: Curva tensão deformação construídas a partir de ensaios de tração das amostras laminadas a frio com diferentes reduções/deformações [5].	22
Figura 3. 6: Curva tensão cisalhante-deformação cisalhante das três etapas do encruamento de metal com estrutura cristalina CFC[6].....	23
Figura 3. 7: Exemplos de curvas que mostram dois tipos de comportamentos do escoamento de metais afetados pelo caminho de deformação [6].	24
Figura 3. 8: Curvas Tensão-Deformação(a) e (b) Curvas Taxa de encruamento-Tensão do material laminado a frio para diferentes reduções/deformações [10].....	25
Figura 3. 9: Representação da direção de retirada das amostras na chapa laminada [11].	26
Figura 3. 10: Variações da taxa de encruamento em função da deformação no ensaio de tração após a reversão da direção do carregamento [11].....	26
Figura 3. 11: Variações da taxa de encruamento em função da deformação no ensaio de compressão após a reversão da direção do carregamento [11].....	27
Figura 3. 12: (0001) e (1010) Figuras de pólos (PFs), mapas de Figura do pólo inversa (IPF) e contornos de grãos extraídos obtidos por meio de carregamento monotônico de compressão em amostras retiradas na direção de laminação (RD) [11].....	27
Figura 3. 13: (0001) e (1010) Figuras de pólos (PFs), mapas de Figura de pólo inversa (IPF) e contornos de grãos extraídos obtidos por meio de carregamento monotônico de tração em amostras retiradas na direção de laminação (RD)[11].....	28
Figura 3. 14: Ilustração da configuração básica do ensaio Ford. Adaptado de [12].	29
Figura 3. 15: Desenho esquemático das formas e representação das dimensões básicas de alguns elementos do ensaio Ford [12].	29
Figura 3. 16: Variação da tensão de fluxo de acordo com a taxa de deformação para deformação igual a 0,1 [13].....	31
Figura 3. 17: Corpo de prova para ensaio de tração. Adaptado de [14].	32

Figura 3. 18: Curvas tensão × deformação da liga Al-Mg-Si-Cu em diferentes taxas de deformação [16].....	33
Figura 3. 19: Comportamento de tensão-deformação durante o teste de tração do material. (a) Curva convencional e (b) Curvas convencional e verdadeira mostradas em um mesmo diagrama [12].	34
Figura 3. 20: (a) Modelo; (b) malha com 294 elementos e 344 nós; (c) tensões; (d) malha com 1008 elementos e 1096 nós; (e) tensões[19].....	36
Figura 3. 21: Geometria dos punções e corpos de prova com malhas de elementos finitos em (a) 2D e (b) 3D. Adaptado de [18].....	37
Figura 3. 22: Curvas tensão × deformação efetiva obtidas das simulações no PSC considerando diferentes coeficientes de atritos [18].	38
Figura 3. 23: Distribuições: (a) taxa de deformação, (b) deformação plástica e (c) tensão média em diferentes estágios no PSC considerando condições em 2D[18].....	38
Figura 3. 24:: Modelo do corpo de prova utilizado no ensaio de tração. Adaptado de [20]. ...	39
Figura 3. 25: Comparação dos resultados das distribuições de deformações entre simulação (a) e experimento (b) antes da fratura. Adaptado de [20].	40
Figura 3. 26: Gráficos que demonstram as deformações por meio de um corte no centro em quatro amostras com diferentes tamanhos de entalhe [20].....	40
Figura 3. 27: Gráfico que mostra a influência da largura das amostras e comprimento do entalhe no estado de deformação e na fratura [20].	41
Figura 4. 1: Fluxograma das etapas experimentais [próprio autor].....	42
Figura 4. 2: Chapa após a laminação a quente para 2 mm de espessura e recozimento [próprio autor].....	43
Figura 4. 3: Chapa após a laminação a frio para 1mm e recozimento [próprio autor].....	43
Figura 4. 4: Desenho esquemático em milímetros: (a) Corpo de prova laminado e recozido preparado para o ensaio Ford. (b) Corpo de prova após o teste Ford preparado para o ensaio de tração. [próprio autor].....	43
Figura 4. 5: Modelos de punções e amostra utilizados no ensaio Ford. Adaptado de [21].	45
Figura 4. 6: Sistema experimental utilizado no Ensaio Ford na UFMG.	45
Figura 4. 7: Geometrias dos ensaios com as malhas: Ford (a) e Tração (b).....	48
Figura 4. 8: Representação dos ensaios: Ford no plano 2D (a) e Tração 3D 1/8 da geometria (b).	48

Figura 5. 1: Comparativo das curvas de fluxo plástico obtidas das simulações do ensaio Ford realizados com quatro tamanhos dos elementos finitos e a curva de fluxo obtida experimentalmente via ensaio Ford e usada como propriedade constitutiva do material nas simulações [próprio autor].....	50
Figura 5. 2: Comparativo das curvas de fluxo plástico obtidas das simulações do ensaio de tração da amostra C (largura de 20mm e comprimento útil da zona de deformação de 2mm) realizados com dois tamanhos dos elementos finitos e a curva de fluxo obtida do ensaio experimental Ford [próprio autor].	50
Figura 5. 3: Magnitude das tensões (MPa) nas direções X e Z na porção central da chapa no momento do início da estricção. Chapa A (a), Chapa B (b), Chapa C (c), Chapa D (d), Chapa E (e), e Chapa F(f),.....	52
Figura 5. 4: Comparação entre as curvas de fluxo construídas a partir dos resultados do ensaio de tração(virtual) da chapa A e ensaio Ford (experimental) [próprio autor].....	53
Figura 5. 5: Comparação entre as curvas de fluxo construídas a partir dos resultados do ensaio de tração(virtual) da chapa D e ensaio Ford (experimental) [próprio autor].....	53
Figura 5. 6: Comparação entre as curvas de fluxo construídas a partir dos resultados do ensaio de tração(virtual) da chapa E e ensaio Ford (experimental) [próprio autor].	54
Figura 5. 7: Comparação entre as curvas de fluxo construídas a partir dos resultados do ensaio de tração(virtual) da chapa C e ensaio Ford (experimental) [próprio autor].	55
Figura 5. 8: Comparação entre as curvas de fluxo construídas a partir dos resultados do ensaio de tração(virtual) da chapa B e ensaio Ford (experimental) [próprio autor].....	56
Figura 5. 9: Comparação entre as curvas de fluxo construídas a partir dos resultados do ensaio de tração(virtual) da chapa E e ensaio Ford (experimental) [próprio autor].	56
Figura 5. 10: Tensões nas direções X, Y e Z correspondentes à $\epsilon_{ef} \approx 0,16, 0,32$ e $0,60$ na chapa C.	59
Figura 5. 11: Tensões efetivas correspondentes à $\epsilon_{ef} \approx 0,16, 0,32$ e $0,60$ na chapa C.....	60
Figura 5. 12: Deformações nas direções X, Y e Z correspondentes à $\epsilon_{ef} \approx 0,16, 0,32$ e $0,60$ na chapa C.	61
Figura 5. 13: Deformações efetivas (ϵ_{ef}) $\approx 0,16, 0,32$ e $0,60$ na chapa C.....	61
Figura 5. 14: Gradiente de deformação efetiva de todas as chapas correspondentes à ϵ_{ef} de $\sim 0,16$	62
Figura 5. 15: Gradiente de deformação efetiva de todas as chapas correspondentes à ϵ_{ef} de $\sim 0,32$	63

Figura 5. 16: Curvas de fluxo plástico construídas a partir dos resultados do ensaio Ford [Próprio autor].	64
Figura 5. 17: Comparação entre as curvas de fluxo construídas a partir dos resultados dos ensaios físicos de tração e Ford para matrizes com largura $b = 2$ mm [próprio autor].	65
Figura 5. 18: Comparação entre as curvas de fluxo construídas a partir dos resultados dos ensaios físicos de tração e Ford para matrizes com largura $b = 4$ mm [próprio autor].	65
Figura 5. 19: Zona de deformação dos copos de prova com comprimento de 2mm e larguras de 5mm(a) e 20mm(b). Lado esquerdo (simulação virtual ao final da estrição) e Lado direito (experimento após a fratura) [próprio autor].	67
Figura 5. 20: Zona de deformação dos copos de prova com comprimento de 4mm e larguras de 5mm(c) e 20mm(d). [Lado direito(c) e Lado esquerdo(d): simulação virtual ao final da estrição] e [Lado esquerdo(c) e Lado direto(d): experimento após a fratura] [próprio autor].	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Velocidade de deformação para cada condição [3].	31
Tabela 2: Equações para determinação dos valores convencionais e verdadeiros de tensão e deformação. Adaptado de [12].	33
Tabela 3: Classificação da chapa (amostra) de acordo com a zona de compressão (trabalho)	46
Tabela 4: Parâmetros de simulação para os testes de convergência.....	47
Tabela 5: Parâmetros de simulação definidos para os ensaios virtuais	48
Tabela 6: Equações para construção da curva de fluxo de acordo com o resultado do estado de tensões da amostra no início da estrição durante ensaio de tração.	58
Tabela 7: Dimensões da zona de deformação das amostras.	66
Tabela 8: Intervalo da deformação efetiva nas amostras durante a carga máxima.	69

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação de fluxo do Hollomon: $\sigma = K\varepsilon^n$ (3.1)

Equação de Hall-Petch: $\sigma_e = \sigma_o + k_e d^{-1/2}$ (3.2)

Pressão média de contato: $p = \sigma_y = \frac{F}{wb}$ (3.3)

Tensão efetiva: $\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{3}\sigma_y}{2} = 0,866\sigma_y$ (3.4)

Deformação no sentido da espessura: $\varepsilon_y = \varepsilon_t = \ln \frac{t_0}{t}$ (3.5)

Deformação efetiva: $\bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}}\varepsilon_y = 1,155\varepsilon_y$ (3.6)

Tensão efetiva: $\sigma_{eq} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{F}{bw} \right) \left(\frac{\mu b}{h} \right)}{e^{\frac{\mu b}{h}} - 1}$ (4.1)

Tensão efetiva: $\sigma_{ef} = \left(\frac{F}{w_0 t_0^{Tração}} \right) (1+e)$ (5.1)

Deformação efetiva: $\varepsilon_{ef} = \ln(1+e)$ (5.2)

Tensão efetiva: $\sigma_{ef} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{F}{w_0 t_f^{Tração}} \right)$ (5.3)

Deformação efetiva: $\varepsilon_{ef} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{t_0^{Tração}}{t_f^{Tração}} \right)$ (5.4)

Deformação efetiva: $\varepsilon_{ef} = \frac{2}{\sqrt{2}} \ln \left(\frac{t_0^{Tração}}{t_f^{Tração}} \right)$ (5.5)

Tensão efetiva: $\sigma_{ef} = \left(\frac{F}{w_0 t_f^{Tração}} \right)$ (5.6)

Tensão efetiva: $\sigma_{ef} = \frac{\sqrt{3}}{1,90} \left(\frac{F}{w_0 t_f^{Tração}} \right)$ (5.7)

LISTA DE NOTAÇÕES E ABREVIATURAS

ASTM - American Society for Testing and Materials.

SPD – *Severe Plastic Deformation* - Deformação Plástica Severa

HPT – *High-Pressure Torsion* - Torção sob alta Pressão

CFC – Cúbica de Face Centrada

MEF – Método dos Elementos Finitos

PSC – *Plane Strain Compression* – Compressão no Estado Plano de Deformação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo geral	18
2.2 Objetivos específicos.....	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 Cobre.....	19
3.2 Laminação a frio	21
3.3 Influência do caminho de deformação no encruamento dos metais.....	23
3.4 Ensaio de compressão	28
3.5 Ensaio de tração	32
3.6 Simulação dos ensaios pelo método dos elementos finitos – MEF.....	35
4 METODOLOGIA	42
4.1 Material e Procedimento experimental.....	43
4.1.1 Ensaio Ford	44
4.1.2 Ensaio de Tração.....	46
4.2 Modelagem das simulações numéricas por elementos finitos.....	47
5. RESULTADOS	49
5.1 Ensaio virtuais.....	49
5.1.1 Testes de Convergência	49
5.1.2 Determinação da relação $\sigma_{ef} \times \varepsilon_{ef}$	51
5.1.3 Gradientes de tensão e deformação em chapas largas sob tração	59
5.1.4 Efeito da largura da matriz e chapa nos gradientes de deformação	62
5.2 Ensaio físicos	64
5.2.1 Curva de fluxo plástico do ensaio Ford	64
5.2.2 Determinação da relação $\sigma_{ef} \times \varepsilon_{ef}$	64
5.2.3 Zona de deformação dos corpos de provas após ensaio de tração.....	66

6.	DISCUSSÃO	68
6.1	Efeito das dimensões da chapa no surgimento da estrição em tração.....	68
6.2	Influência dos parâmetros geométricos nos gradientes de deformação	69
7.	CONCLUSÃO	71
8.	RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS	73
9.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	74
10.	REFERÊNCIAS	75

1. INTRODUÇÃO

A maioria dos metais são submetidos a esforços mecânicos quando utilizados, como por exemplo, em asas de aviões construídas a partir de ligas de alumínio e nos eixos ferroviários fabricados em ligas de aço. Além disso, esses metais também são sujeitos a esforços durante os processos de conformação termomecânica, como forjamento, laminação, trefilação e estampagem. Portanto, é essencial conhecer as características dos metais para garantir que eles atendam às exigências das aplicações, evitando que qualquer deformação resultante cause fraturas.

Adicionalmente, é importante prever os efeitos da conformação nos metais para definir com precisão os tratamentos térmicos necessários antes ou após o processamento. Para compreender o comportamento dos metais sob diversas cargas, são realizados experimentos em laboratórios, visando reproduzir, da forma mais fiel possível, as condições de serviço.

O ensaio de compressão no estado plano de deformação é um teste que submete o metal a um caminho de deformação muito similar ao realizado no processamento por laminação de espessuras finas. Este ensaio é particularmente útil para a verificação de produtos industriais semiacabados com espessuras de paredes muito finas, como peças fabricadas a partir de chapas metálicas ou extrusões de paredes finas, nas quais não seria possível usinar corpos de prova cilíndricos.

Uma vantagem significativa deste ensaio é que a área submetida à carga não muda durante o processamento, o que reduz a tendência de deformações localizadas e permite a determinação da tensão de fluxo para certos valores de deformação. As amostras geralmente têm o formato de tiras finas, e a maior parte da deformação ocorre sob tensão hidrostática compressiva, o que diminui a tendência a fissuras.

Já no ensaio de tração pode se verificar o efeito do caminho de deformações submetido ao carregamento uniaxial. Normalmente, neste ensaio se analisa as propriedades mecânicas de resistência ao escoamento, à tração e a deformação na fratura, entre outras, além da possibilidade de desenvolver a curva de tensão de fluxo. A forma e o tamanho da amostra podem ser escolhidos de acordo com os padrões da Sociedade Americana de ensaios e materiais (“AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS” – ASTM).

Atualmente, os tamanhos das amostras para o ensaio de tração estão em constante redução podendo ser realizado em nível submicrométrico. Isso acontece pela necessidade de análise das propriedades mecânicas em solda, quantidade limitada de novos materiais desenvolvidos fabricados em pequenas quantidades, como ocorre no caso da expansão do

campo de pesquisa de deformação plástica severa (SPD). A maioria dos experimentos de tração atualmente realizados para estudos de SPD se utiliza corpos de prova com diferentes formatos, e são, na maioria dos casos, menores que o tamanho mínimo especificado pelos padrões ASTM. Outro exemplo são amostras processadas por torção de alta pressão (HPT). Porém, a preparação destas amostras que exibem seções transversais menores envolve desafios técnicos na etapa do corte e realização do ensaio em equipamentos convencionais. Apesar disso, é possível realizar testes de tração com amostras em miniatura especiais.

Alguns cuidados são importantes durante a preparação do corpo de prova para se obter resultados satisfatórios após o ensaio de tração. Além da consideração fundamental da geometria da amostra, o método de fabricação pode ter uma influência significativa no resultado dos testes. Por isso deve ser evitado que a amostra tenha alterações significativas no estado de origem do material, como modificações causadas por trabalho a frio ou superaquecimento. Além disso, são necessárias superfícies “perfeitas”, muito lisas sem ranhuras ou baixos valores de rugosidade. Também precisa ter alta precisão nos valores de dimensões e tolerâncias geométricas evitando rebarbas ou entalhes.

A análise por elementos finitos pode ser uma ferramenta extremamente eficaz para uma compreensão mais detalhada dos estados de tensões e das alterações físicas que ocorrem ao longo do corpo do material durante os processos de conformação. Essa técnica permite avaliar os caminhos e a distribuição das deformações plásticas, a velocidade de deformação, entre outros fatores. Quando a simulação virtual apresenta resultados próximos aos experimentos reais, além de proporcionar um melhor entendimento dos fenômenos envolvidos, o próprio software de elementos finitos pode ser usado para testar ensaios com parâmetros modificados, estudando seus efeitos no material e economizando testes práticos.

Diante desse cenário, a importância dos ensaios se torna evidente, tanto para validar produtos após a fabricação quanto para conhecer as propriedades mecânicas necessárias ao projeto de processos termomecânicos. Isso inclui a utilização de softwares de simulação virtual. As limitações e dificuldades técnicas do ensaio de tração, especialmente na confecção de amostras fora dos padrões, podem surgir devido à quantidade limitada de material disponível e ao cuidado especial necessário durante a preparação das amostras, o que torna desejável o desenvolvimento de métodos de preparação de amostras especiais para efetuar ensaios em regiões diminutas com a mesma exatidão das técnicas convencionais. Então, com o objetivo de desenvolver um método de preparação dos corpos de prova para o ensaio de tração, este trabalho analisou o comportamento mecânico de chapas tracionadas preparadas via ensaio Ford.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver com o auxílio de experimentos físicos e simulações computacionais um método de preparação de corpos de prova especiais para ensaio de tração em chapas finas por meio da operação de compressão no estado plano de deformação em matriz Ford.

2.2 Objetivos específicos

Para o desenvolvimento do estudo, foram realizados testes físicos e virtuais dos ensaios Ford e de tração em chapas finas no estado recozido. Desta forma, pretendeu-se atender os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o comportamento mecânico do material no ensaio de tração após a compressão no estado plano de deformação em matriz Ford, seguida de recozimento, utilizando corpos de prova especiais obtidos diretamente da operação de compressão;
- Avaliar o efeito da geometria e dimensões dos corpos de prova nos caminhos de deformação durante o ensaio tração.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Cobre

Aços e demais ligas ferrosas são tipos de metais extremamente utilizados em diversas aplicações pela flexibilidade, certa facilidade e vantagem econômica de produzir esses materiais com várias qualidades de propriedades. Entretanto, estes metais possuem limitações em relação a algumas propriedades como: condutividade térmica, resistência a corrosão, entre outras. Desta maneira, os metais de elevada pureza ou ligas não ferrosas de cobre, alumínio, titânio, entre outros, podem ser utilizados por possuírem propriedades mais adequadas [1].

Dentre os materiais não ferrosos, o cobre é muito utilizado por possuir boa resistência e ductilidade além da resistência a corrosão e excelentes propriedades elétricas como a condutividade térmica. Estas características principais são responsáveis pela grande utilização deste material na forma de fios. Porém, outra propriedade, a resistividade elétrica, que está relacionada com a quantidade de impurezas presente no cobre reduz a sua capacidade de condutividade. Assim, pode ser importante o uso do cobre com elevada pureza, material utilizado nesta pesquisa, para determinadas aplicações [2].

A composição química e o tipo da estrutura atômica dos metais com seus defeitos, como, discordâncias, lacunas, contornos de grãos, falha de empilhamento, entre outros, determinam o comportamento do material diante das deformações que influenciam em suas propriedades ao longo do processamento termomecânico e nas características para aplicações [1].

O cobre possui estrutura cristalina cúbica de faces centradas (CFC). Esta característica confere a este metal boa capacidade para deformação plástica devido à alta ductilidade proporcionada pelos vários sistemas de escorregamentos ativos. Além disso, este metal apresenta elevada capacidade de endurecimento na medida em que se aumenta a magnitude de deformação. Isto acontece devido à baixa energia da falha de empilhamento, o que torna esta falha mais larga. Este atributo confere a este metal maior capacidade de encruamento quando deformado plasticamente [3].

O valor da energia da falha de empilhamento do cobre puro é $\sim 80 \text{ mJ m}^{-2}$. A adição de zinco, alumínio ou estanho ao cobre formam soluções sólidas que reduzem a energia da falha de empilhamento para menos que 5 mJ m^{-2} , dependendo da liga para altas concentrações de soluto, como mostrado na Figura 3.1 [2]. Desta maneira a estrutura da liga com energia ainda mais baixa da falha de empilhamento colabora com o aumento da capacidade de encruamento em relação ao cobre de elevada pureza. Esta característica é expressa por meio do expoente n da equação 3.1 [2]:

Equação de fluxo do Hollomon: $\sigma = K\varepsilon^n$ (3.1)

Um outro tipo de defeito na rede cristalina que interfere nas propriedades do metal é o contorno de grão. Conforme apresentado na figura 3.2, o material com tamanho de grão mais fino tem maior valor de resistência à tração devido a presença de maior área total de contornos de grãos que aumenta a resistência para a movimentação de discordâncias. A relação entres estes atributos pode ser analisada pela equação 3.2 [3]:

Equação de Hall-Petch: $\sigma_e = \sigma_o + k_e d^{-1/2}$ (3.2)
 onde, σ_o e k_e são constantes de cada material e d é o diâmetro médio do grão.

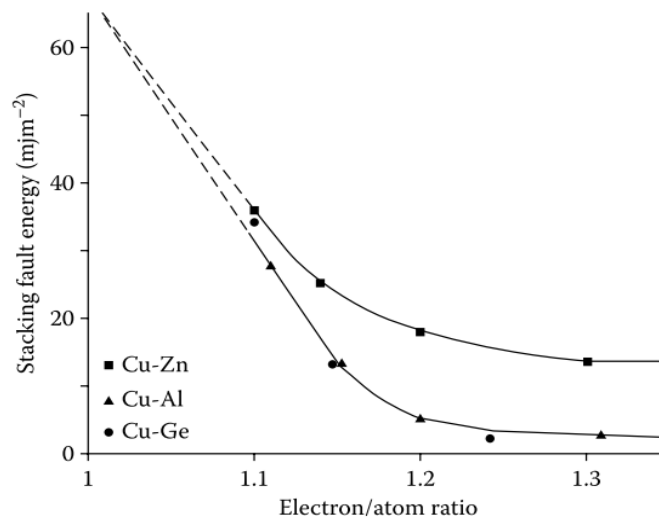


Figura 3. 1 Energia da falha de empilhamento das ligas de cobre em função da razão entre elétron de valência e átomo [2].

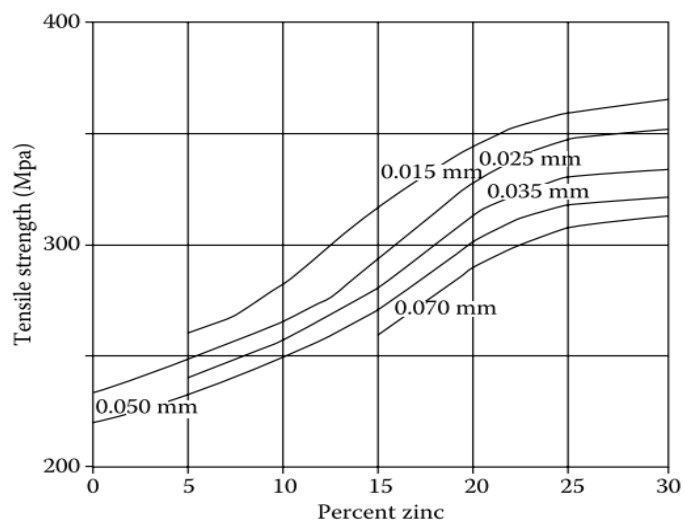


Figura 3. 2: Efeito do teor de zinco e tamanho de grão no comportamento de aumento da resistência à tração [2].

3.2 Laminação a frio

A laminação é um processo de conformação mecânica que pode ser explicado de modo simplificado como à passagem de um tipo de peça quente ou fria que pode ser barras, perfis estruturais, trilhos, placas, chapas grossas e finas, fios-máquinas, tubos, dentre outros, entre dois cilindros que giram com o objetivo de reduzir a área da seção transversal por meio de tensões compressivas que causam deformações plásticas. Como ocorre fricção entre os cilindros e o metal na laminação, este processo envolve também tensões cisalhantes superficiais. Para conformação de chapas finas geralmente se utiliza a laminação a frio no qual o trabalho é feito em temperaturas homólogas abaixo de 0,6. Normalmente este processamento é realizado ao final da cadeia de laminação ou na fabricação de folhas, chapas finas e tiras de metal [4].

A Figura 3.3 ilustra o processo de laminação simplificado. Além de alterar a forma e dimensões do produto, esta operação também promove modificações nas propriedades do metal por meio de alterações nas macros e microestruturas relacionadas às características de seu gênese. Os grãos se alongam na direção de maiores deformações [4].

Durante o processo da deformação a frio ocorre um endurecimento por encruamento por meio de modificações da estrutura interna do metal. Este fenômeno promove o aumento da resistência e dureza do material, juntamente com a redução da ductilidade [5]. A Figura 3.4 exemplifica as alterações nas propriedades mecânicas [6].

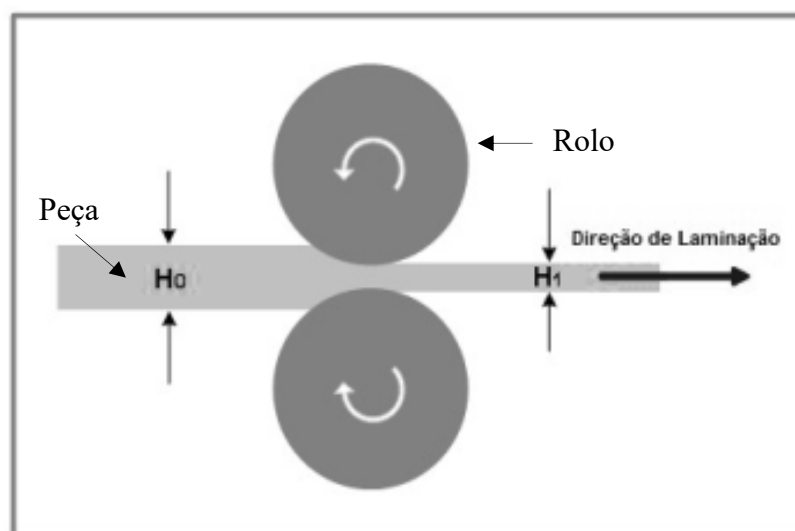


Figura 3. 3: Desenho esquemático simplificado da operação de laminação. Adaptado de [5].

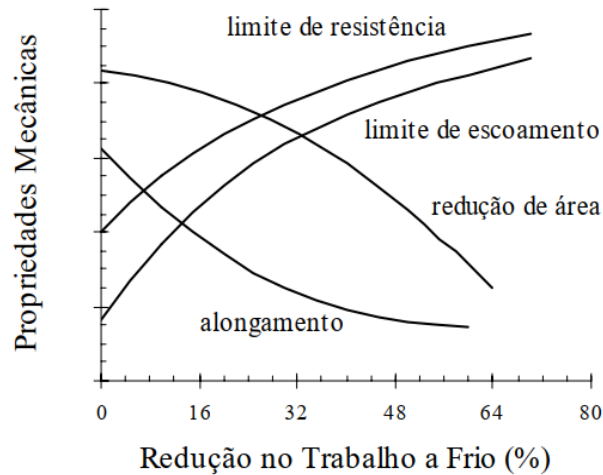


Figura 3. 4: Curvas esquemáticas do efeito do encruamento nas propriedades mecânicas [6].

Assim o grau de encruamento pode interferir na capacidade do metal em sofrer deformação pelo risco da ocorrência de fratura. Desta forma é comum aplicar ciclos de deformação/recristalização estática quando se deseja aplicar grandes deformações. Para recristalização estática, o metal encruado é aquecido a temperaturas homólogas acima de 0,5. O resultado deste tratamento térmico é o amaciamento. Somente depois da recristalização estática com o rearranjo microestrutural, os grãos se apresentarão equiaxiais. A temperatura de recristalização e a quantidade de deformação que causou o encruamento durante a laminação a frio são parâmetros que influenciam no tamanho final dos grãos formados [4].

A Figura 3.5 mostra o efeito das deformações nas propriedades mecânicas do aço inoxidável 304. Observa-se nos resultados dos ensaios de tração que quanto maior a deformação na laminação, maior o aumento da resistência e menor a ductilidade [5].

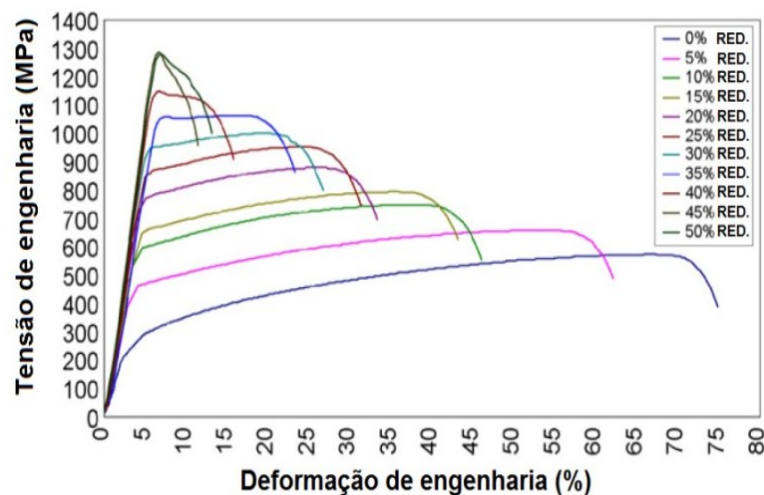


Figura 3. 5: Curva tensão deformação construídas a partir de ensaios de tração das amostras laminadas a frio com diferentes reduções/deformações [5].

A evidência que o metal reduziu a resistência mecânica após a recuperação estática pode ser um indício que houve recristalização estática. Isso é atribuído à formação e crescimento de novos grãos que têm valores menores de densidades de deslocamentos. Além da temperatura e deformação, a recuperação e recristalização estática são afetadas pela presença de impurezas em solução ou como partículas finas. Como a nucleação e o crescimento dos grãos são processos ativos termicamente, então, na medida em que se aumenta a temperatura, maiores serão as taxas de recristalização, assim como a severidade da deformação que aumenta a densidade de sítios para nucleação de novos cristais [7].

3.3 Influência do caminho de deformação no encruamento dos metais

Durante o encruamento dos metais, a tensão de cisalhamento necessária para promover o deslizamento entre os planos cristalográficos aumenta na medida em que o metal sofre a deformação. A curva tensão cisalhante-deformação cisalhante característica deste endurecimento é influenciada pelo tipo de estrutura cristalina. A Figura 3.6 demonstra três estágios do encruamento de monocristais cúbicos de face centrada (CFC) [8]. O primeiro estágio apresenta baixos valores da taxa de encruamento caracterizado pela região de fácil deslizamento. O estágio três é caracterizado pelo decréscimo contínuo da taxa causado pela recuperação dinâmica, ao contrário da segunda fase, que apresenta elevada taxa de encruamento e relação linear entre tensão e deformação como principais características. Isto acontece no segundo estágio devido às interações entre as discordâncias ou com outras barreiras que impedem sua livre movimentação, aumentando a densidade de defeitos[8].

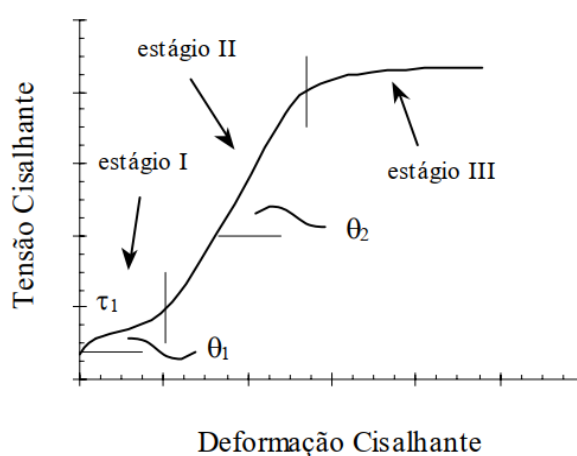


Figura 3. 6: Curva tensão cisalhante-deformação cisalhante das três etapas do encruamento de metal com estrutura cristalina CFC[6].

Um metal severamente deformado plasticamente contém aproximadamente 10^{12} discordâncias por centímetro quadrado, ao contrário do metal recozido que sem sofrer deformações plásticas possui de 10^6 a 10^8 deslocações pela mesma unidade de área. Entretanto, para alguns tipos de carregamento é comum não acontecer o aumento monotônico da tensão de fluxo plástico, como quando o metal é submetido a diferentes caminhos de deformação. Este efeito no comportamento mecânico é conhecido como “*strain path*” [3,9].

Esta maneira de deformar o metal por meio de várias trajetórias proporciona a deformação por diferentes sistemas de deslizamento durante o processamento. Desta forma, diferentemente de resultados dos comportamentos mecânicos submetidos à carregamentos contínuos, as curvas de tensão \times deformação para um mesmo metal, dependerão do tipo de carregamento, direção ou sentidos opostos, magnitude dos ciclos de deformações, velocidade de deformação, entre outros fatores. Normalmente quando a amostra sofre um carregamento após outro, o corpo de prova pode apresentar dois tipos de comportamentos, como mostra Figura 3.7. Ao contrário do primeiro, o segundo comportamento apresenta taxa de encruamento inferior e tensão de escoamento inicial superior [6].

Já a Figura 3.8 mostra resultados de experimentos de vários ensaios de tração do cobre previamente deformado por laminação para diferentes reduções. A microestrutura do metal sem laminação prévia, ou seja, submetida apenas ao ensaio de tração, se apresentou com uma estrutura celular definida e com baixa densidade de deslocações. Desta forma, se verificou um aumento progressivo da tensão de fluxo ao longo da deformação, diferente dos outros testes. Na microestrutura das amostras dos demais ensaios foram observadas rearranjo de discordâncias, de maneira que a estrutura do material, na medida em que a amostra se aproximou da ruptura, se assemelhou à microestrutura verificada no metal submetido a tração sem pré-deformação por laminação. Ainda se observa que quanto maior a deformação prévia, maior a tensão de escoamento, menor a taxa de encruamento e a ductilidade [10].

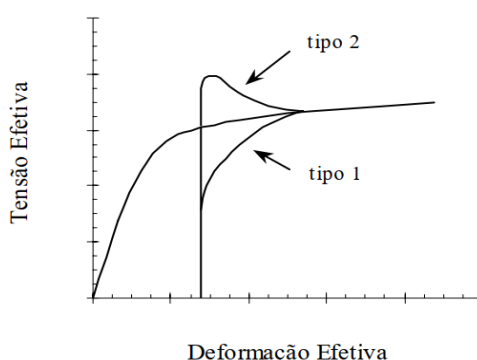


Figura 3. 7: Exemplos de curvas que mostram dois tipos de comportamentos do escoamento de metais afetados pelo caminho de deformação [6].

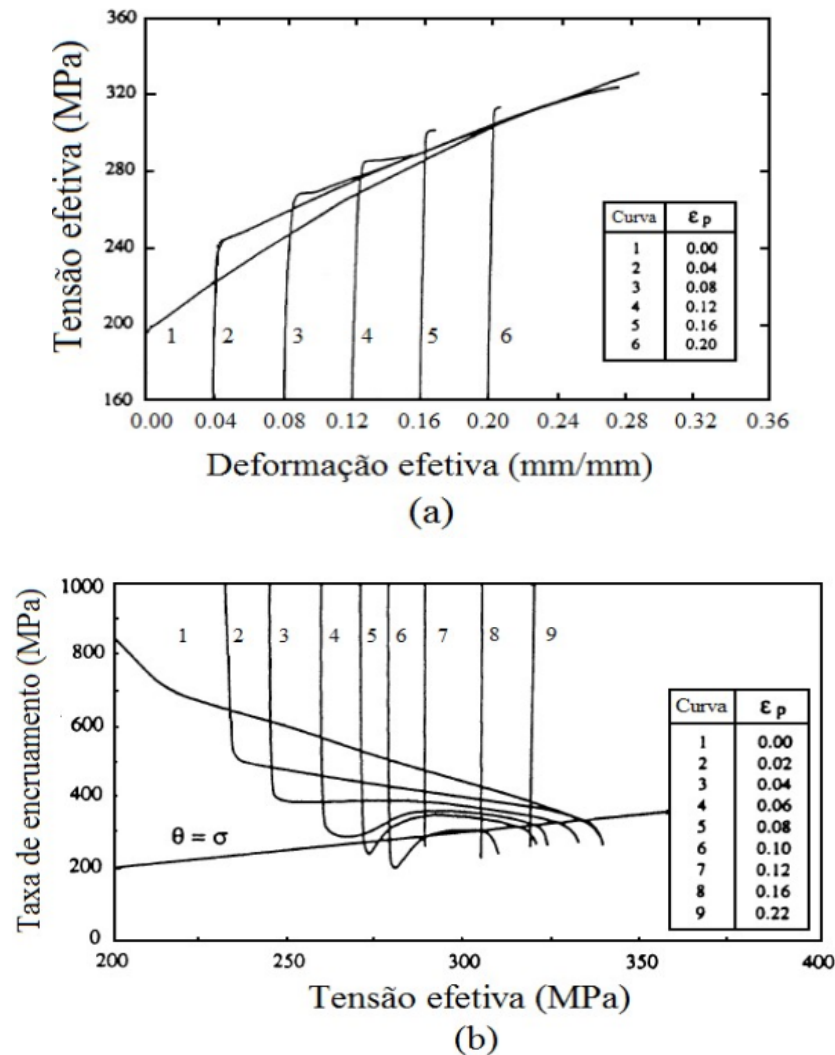
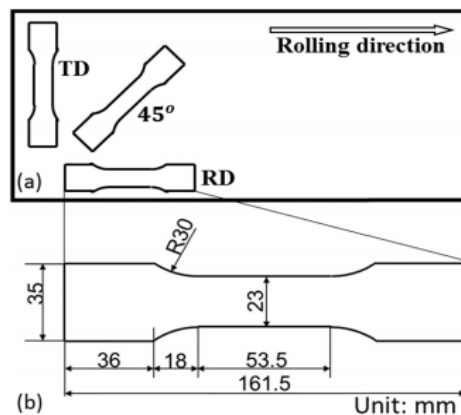


Figura 3. 8: Curvas Tensão-Deformação(a) e (b) Curvas Taxa de encruamento-Tensão do material laminado a frio para diferentes reduções/deformações [10].

A influência da trajetória de deformação nas propriedades do metal também pode variar de acordo com o sentido de análise no material. Isso é conhecido como anisotropia. Acontece, por exemplo, com as propriedades obtidas pelo ensaio de tração. Na laminação se aplicam deformações consideradas de grande magnitude. Desta maneira os planos cristalográficos se orientam de uma forma preferencial que segue a trajetória da máxima deformação. O mesmo acontece em metais que sofreram recristalização após a laminação a frio. A textura de recristalização/recozimento depende muito da textura produzida pelo trabalho a frio. O tipo de textura formada na laminação e recozimento pode ocasionar anisotropia das propriedades mecânicas no plano de chapas finas. Isso pode gerar respostas heterogêneas do material durante posteriores operações de fabricações e conformação [3].

A influência da anisotropia em corpos de prova de titânio puro com composições diferentes foi estudada por Yi e colaboradores [11]. A Figura 3.9 mostra as direções que as amostras foram retiradas. O carregamento cíclico foi composto por compressão monotônica, tração monotônica e carregamento reverso. Os autores observaram que as propriedades mecânicas tiveram variações de acordo com cada direção e caminho de deformação. Observa-se nas Figuras 3.10 e 3.11 a variação nas taxas de encruamento de acordo as direções RD, TD e 45° e caminhos de deformações, tração após a compressão e compressão depois da tração. Também se verificou que de acordo com a natureza do carregamento foram acionadas diferentes direções do sistema de deslizamento. A Figura 3.12 mostra que na medida em que evolui a deformação durante a carregamento monotônico de compressão, aumenta-se ainda mais o escorregamento seguindo a direção 1012. Já a Figura 3.13 mostra que o escorregamento na direção 1122 aumentou na medida em que se aumentou a deformação no carregamento monotônico de tração [11].



Onde: TD = direção transversal; RD = direção da laminação;

Figura 3. 9: Representação da direção de retirada das amostras na chapa laminada [11].

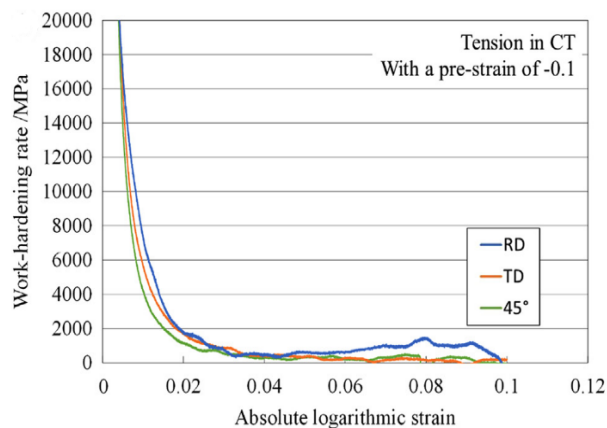


Figura 3. 10: Variações da taxa de encruamento em função da deformação no ensaio de tração após a reversão da direção do carregamento [11].

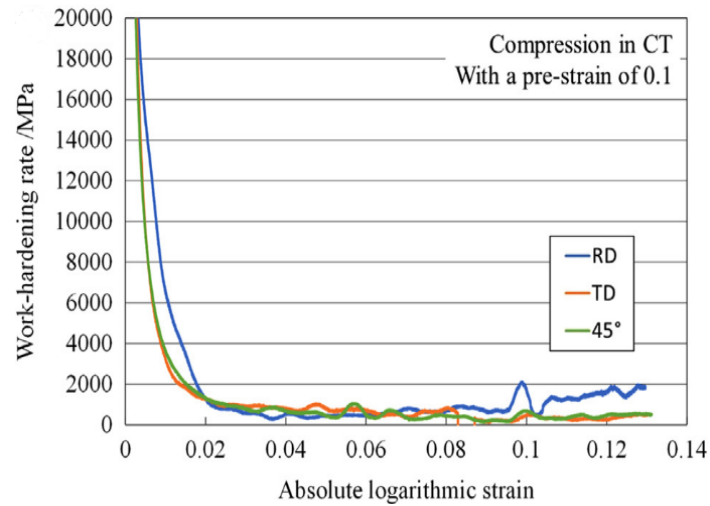


Figura 3. 11: Variações da taxa de encruamento em função da deformação no ensaio de compressão após a reversão da direção do carregamento [11].

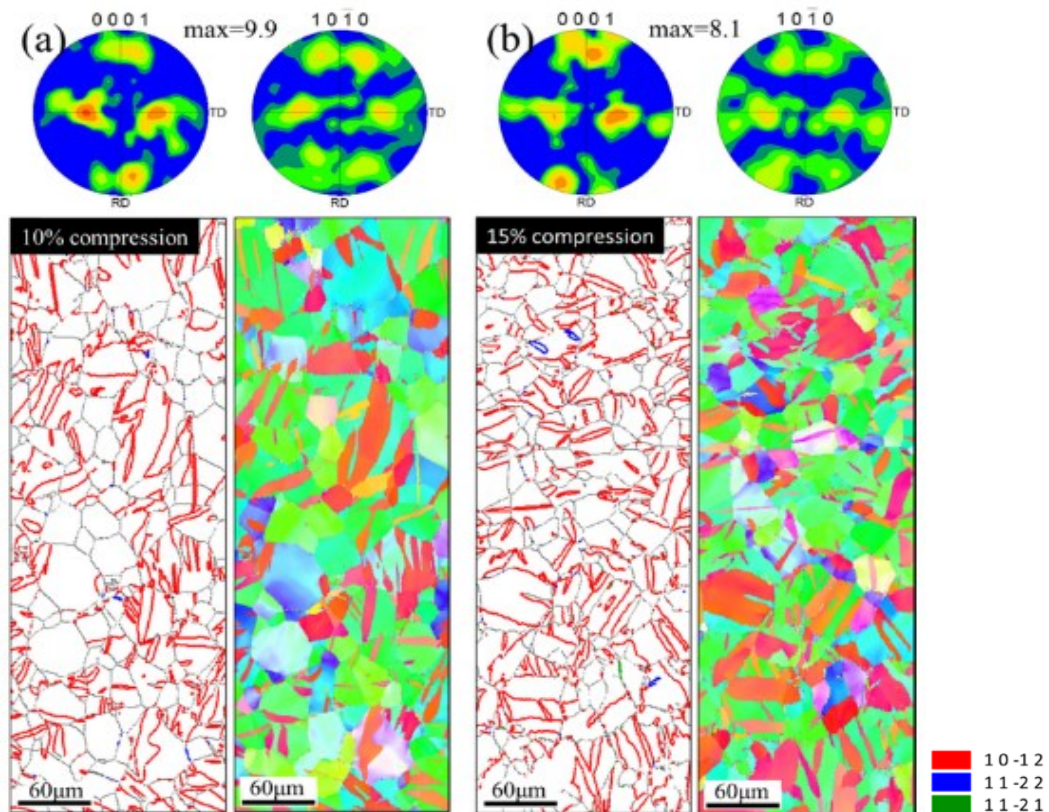


Figura 3. 12: (0001) e (1010) Figuras de pólos (PFs), mapas de Figura do pólo inversa (IPF) e contornos de grãos extraídos obtidos por meio de carregamento monotônico de compressão em amostras retiradas na direção de laminação (RD) [11].

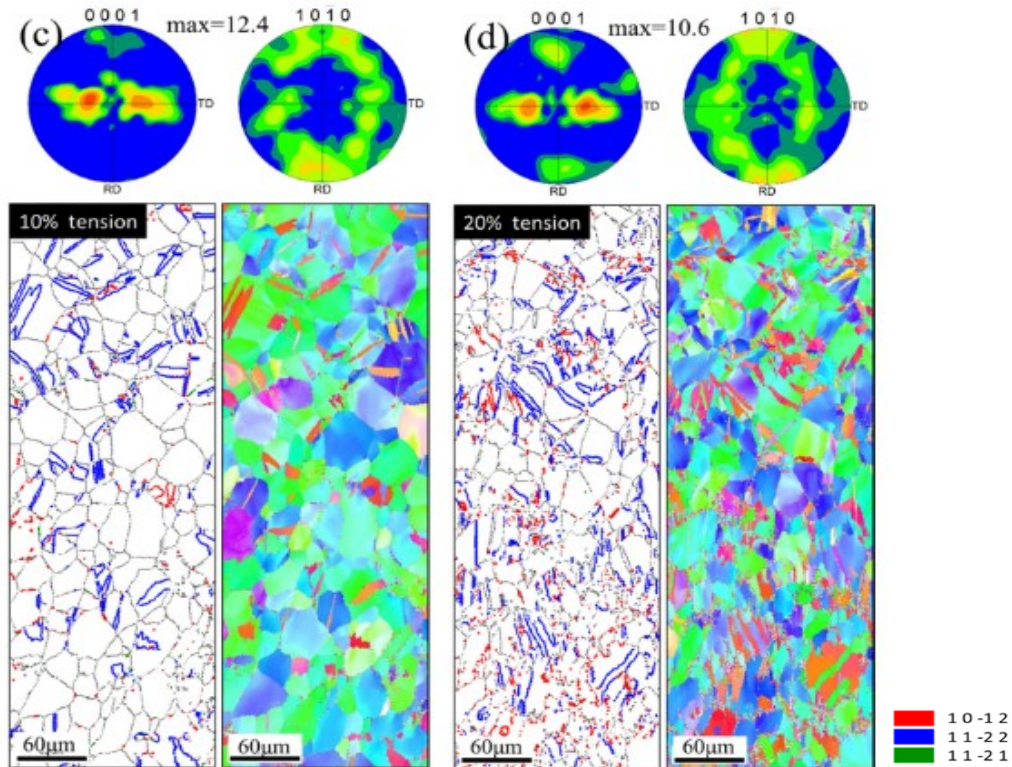


Figura 3. 13: (0001) e (1010) Figuras de pólos (PFs), mapas de Figura de pólo inversa (IPF) e contornos de grãos extraídos obtidos por meio de carregamento monotônico de tração em amostras retiradas na direção de laminação (RD)[11].

3.4 Ensaio de compressão

O ensaio de compressão é um teste no qual se aplica compressão uniaxial em uma amostra por meio de ferramentas rígidas. Este ensaio, entre outras qualidades, se caracteriza por ser mais efetivo nas análises do comportamento mecânico em aplicações para conformação. Outra maneira de avaliar esta propriedade seria por meio do ensaio de tração. Porém a curva tensão de fluxo determinada a partir deste método é limitada devido à estrição que restringe a deformação uniforme a níveis de deformações verdadeira inferiores a 0,5 [12].

Entre os ensaios de compressão comuns, um teste conhecido como ensaio Ford é utilizado para analisar o efeito da compressão no estado plano de deformação com o intuito de analisar o comportamento termomecânico de chapas finas. Para isso, o ideal seria anular totalmente os efeitos do atrito para impedir heterogeneidades das deformações. Na prática, isso é muito difícil independente do lubrificante utilizado. Sendo assim, a amostra é comprimida por punções superior e inferior de largura fina, porém de maiores dimensões em relação à espessura das chapas. A restrição causada pelos ressaltos (material fora da região de trabalho) formados na amostra durante o ensaio, favorece a deformação nas direções dos movimentos dos punções

e no comprimento da amostra, impedindo que o fluxo do material siga em direção à largura. O ensaio no material é realizado utilizando a configuração mostrada na Figura 3.14 [12].

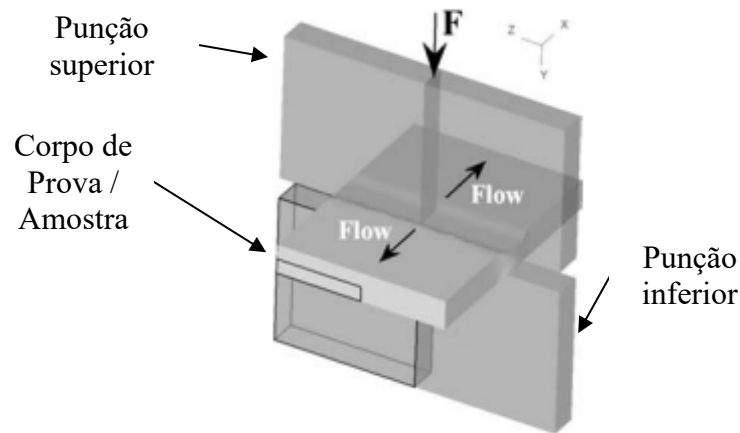


Figura 3. 14: Ilustração da configuração básica do ensaio Ford. Adaptado de [12].

Então para a realização da compressão próxima do ideal, o comprimento (l) da amostra deve ser suficiente de modo que a maior parte do material fique a certa distância da região de trabalho. A Figura 3.15 ilustra os componentes básicos com cotas das variáveis de controle do teste. A largura da amostra deve ser menor que o comprimentos dos punções, ou seja, $B > w$. Pode-se alcançar o máximo de deformação no estado plano se a geometria obedecer à relação $w/b > 5$ [12].

A heterogeneidade de deformação causada no material durante o teste é influenciada principalmente pela razão entre espessura (t) e largura (b). Quanto maior esta razão, maior a heterogeneidade de deformação. Além disso, os efeitos do atrito na carga de compressão também dependem desta razão e são maximizados com a redução da espessura. Logo, para se atingir o máximo de deformação homogênea e provocar o efeito moderado do atrito na carga, recomenda-se manter a razão de acordo com os limites $\frac{1}{4} < \frac{t}{b} < \frac{1}{2}$ [12].

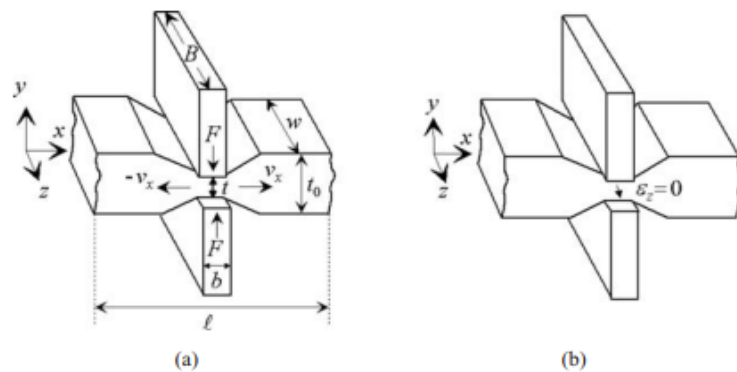


Figura 3. 15: Desenho esquemático das formas e representação das dimensões básicas de alguns elementos do ensaio Ford [12].

Este requisito pode ser atendido mudando para matrizes de menor largura (b) na medida em que a amostra reduz a espessura (t) durante o teste. Desta forma, a amostra pode ser comprimida para uma redução de aproximadamente 90% no estado plano. Esta redução seria equivalente a uma deformação efetiva verdadeira de $\varepsilon = 2,6$ [12].

Caso sejam satisfeitas todas as condições para uma compressão no estado plano de deformação as seguintes equações podem ser aproximadamente válidas para análise do projeto de ensaio [12]:

$$\text{Pressão média de contato:} \quad p = \sigma_y = \frac{F}{wb} \quad (3.3)$$

$$\text{Tensão efetiva:} \quad \bar{\sigma} = \frac{\sqrt{3}\sigma_y}{2} = 0,866\sigma_y \quad (3.4)$$

$$\text{Deformação no sentido da espessura:} \quad \varepsilon_y = \varepsilon_t = \ln \frac{t_0}{t} \quad (3.5)$$

$$\text{Deformação efetiva:} \quad \bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}}\varepsilon_y = 1,155\varepsilon_y \quad (3.6)$$

Os modelos matemáticos da tensão efetiva (3.4) e a equação da deformação efetiva (3.6) são deduzidos levando em consideração o comportamento do material no estado plano de deformação. Neste estado, se considera que ocorre deformação apenas paralelamente em um plano representado. Este plano pode ser visualizado na Figura 3.15 como x-y. Nesta situação $e_z = 0$, assim $de_z = 0$. Considerando a conservação de volume $e_x + e_y + e_z = 0$, então, $e_x = -e_y$. Aplicando a equação $de_z = \frac{de_{ef}}{\sigma_{ef}}[\sigma_z - \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y)]$ de Levi-Mises, considerando $de_z = 0$ e $\sigma_z - \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) = 0$, logo se obtém a relação $\sigma_z = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y)$. Durante o processo de deformação, σ_y é oriundo de um esforço de compressão e para que e_z seja igual a 0, σ_x também deve ser formado a partir de uma força de compressão. Então caso o atrito seja nulo, $\sigma_x = 0$, se obtém a relação $\sigma_z = \frac{1}{2}\sigma_y$. Utilizando-se estas condições no critério de von Mises a equação da tensão efetiva pode ser expressa da seguinte forma: $\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_z - \sigma_y)^2} = \sigma_{ef} = \frac{\sqrt{3}}{2}|\sigma_y| = \sigma_{ef} = 0,866\sigma_y$. No caso da dedução da fórmula da deformação efetiva, como $de_z = 0$, considerando conservação de volume, $d\varepsilon_x + d\varepsilon_y + d\varepsilon_z = 0$, tem-se $d\varepsilon_x = -d\varepsilon_y$. Então, substituindo na equação:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(d\varepsilon_x - d\varepsilon_z)^2 + (d\varepsilon_x - d\varepsilon_y)^2 + (d\varepsilon_z - d\varepsilon_y)^2}, \text{ tem-se}$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3}\varepsilon_y = 1,155\varepsilon_y$$

Um parâmetro importante, que pode interferir na tensão de escoamento, é a velocidade de deformação, expressa por $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$. A variação nos valores de tensões acontecem entre as várias velocidades para uma mesma temperatura e para mesma taxa de deformação a tensão de escoamento pode variar de acordo com a temperatura [3]. Faixas típicas de taxas de deformação são relacionadas a diferentes ensaios mecânicos na Tabela 1:

Močko e colaboradores determinaram curvas tensão-deformação verdadeira de aços a partir de ensaios de compressão em temperatura ambiente utilizando algumas velocidades de deformação. A Figura 3.16 mostra que a tensão de fluxo variou significativamente para taxas de deformação acima de 10^2 s^{-1} em comparação às condições quasiestáticas para todos os aços estudados [13].

Tabela 1: Velocidade de deformação para cada condição [3].

Velocidades de deformação	Condição ou tipo de ensaio
10^{-8} a 10^{-5} s^{-1}	Ensaio de fluência com carga ou tensão constantes
10^{-5} a 10^{-1} s^{-1}	Ensaio de tração estática
10^{-1} a 10^2 s^{-1}	Ensaio dinâmico de tração ou compressão
10^2 a 10^4 s^{-1}	Testes de alta velocidade usando barras de impacto
10^4 a 10^8 s^{-1}	Hipervelocidade de impacto usando canhões de gás ou projéteis explosivos

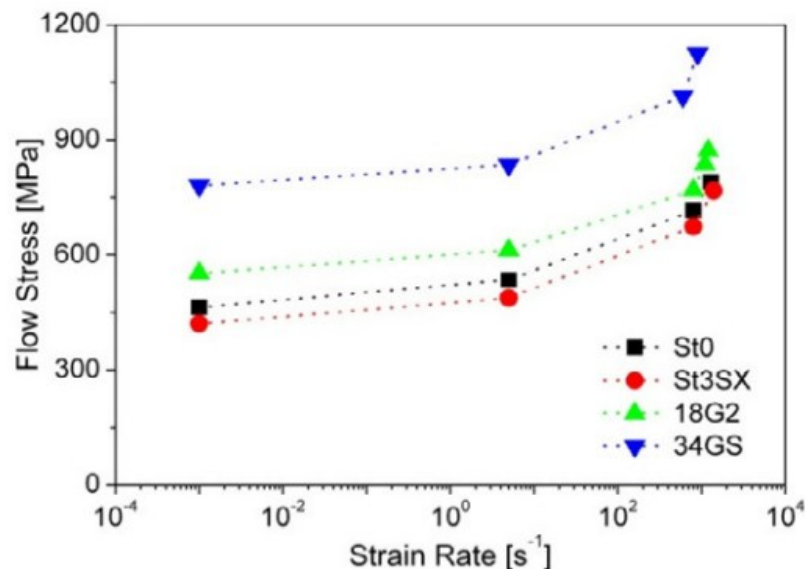


Figura 3. 16: Variação da tensão de fluxo de acordo com a taxa de deformação para deformação igual a 0,1 [13].

3.5 Ensaio de tração

Este teste ocorre no material fixado em uma máquina, por meio da aplicação de uma tração uniaxial com o objetivo de causar um alongamento no corpo de prova. Geralmente para obter as propriedades mecânicas do metal por tração, o corpo de prova é retirado da própria peça processada sendo similar a sua forma geométrica. Desta maneira, a Figura 3.17 mostra a forma padrão de um corpo de prova de peças fabricadas na forma de chapas laminadas. Normalmente, o corpo de prova pode ser dividido em duas seções principais, sendo, parte útil (W) e cabeças do corpo (C). A parte útil é destinada para realização da medição das propriedades mecânicas e a cabeça desenvolvida para fixação na máquina de ensaio [9,12].

A etapa de preparação do corpo de prova é muito importante para a qualidade da precisão dos resultados do teste. Sendo assim, alguns processos são utilizados para garantir a forma geométrica e as medidas de precisão necessárias do corpo de prova como, por exemplo, usinagem por descarga elétrica, fresamento, torneamento e retífica. De maneira geral, a maior vantagem do processo de usinagem por descarga elétrica em relação aos outros seria a precisão nas dimensões. A desvantagem seria o calor gerado na amostra durante a descarga elétrica [15].

A taxa de deformação, conforme já discutido na seção 3.2, também é um parâmetro muito importante no ensaio de tração. Os autores estudaram as propriedades mecânicas nas tiras em material Al-Mg-Si-Cu laminadas a frio e tratadas termicamente, submetidas a diferentes velocidades de deformação por meio do ensaio de tração em temperatura ambiente. Como pode ser observado na Figura 3.18, inicialmente há um aumento dos limites de resistência a tração e escoamento com o aumento da velocidade de deformação. Depois há uma redução destas propriedades quando se aplica a taxa de deformação de 1 s^{-1} . Aumenta novamente aplicando-se 10 s^{-1} e cresce à medida em que se aumenta a velocidade de deformação [16].

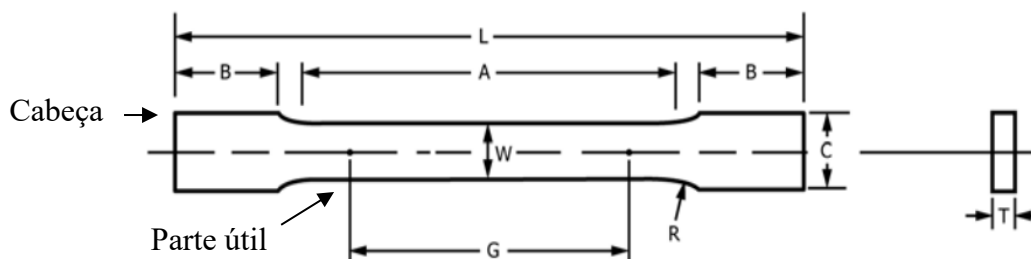


Figura 3. 17: Corpo de prova para ensaio de tração. Adaptado de [14].

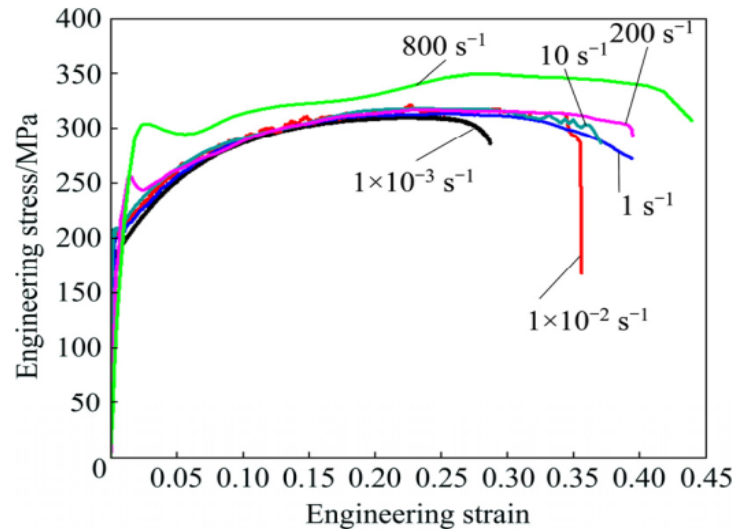


Figura 3. 18: Curvas tensão × deformação da liga Al-Mg-Si-Cu em diferentes taxas de deformação [16].

Com os valores de força e deformação obtidos do ensaio de tração, além das informações das dimensões iniciais do corpo de prova, determina-se as tensões e deformações como valores convencionais ou verdadeiros pelas equações mostradas na Tabela 2 [12]. Assim o diagrama tensão × deformação pode ser construído a partir dos valores determinados.

O formato da curva dependerá da composição química do material, tratamento térmico, histórico de deformações, além das condições do teste como: taxa de deformação, temperatura, entre outros. As propriedades que descrevem a forma da curva do diagrama são: resistência à tração, limite de escoamento, alongamento percentual, redução de área, entre outras. A Figura 3.19 apresenta exemplos de curvas convencional e verdadeira [12].

Tabela 2: Equações para determinação dos valores convencionais e verdadeiros de tensão e deformação. Adaptado de [12].

	Tensão	Deformação
Valor convencional	$\sigma_{nom} = \frac{F}{A_0}$	$e = \frac{\Delta l}{l_0}$
Valor verdadeiro	$\sigma = \sigma_{nom}(1 + e)$	$\varepsilon = \ln(1 + e)$

Sendo σ_{nom} = Tensão de engenharia; σ = Tensão verdadeira; e = Deformação de engenharia; ε = Deformação verdadeira; F = Força; A_0 = Área da seção transversal inicial do corpo de prova; l_0 = Comprimento inicial; Δl = Variação do comprimento

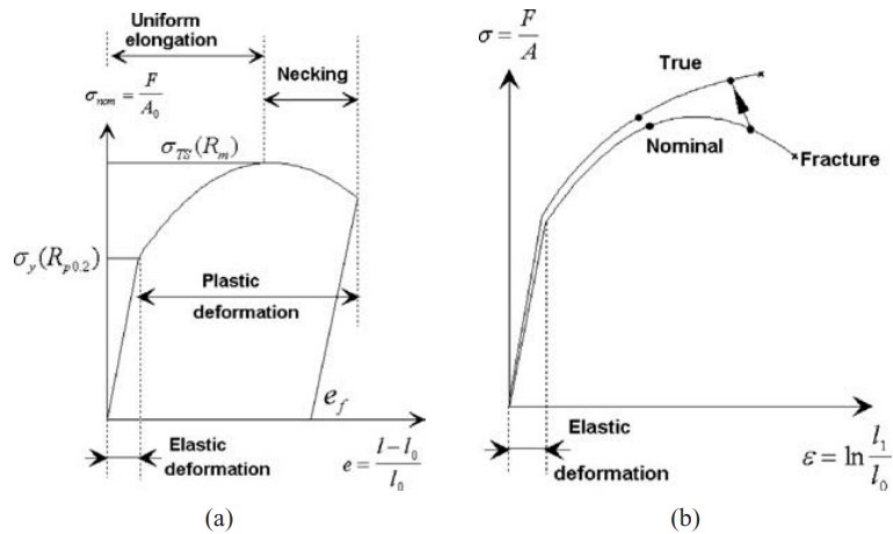


Figura 3. 19: Comportamento de tensão-deformação durante o teste de tração do material. (a) Curva convencional e (b) Curvas convencional e verdadeira mostradas em um mesmo diagrama [12].

Como pode ser visto na Figura 3.19 (a) na curva tensão \times deformação de engenharia, no início do teste, a amostra se deforma elasticamente de forma linear se deformando pouco. Nesta etapa o esforço causa um deslocamento dos átomos. Mas se a amostra for descarregada enquanto estiver no estado elástico, os átomos retornam para as posições originais sem deixar permanecer deformação. Na medida em que o ensaio evolui com as tensões mais elevadas, entretanto, há uma transição repentina onde as deformações tornam-se plásticas. Neste momento os átomos se distanciam de alguma forma que não conseguem mais voltar para suas posições originais. Desta forma, as deformações plásticas permanecerão na amostra após o descarregamento. Analisar o comportamento plástico do metal utilizando esforços de máquinas comuns é possível devido aos defeitos encontrados na rede cristalina. Assim as discordâncias promovem a deformação pelo escorregamento de planos atômicos por meio de cargas relativamente pequenas [9,12].

Durante a primeira parte do teste, antes de atingir o valor máximo da carga, região na qual a amostra está no estado uniaxial de tensões, se considera deformação uniformemente distribuída em todo o corpo, sendo o metal alongado na direção do comprimento, enquanto se reduz na direção radial. Mesmo reduzindo a área da seção transversal as tensões continuam aumentando devido ao encruamento.

Na segunda parte do teste, quando o pico da curva de engenharia é atingido, a amostra começa a estreitar-se localmente, como mostra a Figura. 3.19 (a) (“Necking”). Neste momento se inicia o estado triaxial de tensões e a deformação plástica em outras partes da amostra cessa. Como essas deformações são limitadas para um curto comprimento da amostra, a velocidade

de deformação aumenta consideravelmente quando começa o estreitamento rapidamente da seção transversal em relação ao aumento da carga de deformação pelo encruamento. Desta forma, a carga necessária para deformar a amostra se reduz e a tensão de engenharia semelhantemente continua a reduzir até se alcançar e fratura. Se a velocidade de alongamento for mantida constante, as reduções da seção transversal serão então aceleradas, o crescimento do pescoço será rápido e a fratura ocorrerá no meio do pescoço, logo após o seu início de formação. Por causa disso, as deformações durante o estrangulamento são consideradas instáveis [12].

3.6 Simulação dos ensaios pelo método dos elementos finitos – MEF

A análise numérica pelo método dos elementos finitos (MEF) utiliza um processo que envolve a discretização de um modelo geométrico em um número determinado de elementos. Esses elementos, quando conectados e compartilhando nós, formam uma malha que distribui a quantidade de elementos por unidade de área. A partir dos pontos ou nós, são gerados elementos de forma simples. Em cada nó, são solucionadas equações de difícil resolução analítica que descrevem fenômenos físicos ao longo do tempo, como deformação e transferência de calor. Essas equações são resolvidas de acordo com a reciprocidade de influências entre os nós, dispostos em forma de matriz [17].

Geralmente, quanto maior a densidade da malha, mais próximo de convergir para um mesmo valor será o resultado da simulação numérica, após testes de convergência [17]. A Figura 3.20 mostra um modelo com diferentes densidades de malha e os valores de tensões correspondentes.

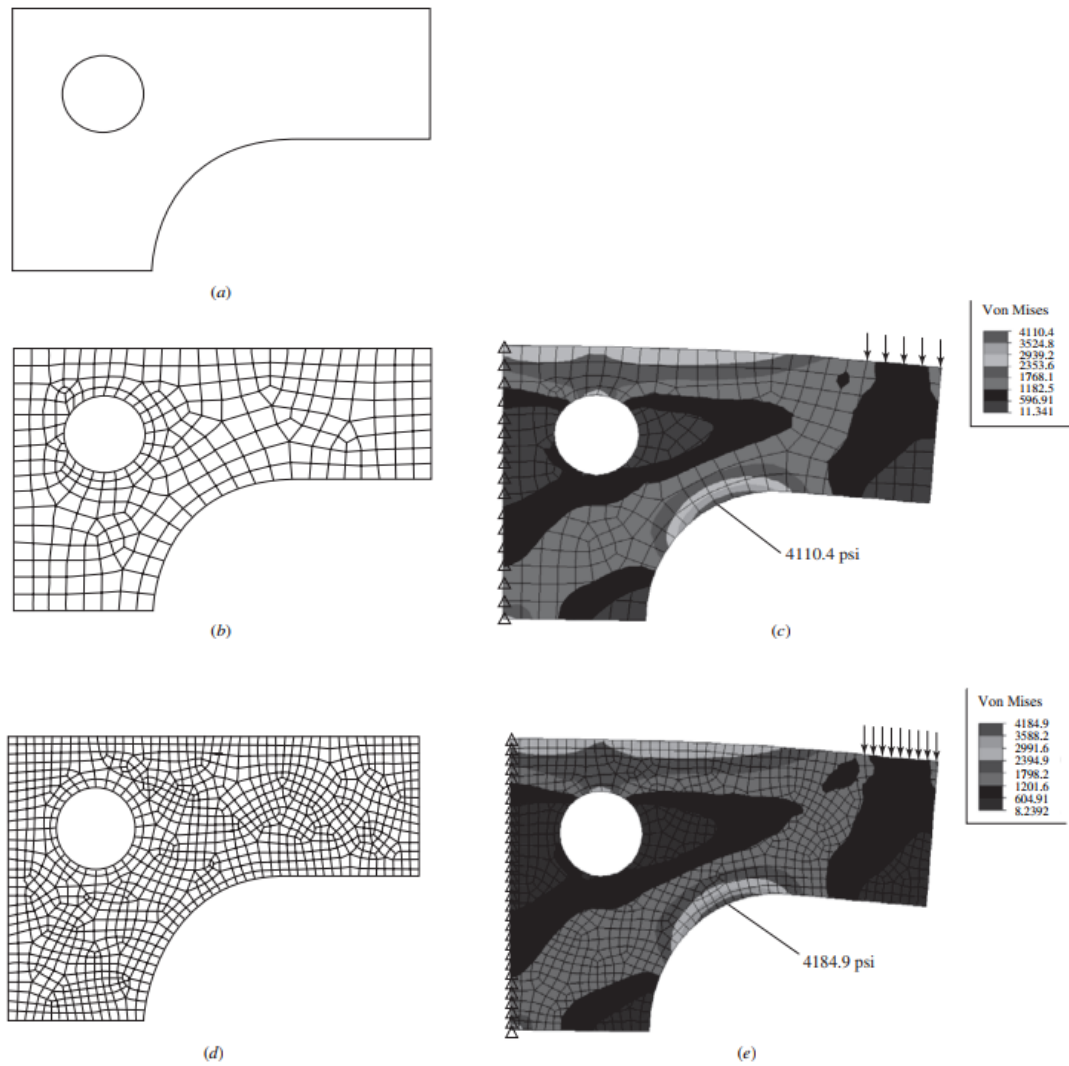


Figura 3. 20: (a) Modelo; (b) malha com 294 elementos e 344 nós; (c) tensões; (d) malha com 1008 elementos e 1096 nós; (e) tensões[19].

O software comercial QForm pode ser uma ferramenta eficiente para realizar estudos em ensaios no estado plano de deformação (PSC). Os parâmetros e recursos utilizados para simular, como, simulação em duas e três dimensões, condições elastoplásticas, ferramentas rígidas, malha refinada e remalha adaptativa automática nas regiões de trabalho, modelo de atrito Levanov, entre outros, apresentaram resultados satisfatórios em uma simulação do ensaio Ford [18]. A Figura 3.21 ilustra a configuração das matrizes e chapas utilizadas para o desenvolvimento da simulação virtual. Conforme orienta a literatura, os dimensionamentos dos modelos obedeceram às relações $w/b > 5$ e $2 \leq b/t \leq 4$ para minimizar o efeito do atrito e compor as condições ideais para a deformação no estado plano [18].

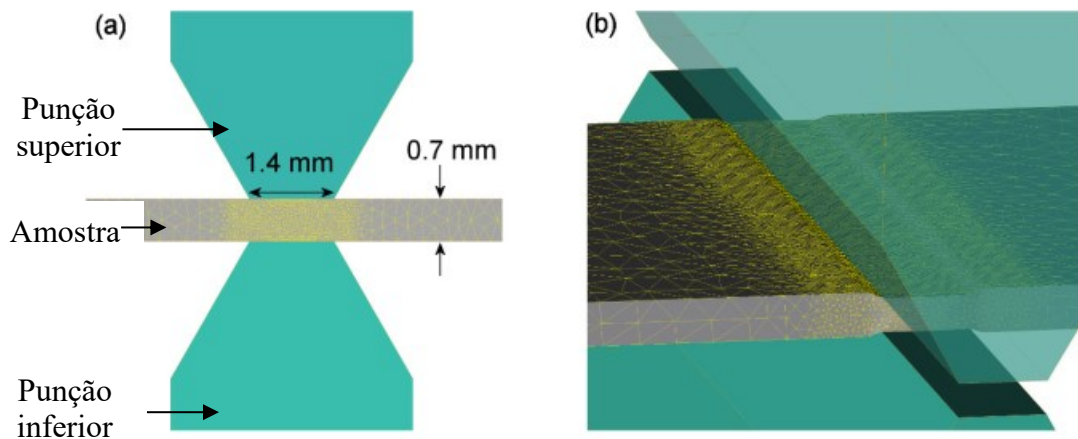


Figura 3. 21: Geometria dos punções e corpos de prova com malhas de elementos finitos em (a) 2D e (b) 3D. Adaptado de [18].

A Figura 3.22 demonstra que as curvas de fluxo do material obtidas a partir das simulações do ensaio PSC ($m = 0$ e $m = 0,15$) mostraram boa concordância com a curva teórica construída a partir da equação do modelo de Hollomon ($\sigma = 200 \text{ MPa } \varepsilon^{0,14}$) utilizada como dado de entrada no software de simulação. Também foi possível analisar a taxa de deformação, distribuição das deformações e as tensões médias na seção transversal da amostra para diferentes reduções, como mostra a Figura 3.23 [18].

A distribuição da taxa de deformação mostra a forma da zona de deformação. É possível perceber que o quanto de homogeneidade da deformação varia de acordo com a magnitude da deformação. Assim, para redução de $\sim 0,63$ mm a zona de deformação apresenta um formato de “X” duplo, altera para um triplo “X” com redução para $\sim 0,47$ mm e formato “W” para redução de $\sim 0,32$ mm. Estas diferenças na forma da zona de deformação estão relacionadas com a relação entre a largura da ferramenta e a espessura atingida na amostra após a redução [18].

A simulação também pode ser eficaz nos estudos em ensaio de tração. Segundo [20], a simulação do ensaio utilizando o software Abaqus/Standard forneceu resultados satisfatórios. Para simular o teste de tração após a realização do teste de convergência para definir os parâmetros de malha e conseguir resultados mais precisos com menor tempo de cálculo, foram utilizados tamanhos de elementos finitos muito pequenos. A Figura 3.24(a) e (b) mostram as dimensões básicas do corpo de prova não convencional e o modelo da parte útil da amostra discretizado por meio da malha de elementos finitos utilizados na simulação.

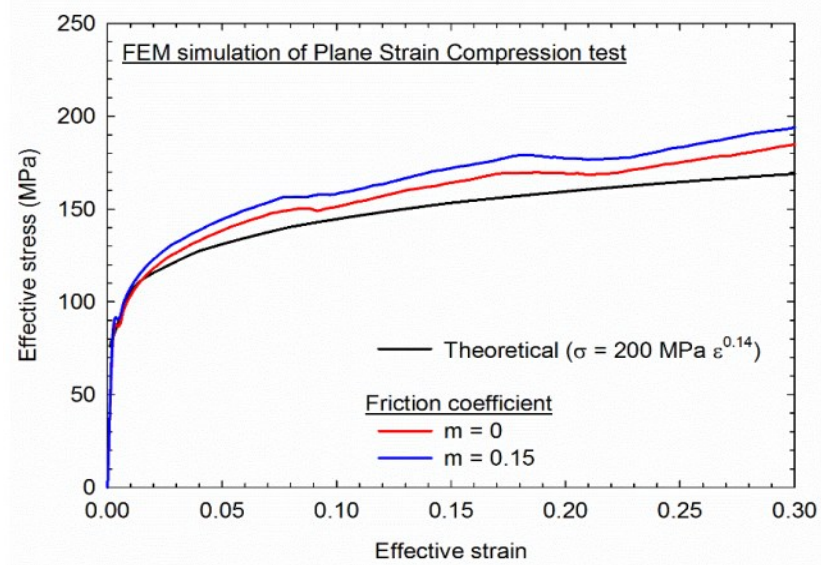


Figura 3. 22: Curvas tensão \times deformação efetiva obtidas das simulações no PSC considerando diferentes coeficientes de atritos [18].

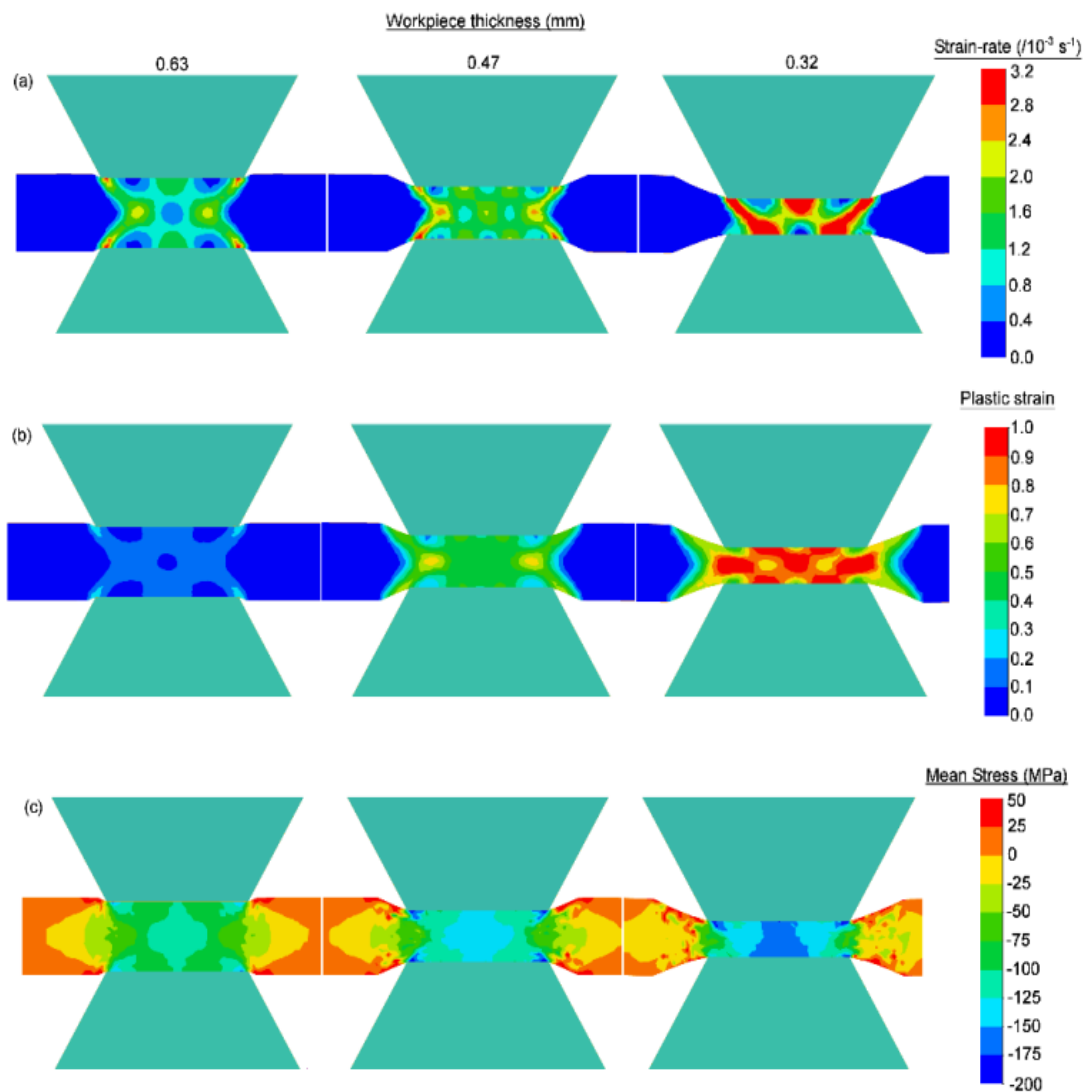


Figura 3. 23: Distribuições: (a) taxa de deformação, (b) deformação plástica e (c) tensão média em diferentes estágios no PSC considerando condições em 2D[18].

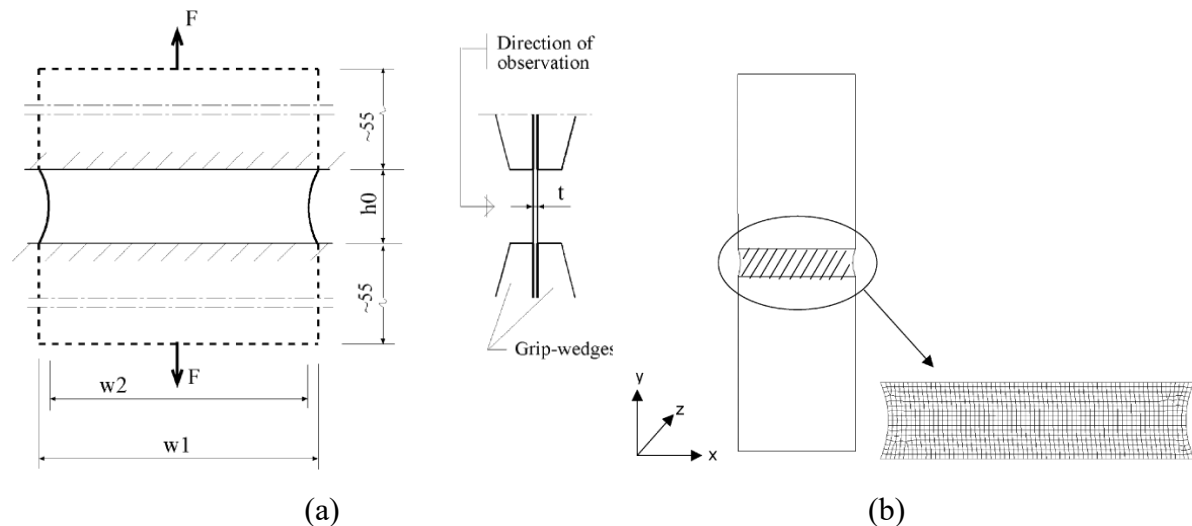


Figura 3. 24:: Modelo do corpo de prova utilizado no ensaio de tração. Adaptado de [20].

A Figura 3.25 compara resultados simulados e experimentais das distribuições de deformação na amostra imediatamente antes da ruptura. Os resultados das simulações virtuais ficaram próximos dos resultados experimentais. Os autores investigaram a influência do tamanho do entalhe (parte útil do corpo de prova) nas distribuições de tensões e deformações por meio de simulações numéricas utilizando quatro dimensões de entalhe. A Figura 3.26 apresenta, por meio de um corte na seção, os resultados que mostram a influência do tamanho do entalhe na distribuição de deformações. No centro da amostra a deformação atingiu aproximadamente 40%. Ainda se observa que o tamanho do entalhe tem muita influência nas bordas e não no centro da amostra. Quanto maior o entalhe, maior os níveis de deformação e maior o risco de induzir fratura nas bordas e não na região central desejada da amostra onde se aplicam as condições de deformação plana. Em testes práticos, várias amostras com tamanho de entalhe considerado grande tiveram fraturas nas bordas.

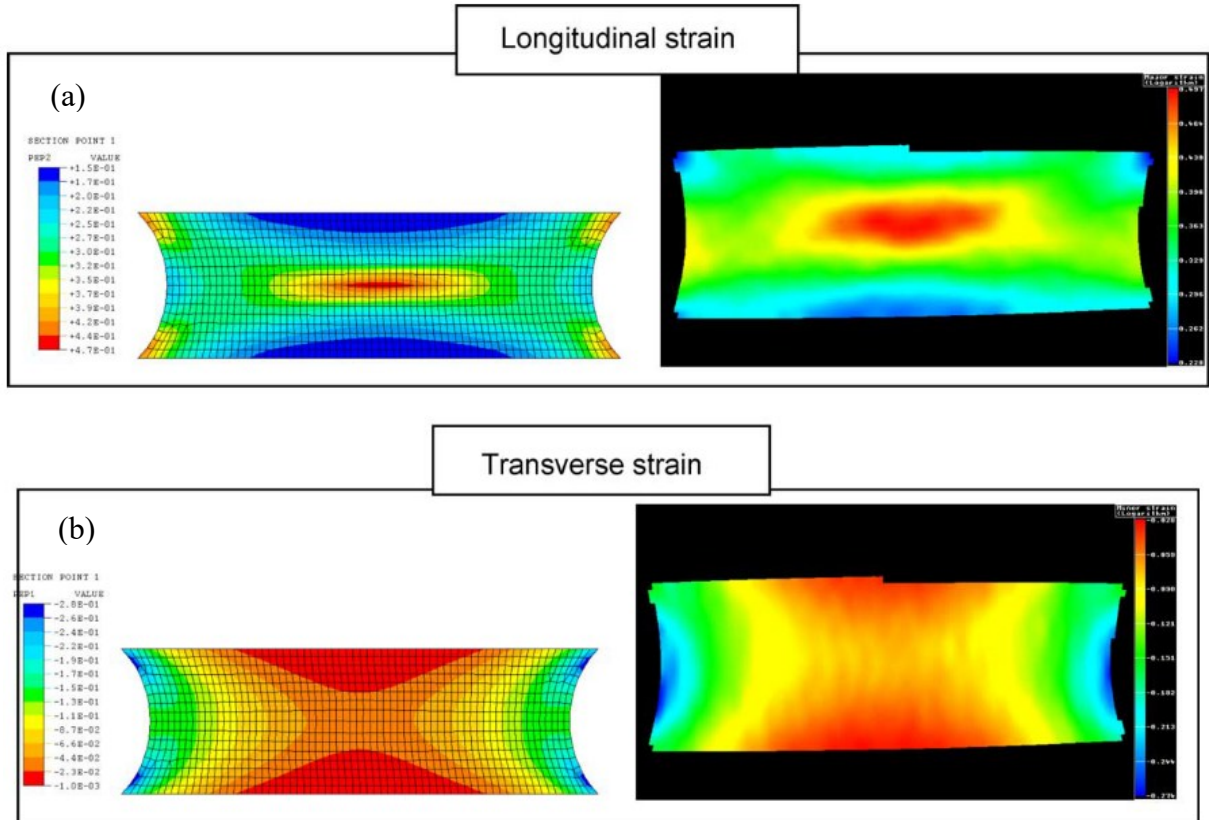


Figura 3. 25: Comparação dos resultados das distribuições de deformações entre simulação(lado esquerdo) e experimento(lado direito), sendo, deformação longitudinal (a) e deformação transversal (b) antes da fratura. Adaptado de [20].

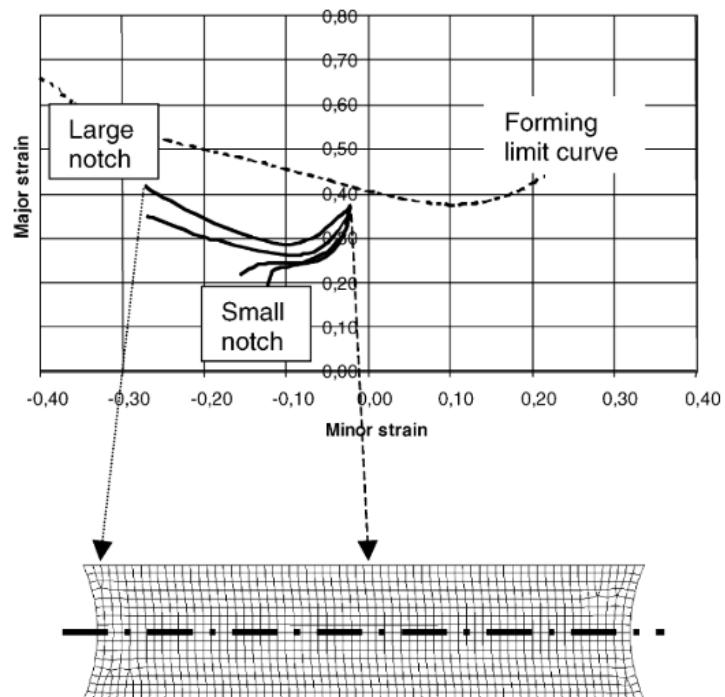


Figura 3. 26: Gráfico que demonstram as deformações por meio de um corte no centro em quatro amostras com diferentes tamanhos de entalhe [20].

Observou-se alterações no estado de deformação e nos limites para fratura nos resultados da simulação, como mostra a Figura 3.27. Verificou-se que quanto menor a largura (w_1) da amostra, mais próximo de ocorrer deformação no estado uniaxial de tensão. Uma outra maneira de acontecer isso, sem reduzir tanto a largura da amostra, seria aumentar o comprimento (h_0) da região de deformação (parte útil do corpo de prova).

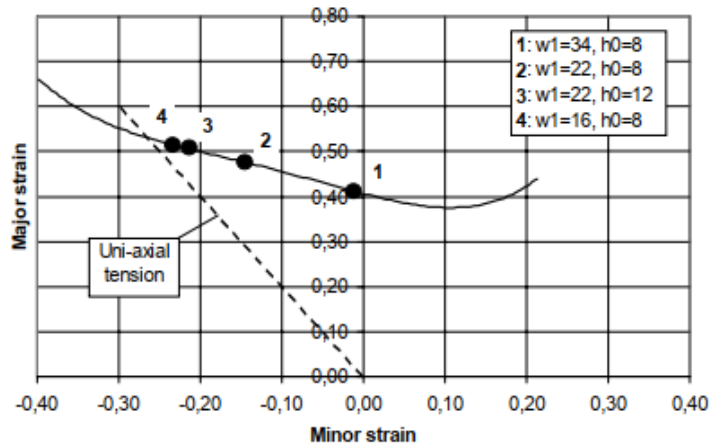


Figura 3. 27: Gráfico que mostra a influência da largura das amostras e comprimento do entalhe no estado de deformação e na fratura [20].

4. METODOLOGIA

O estudo do ensaio de tração em chapas finas preparadas por meio da operação de compressão no estado plano de deformação foi desenvolvido em duas etapas: análise experimental e simulação computacional.

Os experimentos físicos foram realizados no Laboratório de Conformação a Quente e Laboratório de Ensaio Mecânicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET) da Escola de Engenharia da UFMG. Foram executados os seguintes procedimentos, conforme indicado na Figura 4.1: (i) Laminação a quente da barra de cobre; (ii) Recozimento para recristalização da microestrutura; (iii) Laminação a frio; (iv) Recozimento; (v) Ensaio Ford; (vi) Recozimento e (vii) Ensaio de Tração.

Os experimentos virtuais desenvolvidos por simulação computacional pelo método dos elementos finitos, envolveu as etapas: (i) Ensaio Ford e (ii) Ensaio de Tração.

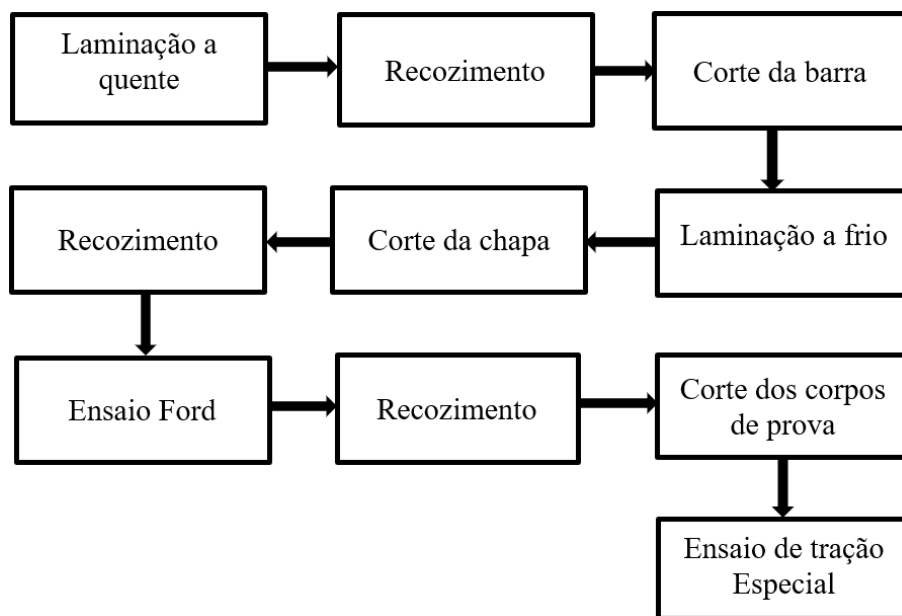


Figura 4. 1: Fluxograma das etapas experimentais [próprio autor].

4.1 Material e Procedimento experimental

O material selecionado para o estudo foi o cobre com pureza de 99,8%. O metal foi fornecido no estado recozido no formato de barras com dimensões de $15 \times 30 \times 100$ mm. Antes do corte, laminação a frio, ensaios de compressão e tração, a matéria prima foi submetida a um processamento de laminação a quente para espessura de 2 mm, seguido de recozimento a fim de homogeneizar a microestrutura. Por meio desta transformação foi produzida amostra nas dimensões de $2 \times 30 \times 750$ mm. A Figura 4.2 mostra a chapa após este processamento. Em seguida, as chapas foram laminadas a frio até a espessura de 1 mm, cortadas e recozidas à 300°C por 10 minutos para restauração da microestrutura. A Figura 4.3 mostra a chapa após a laminação e recozimento cortada em três partes (A, B e C) nas dimensões de $1 \times 35 \times \sim 130-155$ mm, desconsiderando ponta e calda, como representado na Figura 4.4(a).



Figura 4. 2: Chapa após a laminação a quente para 2 mm de espessura e recozimento [próprio autor].

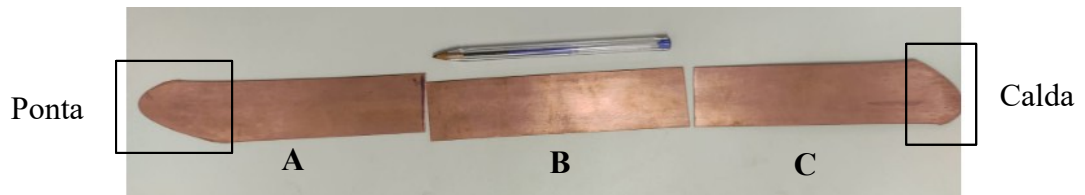


Figura 4. 3: Chapa após a laminação a frio para 1mm e recozimento [próprio autor].

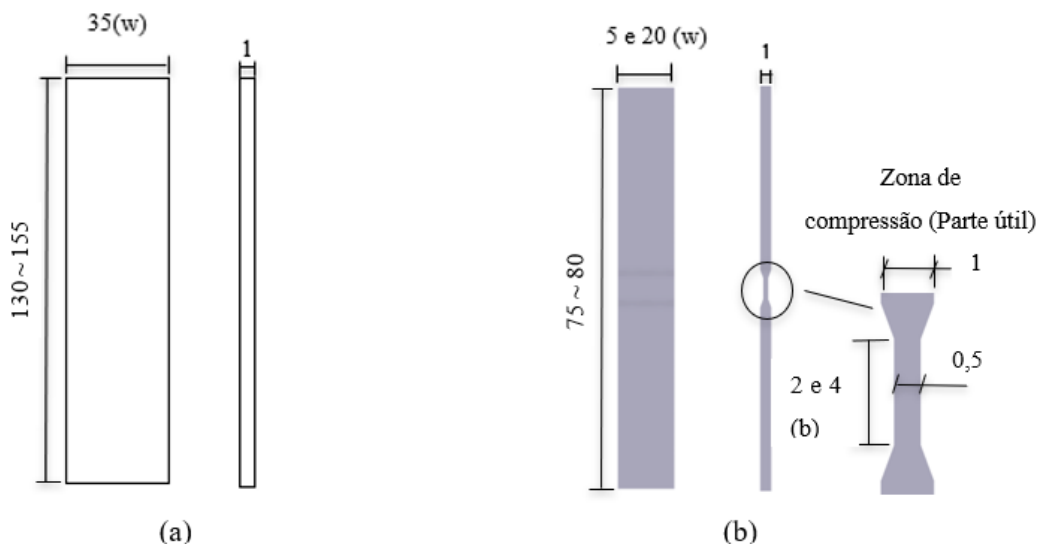


Figura 4. 4: Desenho esquemático em milímetros: (a) Corpo de prova laminado e recozido preparado para o ensaio Ford. (b) Corpo de prova após o teste Ford preparado para o ensaio de tração. [próprio autor].

Nas chapas A, B e C foi realizado o Ensaio Ford com redução de espessura de 1 (t_0) até 0,5 mm (t_f), sendo que, na chapa B considerou-se matriz com largura de 4 mm e nas chapas A e C matriz com largura de 2 mm. Em seguida, para realização do Ensaio de Tração em duplicata, foram cortados oito corpos de provas (chapas) com larguras de 5 e 20 mm e comprimento total de 75 ~ 80 mm. Sendo que, quatro (4) ficaram com a largura da zona de compressão com 2 mm e quatro (4) permaneceram com a largura de 4 mm. A Figura 4.4 (b) ilustra os corpos de prova especiais de tração, obtidos a partir dos ensaios de compressão no estado plano de deformação.

A fim de determinar o material de entrada para as simulações numéricas foi realizado ensaio de compressão no estado plano de deformação até a espessura de ~0,15 mm. A temperatura de aquecimento e o tempo de encharque do recozimento utilizados após a laminação e o ensaio Ford foram 300°C e 10 minutos. Esses parâmetros são consistentes com estudos recentes e objetivaram promover a recristalização completa da microestrutura [22,23]. A partir dos resultados encontrados foram desenvolvidas curvas de fluxo com auxílio do Excel utilizando as equações 5.1 a 5.7 para análise e comparação dos resultados a fim de validar o método proposto. Nas próximas seções será detalhado o ferramental e procedimento experimental utilizado no Ensaio Ford e no Ensaio de Tração com os corpos de prova especiais.

4.1.1 Ensaio Ford

A preparação dos corpos de prova para o Ensaio de Tração foi realizada por meio do Ensaio Ford. A Figura 4.5, ilustra simplificada os perfis dos punções e a forma final da chapa de teste após a compressão. As dimensões dos punções e das chapas foram escolhidas de acordo com dados da literatura [12,18] e a capacidade de carga e características dos equipamentos dos ensaios de compressão e tração.

Os ensaios de compressão para reduzir a seção transversal da chapa até a espessura de 0,5 mm foram realizados utilizando uma máquina de ensaios universal INSTRON 5582 com capacidade de carga de 100 kN. Os experimentos foram realizados em temperatura ambiente com taxa de deformação inicial de $10^{-3} s^{-1}$ por meio do uso das matrizes apresentadas na Figura 4.6. Foram utilizados pares de punções com largura (b) de 2 e 4 mm, sendo que o comprimento das matrizes é superior à largura das chapas. Durante o ensaio, a amostra foi comprimida pelos punções por incrementos de força predefinidos. A espessura e largura instantânea foi medida diretamente na zona de deformação por meio de um paquímetro digital com resolução de 0,02 mm. As superfícies de contato foram lubrificadas com bissulfeto de molibdênio a cada incremento para minimizar a heterogeneidade de deformação [21].

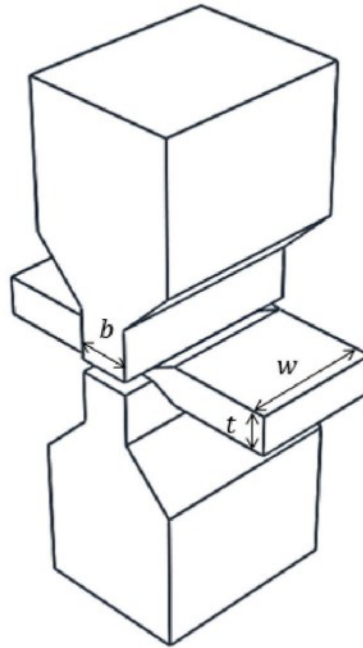


Figura 4. 5: Modelos de punções e amostra utilizados no ensaio Ford. Adaptado de [21].

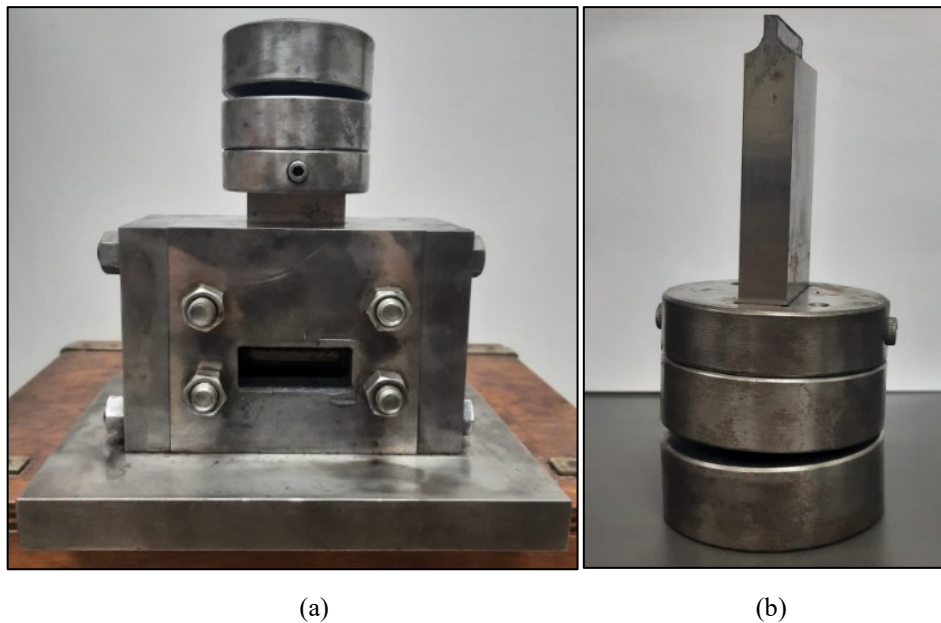


Figura 4. 6: Sistema experimental utilizado no Ensaio Ford na UFMG.

A carga registrada imediatamente antes de cada interrupção do ensaio Ford e a espessura medida após o descarregamento foram utilizadas para calcular a relação entre tensão (σ) e deformação (ϵ) efetiva por meio das equações 3.3 a 3.6, em que a chapa teve sua espessura reduzida de 1,00 até 0,15 mm. Os dados individuais foram utilizados na regressão estatística da equação de fluxo plástico do material segundo o modelo de Hollomon.

4.1.2 Ensaio de Tração

As amostras para os Ensaio de Tração após Ensaio Ford, recozimento e corte foram classificadas de acordo com as dimensões da zona de compressão, conforme mostra a Tabela 3. As dimensões da Tabela 3 podem ser mais bem visualizadas pela análise conjunta com a Figura 4.4(b), já apresentada neste documento.

Os ensaios foram executados à temperatura ambiente, utilizando uma máquina de ensaios universal INSTRON 5582, com taxa de deformação inicial de $10^{-3} s^{-1}$, de modo que os corpos de prova foram tracionados na direção axial até seu rompimento. De posse dos resultados de força e deslocamento na região do comprimento útil dos corpos de prova, foram construídas curvas tensão \times deformação efetiva. Tal procedimento de cálculo foi determinado a partir dos resultados das simulações numéricas, de modo que, dependendo da largura dos corpos de prova, foi considerada a prevalência do estado plano de deformação ou uma condição intermediária entre tração uniaxial e estado plano de deformação. Para permitir uma melhor clareza do procedimento de tratamento de dados, as equações utilizadas no procedimento serão apresentadas na seção 5.1.2, em conjunto com os resultados das simulações numéricas.

Tabela 3: Classificação da chapa (amostra) de acordo com a zona de compressão (trabalho)

Tipo da amostra	Quantidade	Dimensões da zona de trabalho (mm)		
		Espessura	Largura	Comprimento
A	2	~0,5	~5	~2
B	2	~0,5	~20	~2
C	2	~0,5	~5	~4
D	2	~0,5	~20	~4

4.2 Modelagem das simulações numéricas por elementos finitos

Para investigação mais detalhada dos efeitos das dimensões da zona de trabalho no comportamento de tensão-deformação durante os ensaios de tração, foram realizadas simulações numéricas pelo método dos elementos finitos por meio do software QForm UK.

A equação de fluxo plástico considerada nos modelos foi obtida por meio da execução experimental do Ensaio Ford. Os dados coletados até a deformação plástica efetiva (ϵ_{ef}) de $\sim 1,50$, foram ajustados segundo o modelo de Hollomon em que a tensão efetiva de Von Mises, $\sigma_{ef}(\text{MPa}) = 379,05\epsilon_{ef}^{0,2291}$, resultante da regressão estatística a partir dos dados experimentais.

O desenvolvimento dos modelos geométricos dos punções e amostras conforme Figuras 4.4 e 4.5 foram construídos com auxílio de um software CAD nas dimensões conforme descritos na seção 4.1 e posteriormente importados para o software de simulação. A geometria da zona de compressão, resultado do ensaio Ford, foi considerada no modelo do corpo de prova para os ensaios de tração. O histórico de deformações oriundos do teste Ford não foi considerado nas chapas para simulações numéricas do ensaio de tração, uma vez que na prática, foi realizado recozimento para restauração da microestrutura após ensaio Ford.

Para a simulação numérica foi realizado teste de convergência para construção da malha com base nas literaturas[5, 12, 18, 20]. Desta maneira, as malhas adaptativas na forma triangular e tetraédricas e o modelo de representação, foram desenvolvidos de acordo com as informações resumidas nas Tabelas 4 e 5 e Figuras 4.7 e 4.8, sendo que nas zonas de deformação das chapas de ambos os ensaios e nas matrizes do ensaio Ford, foram inseridos elementos finitos menores.

Foram atribuídas as seguintes propriedades ao cobre: i) densidade = 8300 kg/m^3 , (ii) módulo de Young = 117 GPa e (iii) coeficiente de Poisson = $0,30$. Na simulação foram desconsideradas as deformações elásticas e adotou-se um coeficiente de atrito de $0,1$.

Tabela 4: Parâmetros de simulação para os testes de convergência.

Ensaio	Ford						Tração	
	Deformação no estado plano - 2D						3D (1/8 da geometria)	
Representação								
Configuração	A	B	C	A	B	C	A	B
Tempo máximo do passo (s)	0,25	0,125	0,125	0,25	0,125	0,125	0,1	0,1
Máximo incremento de deformação	0,05	0,025	0,0125	*	*	*	0,1	0,1
Tamanho máximo do elemento na zona de trabalho (mm)	0,05	0,025	0,0125	0,05	0,025	0,0125	0,25	0,125

Tabela 5: Parâmetros de simulação definidos para os ensaios virtuais

Ensaio	Ford	Tração
Representação	Deformação no estado plano - 2D	3D (1/8 da geometria)
Tempo máximo do passo (s)	0,125	0,1
Máximo incremento de deformação	0,025	0,1
Tamanho máximo do elemento na zona de trabalho (mm)	0,025	0,125

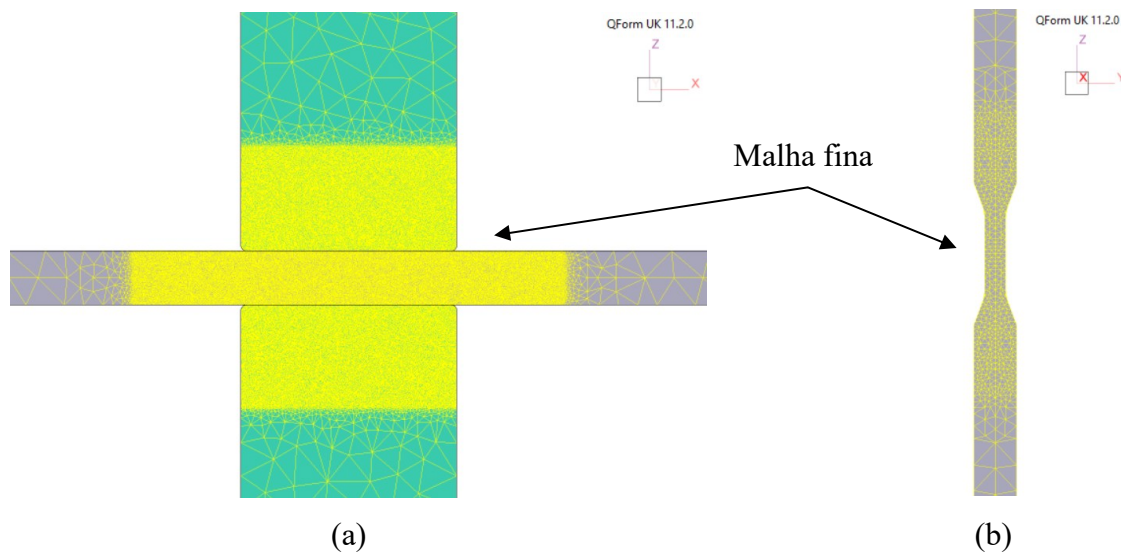


Figura 4. 7: Geometrias dos ensaios com as malhas: Ford (a) e Tração (b)

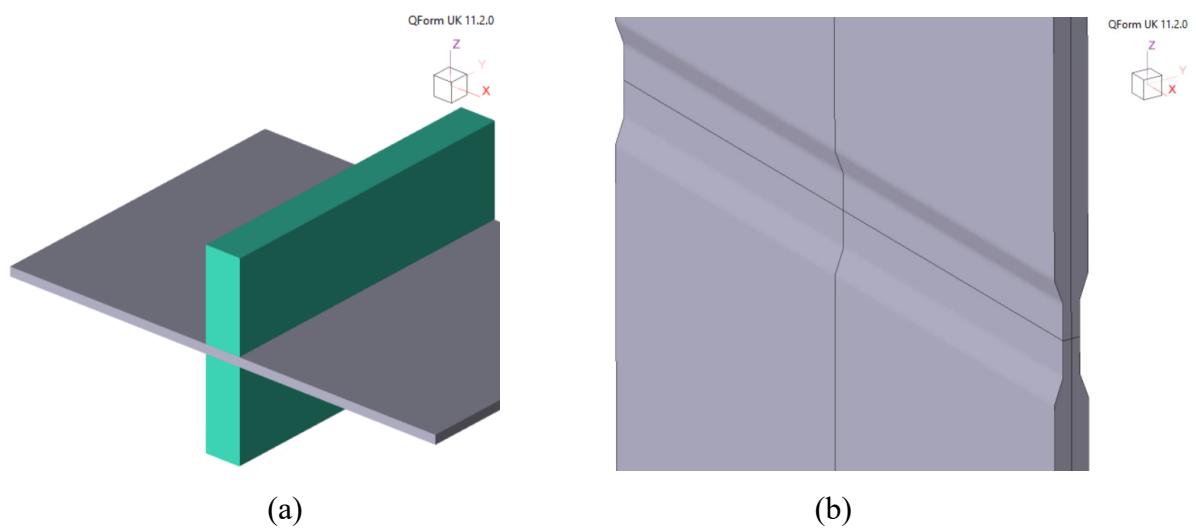


Figura 4. 8: Representação dos ensaios: Ford no plano 2D (a) e Tração 3D 1/8 da geometria (b).

5. RESULTADOS

5.1 Ensaio virtuais

5.1.1 Testes de Convergência

A Figura 5.1 exibe as curvas de fluxo plástico construídas a partir dos dados de força versus deslocamento da matriz superior extraídos dos resultados da simulação dos ensaios Ford, calculados com diferentes tamanhos máximo de elementos da malha (em mm) na zona de compressão da chapa. Para os cálculos da tensão efetiva (σ_{ef}) e deformação efetiva (ε_{ef}) no estado plano de deformação, baseado na “colina de fricção”, que considera o efeito do atrito, assumindo o modelo de atrito de Coulomb [24], foram utilizadas as equações 3.5, 3.6 e 4.1:

$$\text{Tensão efetiva: } \sigma_{ef} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{F}{bw} \right) \left(\frac{\mu b}{\bar{h}} \right)}{e^{\frac{\mu b}{\bar{h}}} - 1} \quad (4.1)$$

sendo σ_{ef} = tensão verdadeira efetiva; F = força; b = largura da matriz; w = largura da chapa; μ = coeficiente de atrito; \bar{h} = Espessura média da chapa resultante dos passes anterior e atual.

Verifica-se convergência mais satisfatória e com menor perturbação nos perfis de curva com as malhas 0,025 e 0,015 mm. De maneira geral, o perfil de todas as curvas teve boa convergência com a curva do material de entrada (Dados de referência) para simulação.

A Figura 5.2 apresenta comparação das curvas de fluxo plástico construídas a partir dos dados de força da matriz superior versus deslocamento na direção da redução de espessura da chapa extraídos dos resultados da simulação dos ensaios de tração calculadas com diferentes tamanhos máximo de elementos de malha na zona de deformação das chapas por meio das equações 5.3 e 5.4 apresentadas à posteriori na seção 5.1.2 para permitir melhor detalhamento do procedimento de cálculo.

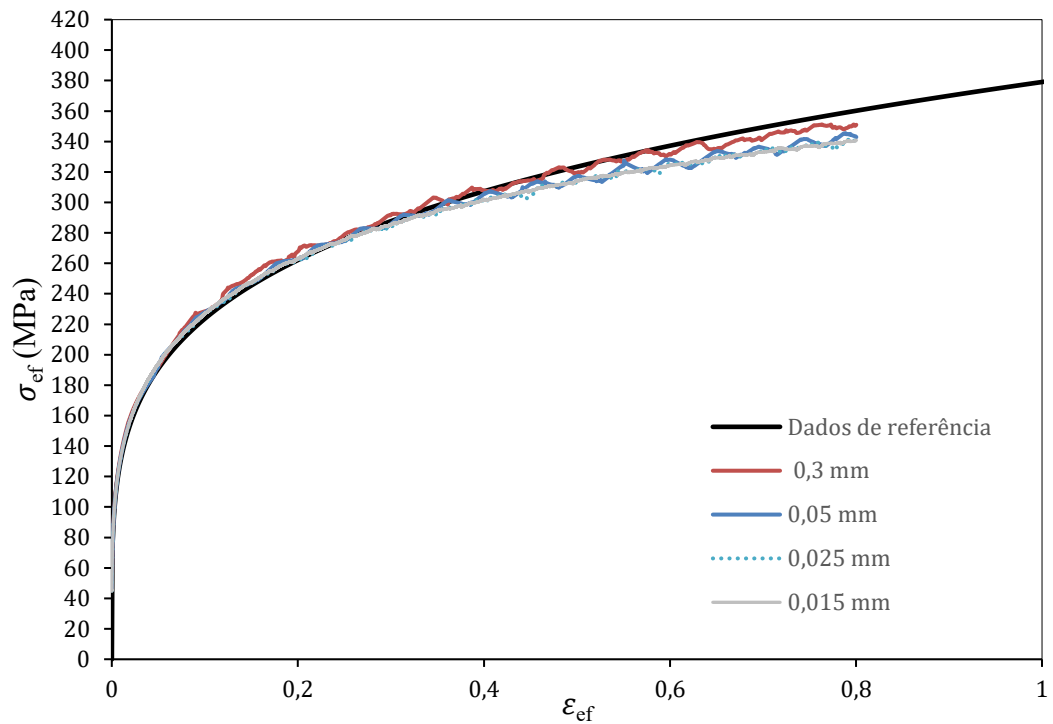


Figura 5. 1: Comparativo das curvas de fluxo plástico obtidas das simulações do ensaio Ford realizados com quatro tamanhos dos elementos finitos e a curva de fluxo obtida experimentalmente via ensaio Ford e usada como propriedade constitutiva do material nas simulações [próprio autor].

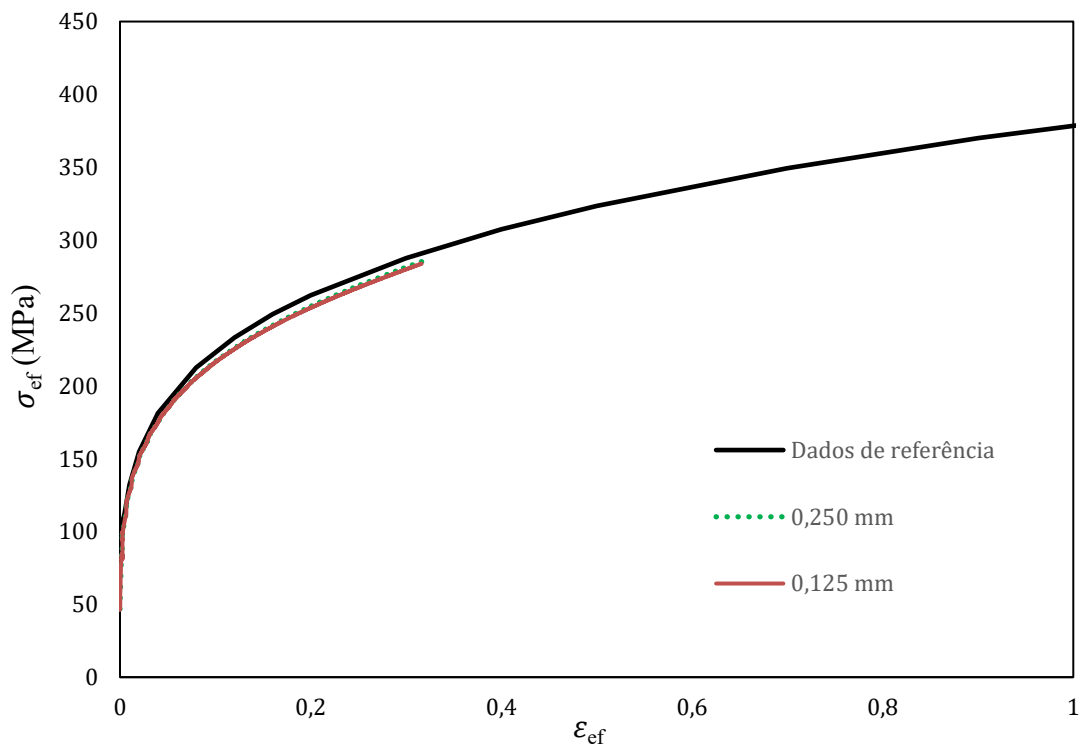


Figura 5. 2: Comparativo das curvas de fluxo plástico obtidas das simulações do ensaio de tração da amostra C (largura de 20mm e comprimento útil da zona de deformação de 2mm) realizados com dois tamanhos dos elementos finitos e a curva de fluxo obtida do ensaio experimental Ford [próprio autor].

Observa-se boa convergência nas curvas resultante das simulações com ambas as malhas quando comparadas com a curva de referência adotada nas simulações. Além disso, verifica-se convergência no ensaio de tração utilizando-se tamanho de elemento máximo de malha maior em relação ao outro ensaio, o que pode ser justificado pela necessidade maior de cálculos para consideração do efeito do atrito no caso do ensaio Ford.

Diante dos resultados apresentados pelos testes de convergência, foram definidos tamanho de elemento máximo da malha de 0,025 mm para ensaio Ford e 0,125 mm para ensaio de tração. Demais parâmetros da malha estão descritos em detalhes na Tabela 5 da seção 4.2.

5.1.2 Determinação da relação $\sigma_{ef} \times \epsilon_{ef}$

Com o resultado obtido por meio da simulação do ensaio de tração em chapas com a geometria preparada pela compressão do ensaio Ford, foi possível estimar a relação entre a tensão efetiva e a deformação plástica efetiva pela obtenção de dados obtidos da força resultante na direção **Z** (**F**) e deslocamento longitudinal do corpo de prova ou variação da espessura em sua zona de deformação. O procedimento de cálculo considerou o estado de tensões e deformações prevalente durante o ensaio até o aparecimento da estrição.

A Figura 5.3 mostra os gradientes de tensão na direção longitudinal (**Z**) e lateral (**X**) das chapas para valores de deformação efetiva no centro geométrico iguais a $\sim 0,31$. A tensão na direção **Y** nas chapas não foi apresentada porque os valores encontrados foram muito próximos de zero. Como mostrado na Figura 5.3 (a), (d) e (e), as amostras A, D e E apresentaram valores de tensões nas direções **X** bem próximo de zero. Essa condição é uma característica de um material que se deformou por meio do estado uniaxial de tensões.

Já a Figura 5.3 (c) demonstra que a amostra C apresentou valor de tensão na direção **X** correspondente a metade da tensão na direção **Z**. Tal cenário é particularidade de uma chapa que se deformou por meio do estado plano de deformação. As situações das amostras B e F podem ser observadas nas Figuras 5.3 (b) e (f). As imagens mostram que o valor da tensão na direção **X** apresenta uma magnitude entre zero e a metade da tensão na direção **Z**, ou seja, valor intermediário em relação ao comportamento apresentado pelas outras amostras.

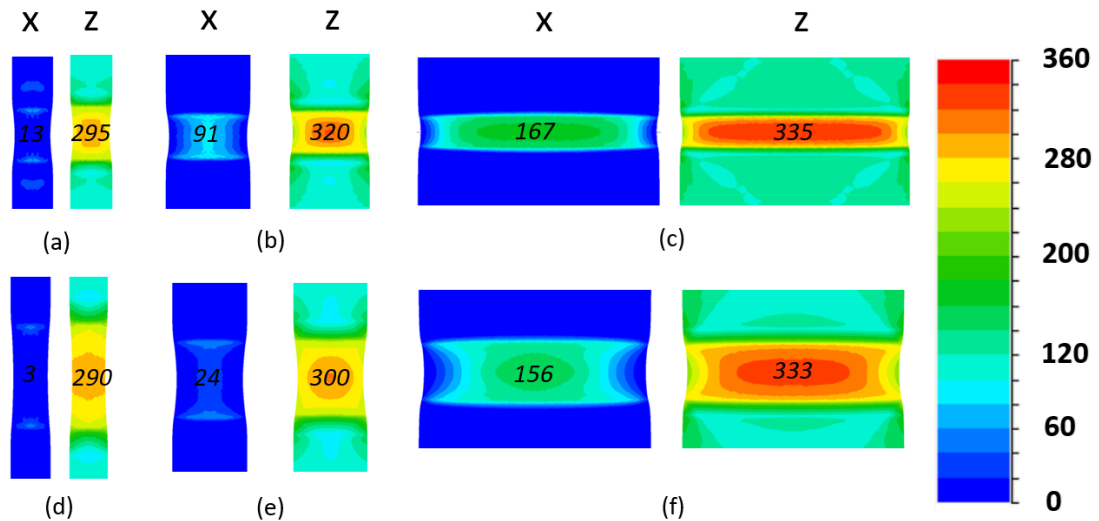


Figura 5. 3: Magnitude das tensões (MPa) nas direções X e Z na porção central da chapa no momento do início da estricção. Chapa A (a), Chapa B (b), Chapa C (c), Chapa D (d), Chapa E (e), e Chapa F(f),

Com base nos estados de tensões e deformações observados nas amostras por meio da Figura 5.3, foram definidas as equações e tipos dos dados para os cálculos e construção das curvas de fluxo. As Figuras 5.4 a 5.9 mostram as curvas de fluxo plásticas desenvolvidas a partir dos resultados das simulações comparadas com a curva de fluxo construída a partir do ensaio experimental Ford. Verifica-se boa concordância entre as curvas.

As curvas de fluxo das amostras A, D e E são mostradas nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6. Essas curvas foram construídas por meio das equações 5.1 e 5.2, uma vez que os corpos de prova de cobre exibiram comportamento bem próximo do estado uniaxial de tensões como mostra a Figura 5.3(a), (d) e (e). Observa-se ainda que nessa condição o estado de deformação é uniforme em praticamente todo o volume da parte útil, especialmente na zona central. Logo, foi possível utilizar os dados de deslocamento longitudinal (direção Z) do corpo de prova nas equações para determinar as curvas com diferenças bem pequenas em relação à curva de referência.

$$\begin{array}{l} \text{Tensão} \\ \text{efetiva} \end{array} \quad \sigma_{ef} = \left(\frac{F}{w_0 t_0^{\text{Tração}}} \right) (1+e) \quad (5.1)$$

$$\begin{array}{l} \text{Deformação} \\ \text{efetiva} \end{array} \quad \varepsilon_{ef} = \ln(1+e) \quad (5.2)$$

sendo σ_{ef} = tensão verdadeira efetiva; e = deformação de engenharia; ε_{ef} = deformação verdadeira efetiva; F = força; t_0 e w_0 = espessura e largura iniciais da zona de trabalho da chapa, respectivamente.

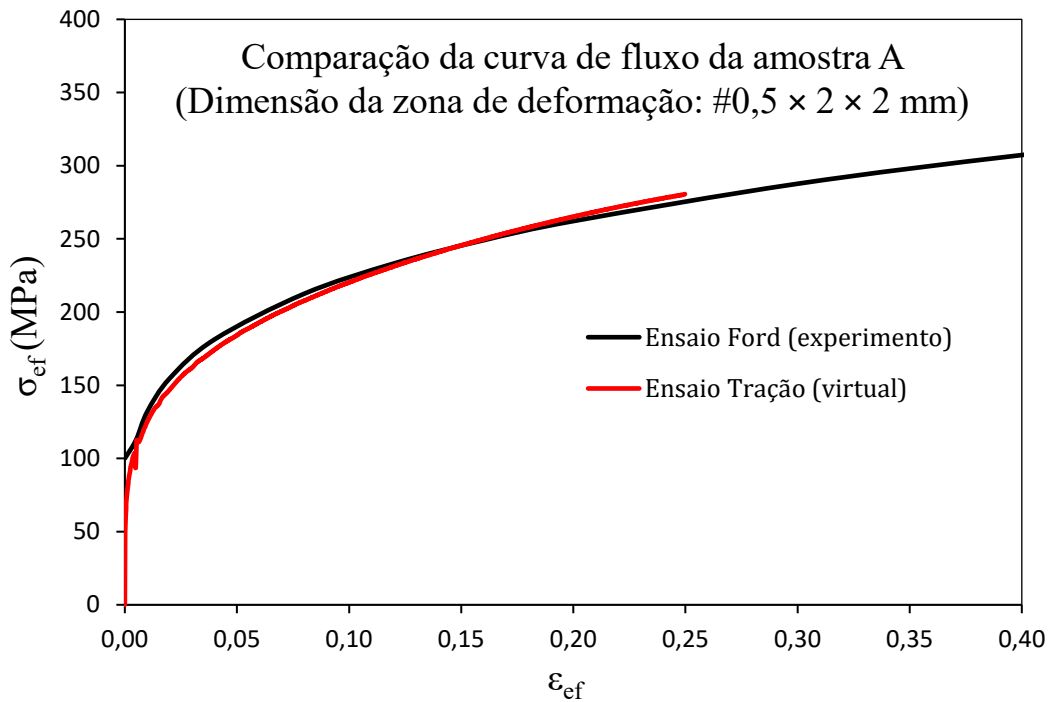


Figura 5. 4: Compara o entre as curvas de fluxo construídas a partir dos resultados do ensaio de tração(virtual) da chapa A e ensaio Ford (experimental) [próprio autor].

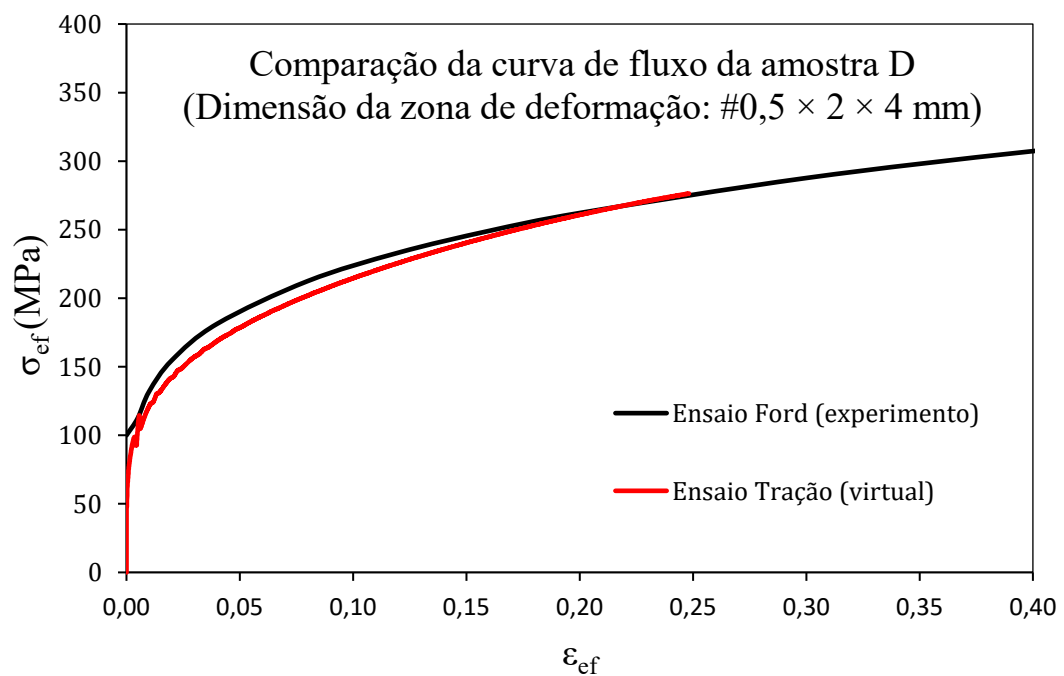


Figura 5. 5: Compara o entre as curvas de fluxo construídas a partir dos resultados do ensaio de tração(virtual) da chapa D e ensaio Ford (experimental) [próprio autor].

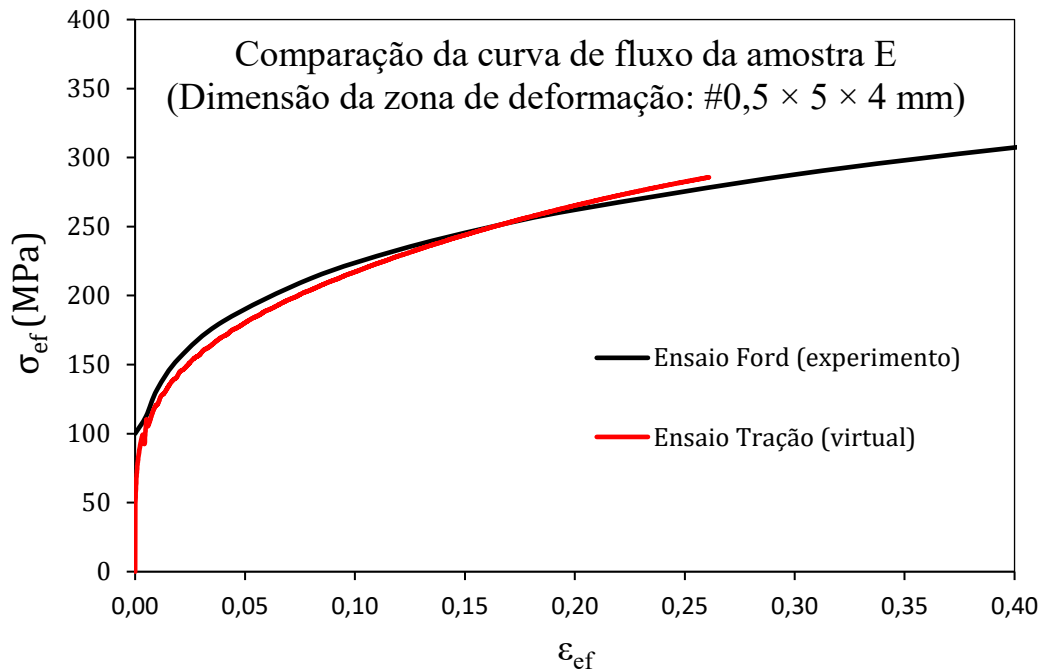


Figura 5. 6: Comparação entre as curvas de fluxo construídas a partir dos resultados do ensaio de tração(virtual) da chapa E e ensaio Ford (experimental) [próprio autor].

A Figura 5.7 mostra a curva de fluxo da amostra C. Essa curva foi construída por meio das equações 5.3 e 5.4 por apresentar comportamento próximo ao estado plano de deformação em quase todo o volume da zona de fluxo plástico, como revela a Figura 5.3(c). Verifica-se que nesse caso o estado predominante prevaleceu uniforme apenas na zona central ao longo da espessura da parte útil da chapa. Então, para evitar possíveis erros, utilizou-se os dados de variação da espessura (direção Y) no centro do corpo de prova nas equações para determinação da curva de fluxo do cobre.

A pequena diferença observada entre a coincidência das curvas pode ter acontecido devido a subestimação das tensões calculada a partir da área instantânea determinada por meio da variação da espessura da chapa com a largura constante (20 mm). Entretanto, na verdade, o resultado da simulação mostra que há uma pequena contração das bordas na zona de deformação. Para correção desta variação foi realizada pequena alteração do coeficiente da equação da tensão efetiva de $\frac{\sqrt{3}}{2}$ para $\frac{\sqrt{3}}{1,94}$. As melhorias no ajuste em virtude da aplicação do novo fator são evidenciadas na Figura 5.7 por meio da curva do ensaio de tração virtual construída a partir da equação modificada.

$$\text{Tensão efetiva} \quad \sigma_{ef} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{F}{w_0 t_f^{\text{Tração}}} \right) \quad (5.3)$$

$$\text{Deformação efetiva} \quad \varepsilon_{ef} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{t_0^{\text{Tração}}}{t_f^{\text{Tração}}} \right) \quad (5.4)$$

sendo σ_{ef} = tensão verdadeira efetiva; e = deformação de engenharia; ε_{ef} = deformação verdadeira efetiva; F = força; t_0 = espessura inicial da zona de trabalho da chapa; t_f = espessura final a cada incremento de deformação no centro geométrico do corpo de prova. w_0 = largura inicial da zona de trabalho da chapa.

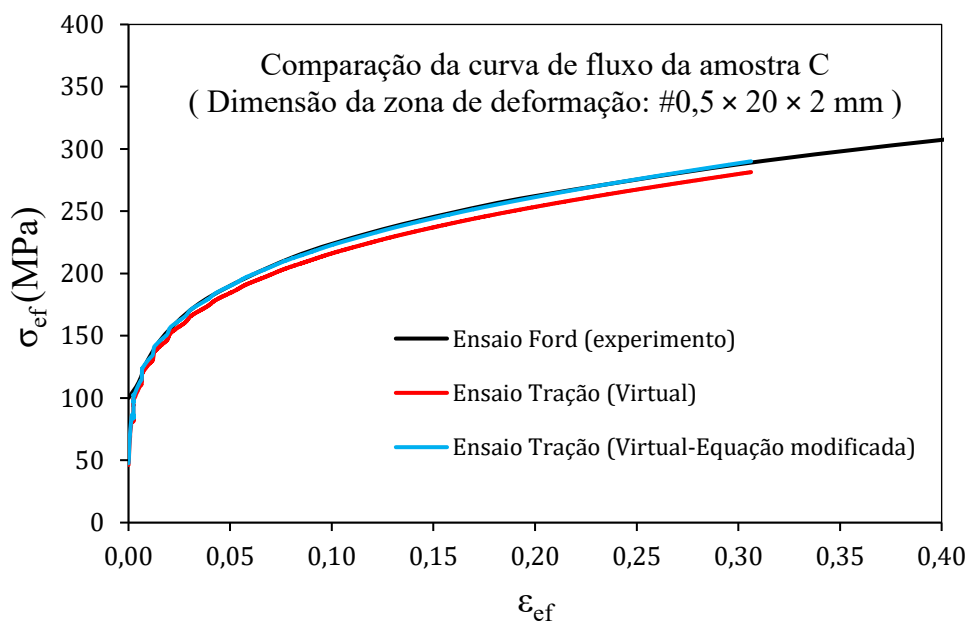


Figura 5. 7: Comparação entre as curvas de fluxo construídas a partir dos resultados do ensaio de tração(virtual) da chapa C e ensaio Ford (experimental) [próprio autor].

As Figuras 5.8 e 5.9 mostram três curvas de fluxo das amostras B e F, respectivamente. Em ambos os casos, o comportamento mecânico se apresentou em estado intermediário à tensão uniaxial e ao plano de deformação por exibir magnitudes de tensão em X entre 0 e a metade da tensão em Z como notado nas Figuras 5.3(b) e (f). Assim, para se desenvolver e estudar as curvas analisando ambos os estados, foram utilizados os dados de deslocamento longitudinal (direção Z) do corpo de prova e a variação da espessura (direção Y) no centro do corpo de prova nas equações. Para análise da amostra B, uma curva desenvolvida pelas equações considerando estado uniaxial de tensões apresentou comportamento subestimado de tensões até a deformação de 0,15 e superestimado a partir da deformação de 0,15 como mostra a Figura 5.8. A outra curva que foi construída utilizando as equações para o estado plano de deformação se mostrou com o mesmo perfil da curva de fluxo plástico de referência, porém apresentou valores de tensões e deformações subestimados como evidencia a Figura 5.8.

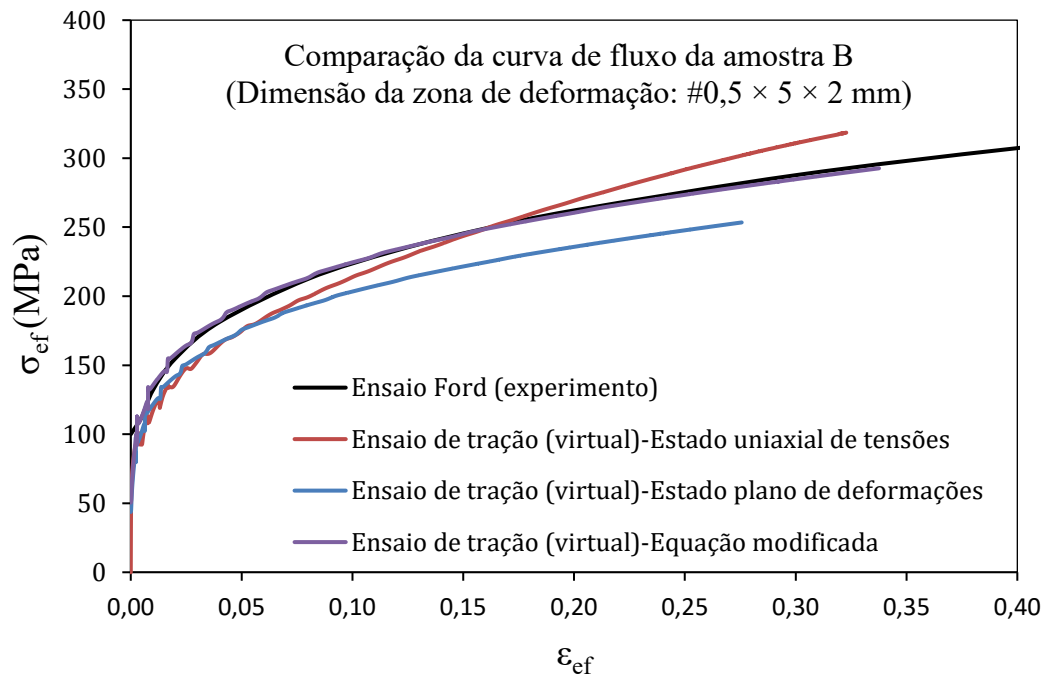


Figura 5. 8: Comparação entre as curvas de fluxo construídas a partir dos resultados do ensaio de tração(virtual) da chapa B e ensaio Ford (experimental) [próprio autor].

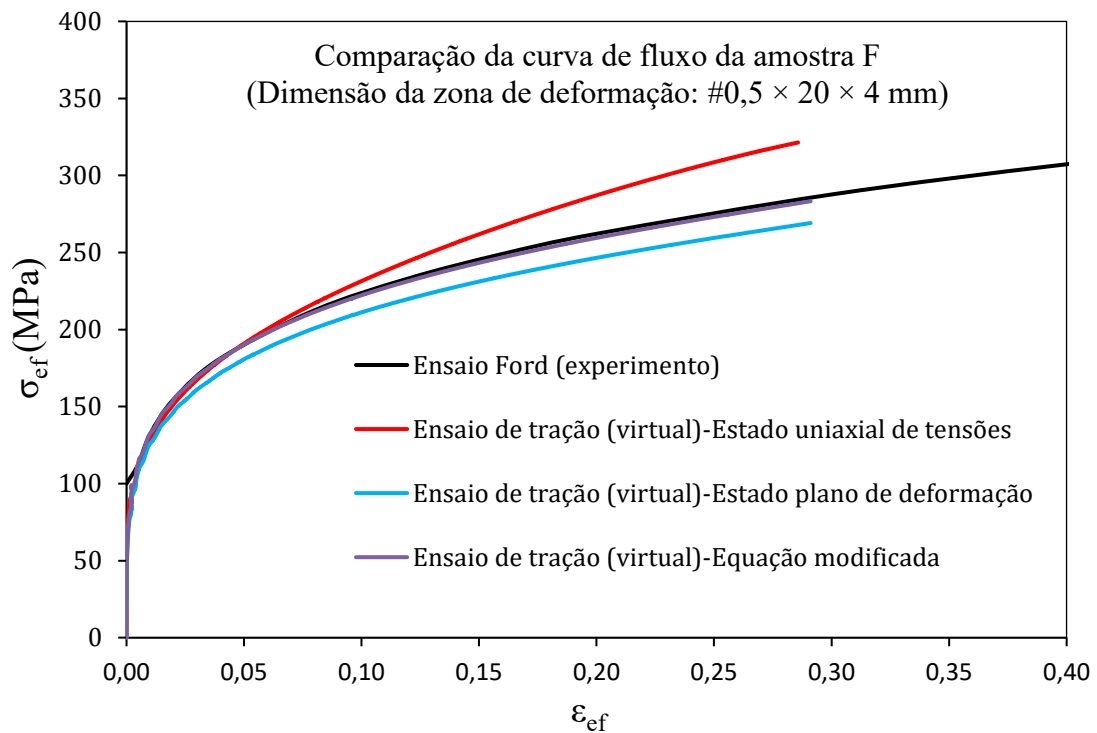


Figura 5. 9: Comparação entre as curvas de fluxo construídas a partir dos resultados do ensaio de tração(virtual) da chapa E e ensaio Ford (experimental) [próprio autor].

A terceira curva foi desenvolvida utilizando fatores de ajuste intermediários aos modelos matemáticos correspondentes ao estado plano de deformação e uniaxial de tensões, conforme mostram as equações 5.5 e 5.6. A curva obtida a partir das equações citadas exibiu comportamento similar à curva de referência como demonstrado na Figura 5.8. Nesse caso, o comportamento da relação σ_{ef} x ε_{ef} mostrou que, a cada incremento de deformação na zona central da parte útil, a tensão efetiva é aproximadamente igual à tensão na direção Z exercida nas áreas, calculadas a partir dos valores das espessuras resultantes da deformação multiplicada pela largura inicial da chapa. Já o valor da deformação efetiva é igual a $2/\sqrt{2}$ multiplicado pelo módulo da deformação na direção (Y), correspondente à espessura da chapa, devido à deformação finita que ocorreu na direção X, recordando que no estado plano de deformação legítimo, a deformação na direção X é negligenciável. Dessa maneira, o coeficiente de $2/\sqrt{2}$ foi determinado da seguinte forma. Como a deformação efetiva máxima no instante da carga máxima calculada pela simulação foi de 0,34 e considerando a situação de uma deformação no estado plano perfeito para a chapa, a deformação em Y, neste instante, deveria ser $= 0,34 / 2/\sqrt{3} = 0,29$, porém, a simulação calculou 0,23. Então, para se conseguir alcançar o resultado próximo ao de 0,34, a partir da deformação em Y calculada pela simulação, foi necessário ajustar o coeficiente de 1,155 ($2/\sqrt{3}$) para 1,414 ($2/\sqrt{2}$).

$$\begin{array}{l} \text{Deformação} \\ \text{efetiva} \end{array} \quad \varepsilon_{ef} = \frac{2}{\sqrt{2}} \ln \left(\frac{t_0^{Tração}}{t_f^{Tração}} \right) \quad (5.5)$$

$$\begin{array}{l} \text{Tensão} \\ \text{efetiva} \end{array} \quad \sigma_{ef} = \left(\frac{F}{w_0 t_f^{Tração}} \right) \quad (5.6)$$

sendo σ_{ef} = tensão verdadeira efetiva; ε_{ef} = deformação verdadeira efetiva; F = força; t_0 = espessura inicial da zona de trabalho da chapa; t_f = espessura final a cada incremento de deformação no centro geométrico do corpo de prova. w_0 = largura inicial da zona de trabalho da chapa.

No caso da amostra F, a curva desenvolvida pelas equações considerando estado uniaxial de tensões exibiu comportamento superestimado de tensões a partir da deformação de 0,05 como mostra a Figura 5.9. A outra curva que foi construída utilizando as equações para o estado plano de deformação se mostrou com o mesmo perfil da curva de fluxo plástico de referência, porém apresentou valores de tensões subestimados como apresenta a Figura 5.9. Neste caso, a diferença verificada nos perfis das curvas pode ter acontecido devido à subestimação das tensões calculada a partir das forças exercidas nas áreas instantâneas

determinada por meio da variação da espessura da chapa com a largura constante (20 mm). Todavia, o resultado da simulação mostra que há uma pequena contração das bordas na zona de deformação, inclusive maior em relação ao ocorrido na amostra C. Para correção desta variação foi realizada alteração do coeficiente da equação da tensão efetiva para $\frac{\sqrt{3}}{1,90}$. O resultado é demonstrado pela Figura 5.9 por meio da curva do ensaio de tração virtual construída a partir das equações 5.4 e 5.7 (modificada). Esta curva foi quem descreveu o comportamento similar à curva de referência, como demonstrado na Figura 5.9.

$$\begin{array}{l} \text{Deformação} \\ \text{efetiva} \end{array} \quad \varepsilon_{ef} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{t_0^{Tração}}{t_f^{Tração}} \right) \quad (5.4)$$

$$\begin{array}{l} \text{Tensão} \\ \text{efetiva} \end{array} \quad \sigma_{ef} = \frac{\sqrt{3}}{1,90} \left(\frac{F}{w_0 t_f^{Tração}} \right) \quad (5.7)$$

sendo σ_{ef} = tensão verdadeira efetiva; ε_{ef} = deformação verdadeira efetiva; F = força; t_0 = espessura inicial da zona de trabalho da chapa; t_f = espessura final a cada incremento de deformação no centro geométrico do corpo de prova; w_0 = largura inicial da zona de trabalho da chapa.

A Tabela 6 exhibe um resumo na qual mostra o estado de tensão e deformação predominante em todas as amostras no ensaio de tração. Apresenta também como foram extraídos os dados de deslocamentos dos corpos de prova e as equações utilizadas para o desenvolvimento das curvas de fluxo plástico de cada chapa de acordo com seu respectivo estado de deformação.

Tabela 6: Equações para construção da curva de fluxo de acordo com o resultado do estado de tensões da amostra no início da estrição durante ensaio de tração.

Tipo de análise				
Amostra	Estado de tensões	Direção do deslocamento	Referência do deslocamento	Equações
A	Estado uniaxial de tensões	Eixo z	Deslocamento do cabeçote	5.1 e 5.2
B	Próximo ao estado plano de deformação	Eixo y	Redução da espessura no centro da chapa	5.5 e 5.6
C	Estado plano de deformação	Eixo y	Redução da espessura no centro da chapa	5.3 e 5.4
D	Estado uniaxial de tensões	Eixo z	Deslocamento do cabeçote	5.1 e 5.2
E	Estado uniaxial de tensões	Eixo z	Deslocamento do cabeçote	5.1 e 5.2
F	Próximo ao estado plano de deformação	Eixo y	Redução da espessura no centro da chapa	5.4 e 5.7

5.1.3 Gradientes de tensão e deformação em chapas largas sob tração

No ensaio de tração foi analisada a distribuição das tensões principais e efetiva na chapa de cobre com 20 mm de largura, previamente submetida ao ensaio Ford com matrizes de 2 mm de largura. As Figuras 5.10 e 5.11 mostram a evolução dos gradientes de tensão nas direções X, Y e Z e dos gradientes de tensão efetiva para essa chapa considerando deformações efetivas de 0,16 (coluna à esquerda), 0,32 (coluna central) e 0,60 (coluna direita), calculadas pela equação 5.4 para valores de espessura medidos no centro geométrico das chapas.

Os resultados mostram que as tensões na direção da espessura do material (σ_y), em sua parte útil, são praticamente inexistentes em qualquer posição até ser atingida a deformação efetiva de $\sim 0,60$ no centro do corpo de prova. As tensões nas regiões que não foram previamente comprimidas pelas matrizes Ford também são negligenciáveis. No entanto, há tensões de natureza trativa na zona central das chapas nas direções X e Z. As tensões na direção longitudinal (Z) são $\sim 2\times$ as tensões na direção da largura (X) dos corpos de prova.

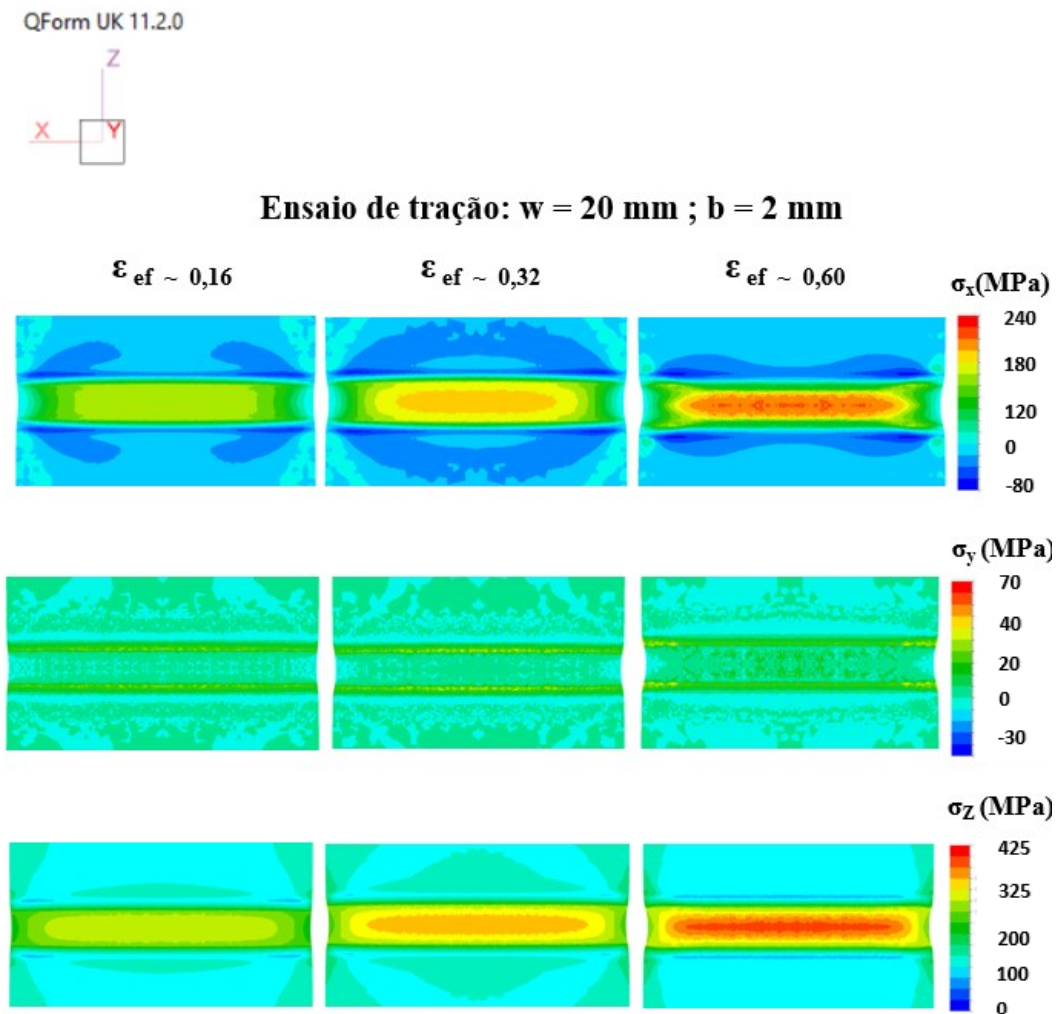


Figura 5. 10: Tensões nas direções X, Y e Z correspondentes à $\epsilon_{ef} \approx 0,16, 0,32$ e $0,60$ na chapa C.

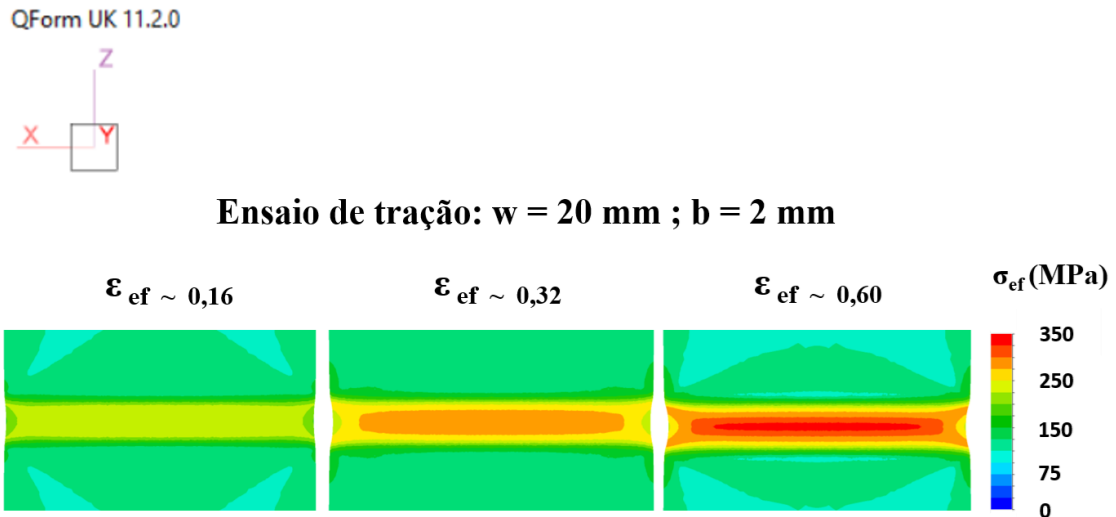


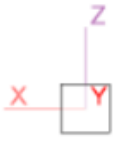
Figura 5. 11: Tensões efetivas correspondentes à $\epsilon_{ef} \approx 0,16, 0,32$ e $0,60$ na chapa C.

Observa-se que as tensões nas direções X e Z são menores na vizinhança da borda lateral das chapas. Além disso, principalmente para $\epsilon_{ef} \approx 0,32$ e $0,60$, há uma larga faixa de localidades na região central das chapas, em que a variação das tensões longitudinais e laterais é bem pequena. Finalmente, vale ressaltar o considerável aumento de tensões com a redução da espessura das chapas e que, para $\epsilon_{ef} \approx 0,60$, a magnitude das tensões nas direções X e Z torna-se bem severa, especialmente ao longo da direção longitudinal.

O gradiente das deformações principais durante o ensaio de tração foi examinado em detalhe na chapa de 20 mm previamente submetida à compressão plana até a espessura de 0,5 mm por meio de matrizes de 2 mm de largura. A Figura 5.12 apresenta a evolução dos gradientes de deformação nas direções X , Y e Z e a Figura 5.13 apresenta os gradientes de ϵ_{ef} considerando reduções de espessura no centro da chapa sob tração correspondentes às deformações efetivas de $\sim 0,16, 0,32$ e $0,60$ calculas por meio da equação 5.4.

Observa-se na Figura 5.12 que os valores de deformações na direção da largura da chapa (ϵ_x) são próximas a zero na área central, ao contrário das suas bordas que experimentam uma limitada contração que se torna mais abrangente com o decorrer do ensaio. A deformação longitudinal (ϵ_z) ocasiona o estiramento da chapa e segue o mesmo padrão observado para as tensões σ_z . Para $\epsilon_{ef} \approx 0,16$ e $0,32$, há uma ampla faixa de localidades na região central das chapas, em que ϵ_z é praticamente uniforme. Os valores de ϵ_z crescem à medida que os corpos de prova são estirados na direção Z e tornam-se mais heterogêneos, atingindo valores mais elevados em dois polos adjacentes entre o centro e as bordas das chapas.

QForm UK 11.2.0



Ensaio de tração: $w = 20 \text{ mm}$; $b = 2 \text{ mm}$

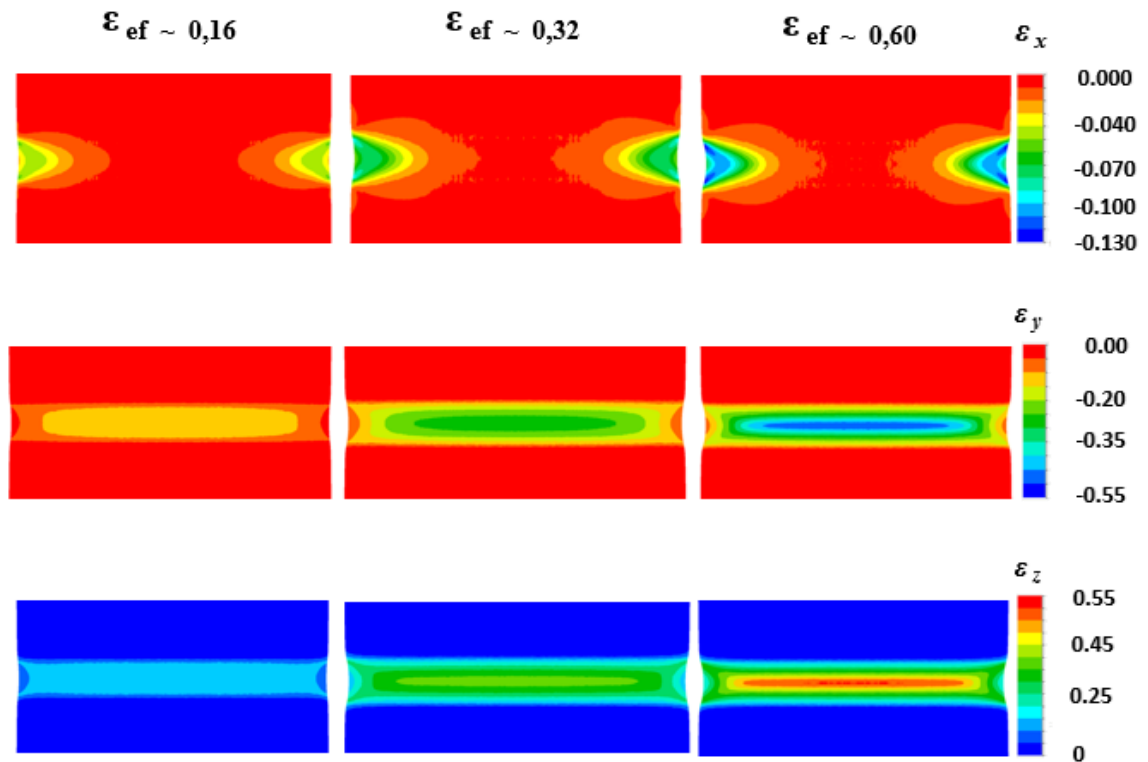


Figura 5. 12: Deformações nas direções X, Y e Z correspondentes à $\epsilon_{ef} \approx 0,16, 0,32$ e $0,60$ na chapa C.

QForm UK 11.2.0



Ensaio de tração: $w = 20 \text{ mm}$; $b = 2 \text{ mm}$

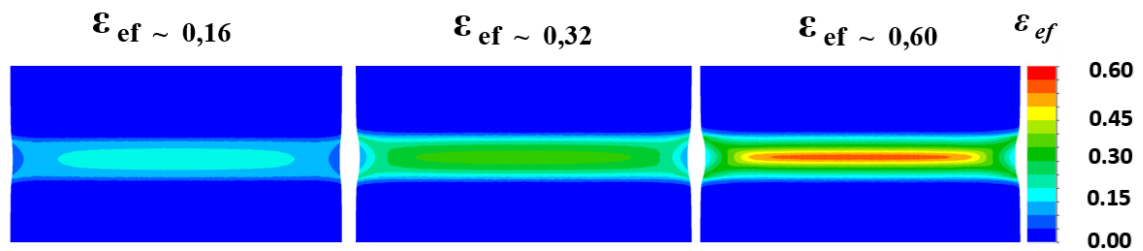


Figura 5. 13: Deformações efetivas (ϵ_{ef}) $\approx 0,16, 0,32$ e $0,60$ na chapa C.

As deformações na direção da espessura (ϵ_y) é de contração e seus gradientes apresentam, exceto pelo sinal, magnitudes semelhantes às encontrados para ϵ_z . Os mapas de deformação efetiva (ϵ_{ef}) também apresentam alta similaridade com os padrões das deformações longitudinais e na direção da espessura. Entretanto, os valores de (ϵ_{ef}) são $\sim 1,15\times$ maiores que ϵ_y com exceção da região da borda em que as deformações efetivas são um pouco menores. Assim como no caso das tensões efetivas, há um aumento da magnitude e dos gradientes de deformação efetiva com o progresso do ensaio.

5.1.4 Efeito da largura da matriz e chapa nos gradientes de deformação

A fim de avaliar o efeito da geometria dos corpos de prova na dinâmica do ensaio de tração, as Figuras 5.14 e 5.15 mostram os gradientes de deformação efetiva sob tração para as chapas previamente submetidas ao Ensaio Ford com matrizes de 2 e 4 mm de largura e chapas com larguras de 2, 5 e 20 mm. Nesses resultados são consideradas as distribuições de ϵ_{ef} obtidas para estágios do ensaio em que foram atingidas deformações efetivas de 0,16 e 0,32, respectivamente, na região central das chapas de cobre.

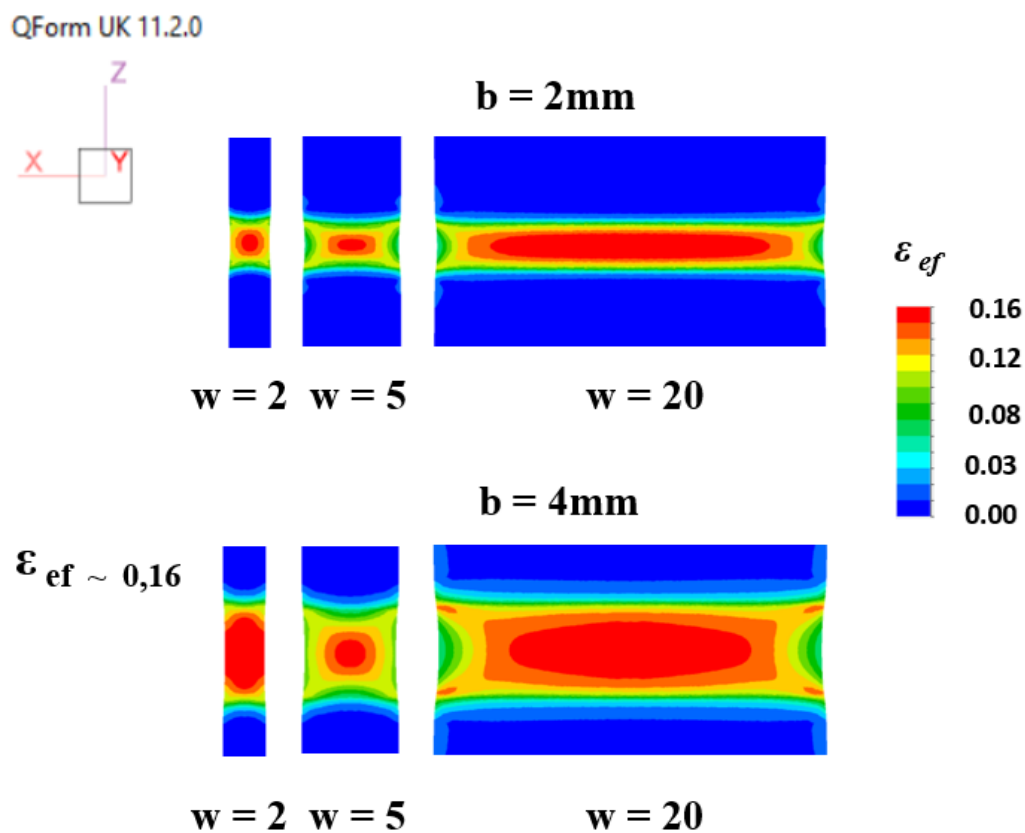


Figura 5. 14: Gradiente de deformação efetiva de todas as chapas correspondentes à ϵ_{ef} de $\sim 0,16$.

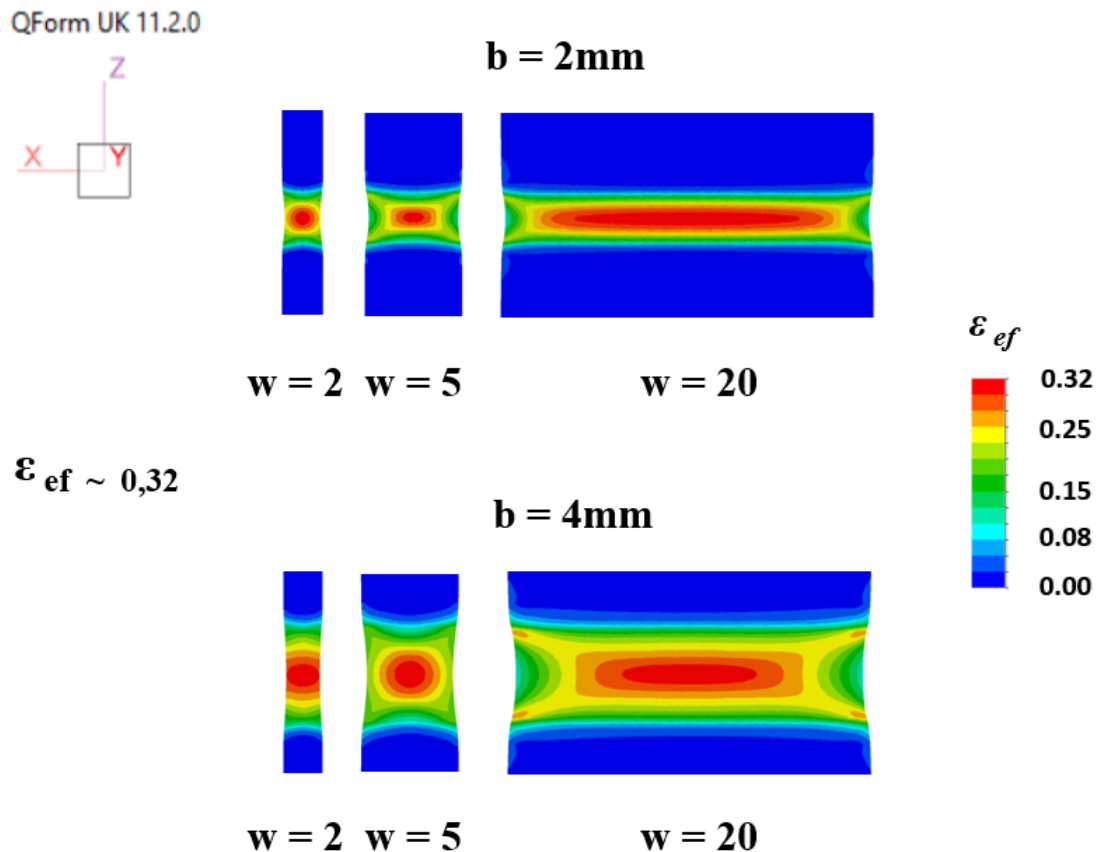


Figura 5. 15: Gradiente de deformação efetiva de todas as chapas correspondentes à ϵ_{ef} de $\sim 0,32$.

Nas duas condições, observando para ambas as deformações efetivas, o gradiente de deformação tende a aumentar com o aumento da largura da chapa (w) considerando a mesma medida de largura (b) da matriz. Considerando a mesma largura da chapa, no caso das duas deformações efetivas, o aumento de b aumenta o gradiente de deformação.

Observa-se na chapa com largura (w) de 2 mm e $b = 4$ mm a existência de áreas mais extensas em que foram atingidas deformações próximas ao valor de 0,16 no estágio $\epsilon_{ef} \sim 0,16$, assim como de 0,32, no estágio $\epsilon_{ef} \sim 0,32$, comparando com a outra chapa com largura (w) de 2 mm. O mesmo não ocorreu nas chapas de 20 mm, considerando a mesma comparação, houve uma redução da extensão da máxima deformação efetiva, em ambos os estágios, principalmente na direção da largura da chapa.

5.2 Ensaios físicos

5.2.1 Curva de fluxo plástico do ensaio Ford

A Figura 5.16 apresenta a relação entre tensão (σ_{ef}) e deformação (ε_{ef}) efetivas obtida para a chapa de cobre submetida ao ensaio de compressão no estado plano de deformação, assim como a equação de Hollomon resultante da regressão estatística a partir dos dados experimentais. Os resultados demonstram que foi possível atingir elevadas deformações plásticas no ensaio, com valor um pouco maior a 1,5. A equação de fluxo obtida exibe coeficiente de determinação $R^2 = 0,99$, o que demonstra que o modelo de Hollomon apresenta boa correlação com os dados coletados experimentalmente.

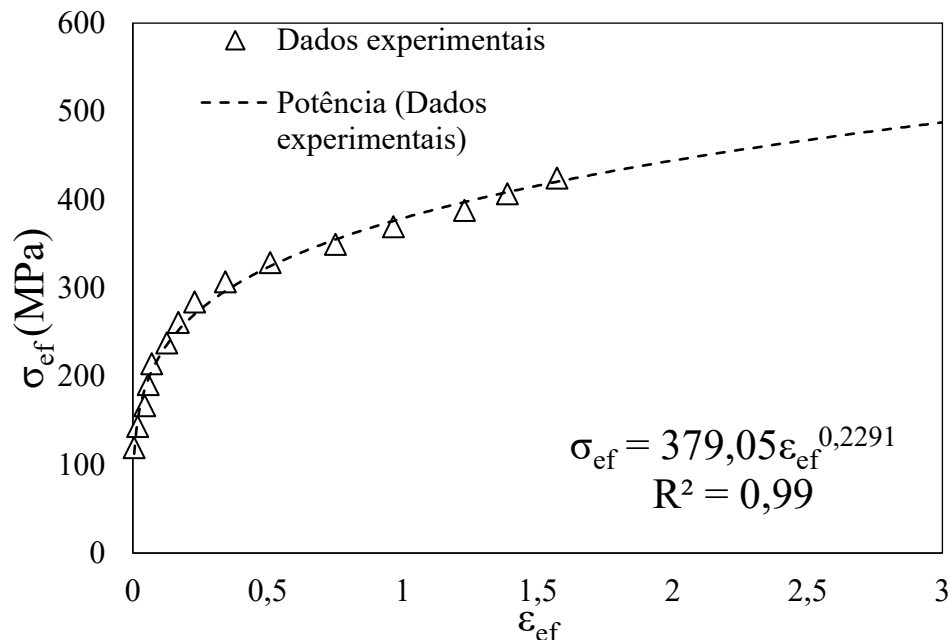


Figura 5. 16: Curvas de fluxo plástico construídas a partir dos resultados do ensaio Ford [Próprio autor].

5.2.2 Determinação da relação $\sigma_{ef} \times \varepsilon_{ef}$

Com o resultado obtido por meio do teste físico de tração nas chapas preparadas via ensaio Ford seguida do recozimento foi possível estimar a relação entre a tensão efetiva e a deformação efetiva. O procedimento de cálculo envolveu a aquisição dos dados de força axial e deslocamento do cabeçote móvel da máquina de ensaios universal. Esses dados foram convertidos em tensão efetiva e deformação efetiva, considerando as equações 5.3, 5.4 e 5.7 para os corpos de prova de maior largura e as equações 5.1, 5.2, 5.5 e 5.6 para as chapas com ~ 5 mm de largura e são apresentados nas Figuras 5.17 e 5.18 para larguras da matriz Ford de 2 e 4 mm, respectivamente.

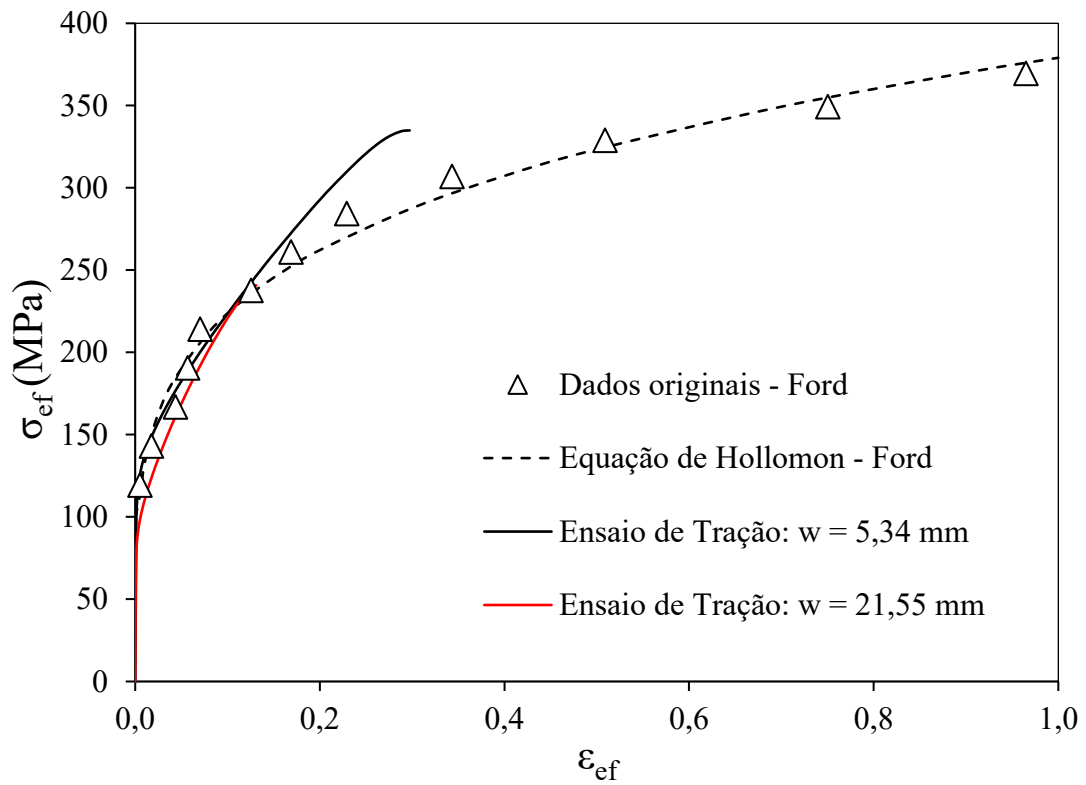


Figura 5. 17: Comparação entre as curvas de fluxo construídas a partir dos resultados dos ensaios físicos de tração e Ford para matrizes com largura $b = 2$ mm [próprio autor].

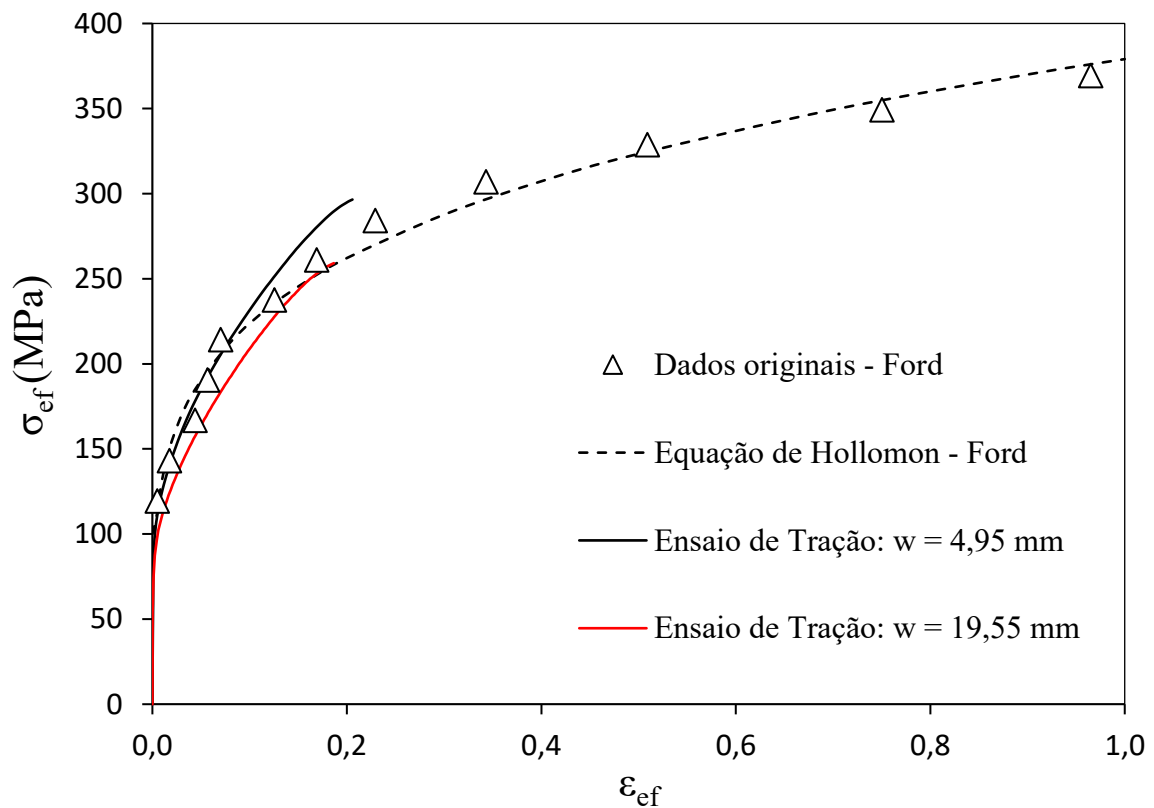


Figura 5. 18: Comparação entre as curvas de fluxo construídas a partir dos resultados dos ensaios físicos de tração e Ford para matrizes com largura $b = 4$ mm [próprio autor].

As Figuras de 5.17 e 5.18 mostram comportamentos similares entre as curvas de fluxo plásticas desenvolvidas a partir dos ensaios de tração e de compressão no estado plano de deformação, com melhor concordância para os corpos de prova de maior largura. Como o método de cálculo não permite boa acurácia após o aparecimento da estricção, os dados apresentados correspondem aos valores até às máximas cargas axiais obtidas nos ensaios de tração. Nota-se, portanto, que tal instabilidade plástica limita a determinação da equação de fluxo. Verifica-se também aumento progressivo das tensões de fluxo ao longo da deformação nas chapas tracionadas. Também se observa que o comportamento mecânico do cobre, nas condições descritas, não varia de forma pronunciada ao comparar os ensaios realizados.

Dessa maneira, fica evidente que o recozimento foi capaz de restaurar a microestrutura após a deformação causada pela compressão Ford.

5.2.3 Zona de deformação dos corpos de provas após ensaio de tração

A Tabela 7 revela as diferenças entre dimensões da zona de deformação programadas e reais após ensaio Ford seguido do corte. Observa-se diferenças, especialmente, entre as medidas de espessura e largura previstas e reais e entre as espessuras das amostras retiradas do mesmo corpo de prova preparados pela compressão Ford.

As Figuras 5.19 e 5.20 mostram a zona de deformação após a fratura do corpo de prova no ensaio de tração. Observa-se boa convergência entre as regiões das fraturas quando comparadas com os locais em vermelho de máxima deformação efetiva no centro do corpo de prova previstos pela simulação virtual para rupturas. Verifica-se que todas as amostras romperam na zona de deformação e próximas ao centro. As falhas podem não terem ocorrido no centro geométrico, ou mais próximo do centro, como previsto na simulação, devido às variações da espessura e largura ao longo da zona de trabalho. Dessa forma as maiores tensões se concentraram em regiões deslocadas do centro.

Tabela 7: Dimensões da zona de deformação das amostras.

Dimensões da zona de deformação antes do ensaio de tração (mm)	
Previstas e utilizadas no ensaio virtual	Reais após ensaio Ford e corte
# 0,50 × 5,00 × 2	# 0,43 × 5,34 × 2
# 0,50 × 20,00 × 2	# 0,47 × 21,55 × 2
# 0,50 × 5,00 × 4	# 0,48 × 4,95 × 4
# 0,50 × 20,00 × 4	# 0,44 × 19,55 × 4

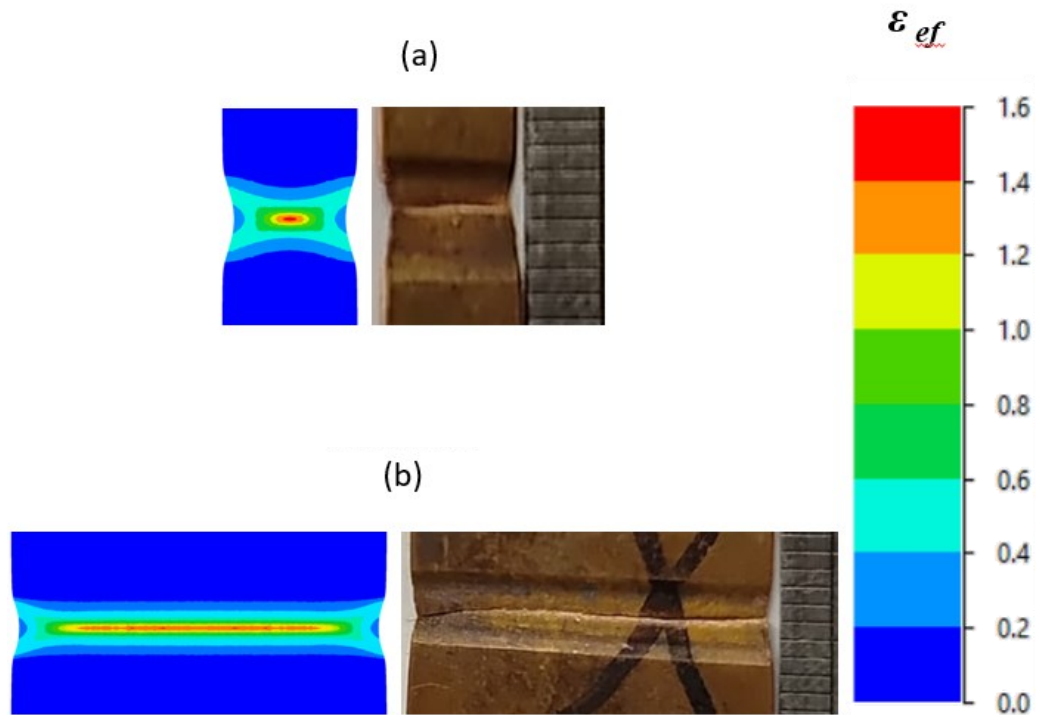


Figura 5. 19: Zona de deformação dos copos de prova com comprimento de 2mm e larguras de 5mm(a) e 20mm(b). Lado esquerdo (simulação virtual ao final da estrição) e Lado direito (experimento após a fratura) [próprio autor].

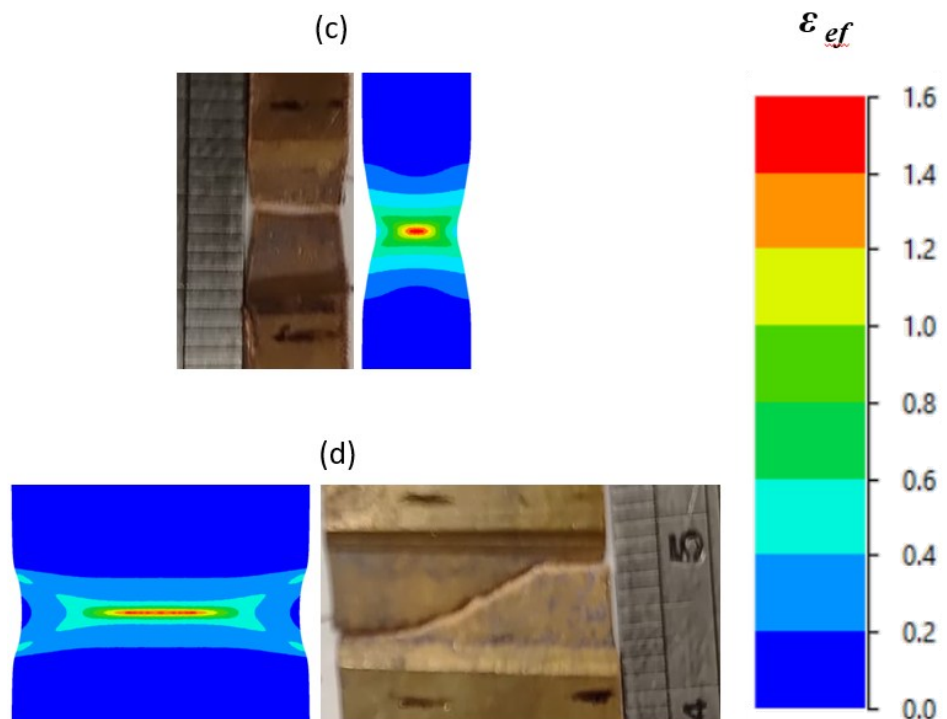


Figura 5. 20: Zona de deformação dos copos de prova com comprimento de 4mm e larguras de 5mm(c) e 20mm(d). [Lado direito(c) e Lado esquerdo(d): simulação virtual ao final da estrição] e [Lado esquerdo(c) e Lado direito(d): experimento após a fratura] [próprio autor].

6 DISCUSSÃO

6.1 Efeito das dimensões da chapa no surgimento da estrição em tração

Os resultados das simulações do ensaio de tração das chapas com 0,5 mm de espessura inicial e 20 mm de largura na parte útil, revelaram que, em grande parte da porção central dos corpos de prova, predominou o estado plano de tensões, caracterizado por $\sigma_y \approx 0$ e $\sigma_x \approx \sigma_z/2$. Essa condição se deve à geometria adquirida pela chapa no Ensaio Ford, uma vez que a porção do material com maior espessura, localizada nas adjacências da zona de deformação (trabalho), restringe o fluxo plástico na direção da largura da chapa. Tal restrição se dá pela aplicação de tensões laterais de natureza trativa cuja magnitude é alta o suficiente para impedir a contração lateral generalizada. Já nas bordas laterais, há menor restrição ao escoamento lateral e o que leva a valores menores de tensões na direção X, como mostrado na Figura 5.10.

Todavia, a redução da largura das chapas até ~2 mm leva a uma alteração drástica no estado de tensões durante o ensaio de tração, de modo que passa a prevalecer o estado uniaxial de tensões, caracterizado por σ_x e $\sigma_y \approx 0$, enquanto ocorre o alongamento uniforme em quase toda a parte útil dos corpos de prova. Ao contrário do ocorrido na chapa com 20 mm de largura, a porção do material com maior espessura, localizada nas adjacências da zona de deformação (trabalho), não conseguiu restringir o fluxo plástico na direção lateral da chapa.

Vale ressaltar que nas chapas de 5 mm de largura os resultados da simulação revelam que na porção central da peça prevalece um estado de tensão intermediário, entre o estado uniaxial e estado plano de deformação, mais próximo do estado plano de deformação para o caso do corpo de prova previamente submetido ao ensaio Ford com matrizes de largura $b = 2$ mm, caracterizado por $\sigma_y \approx 0$ e $\sigma_x \approx \sigma_z/3,7$.

À luz do critério de Considère, a estrição surge nos corpos de prova tracionados quando $d\sigma_I/d\varepsilon_I = \sigma_I$ [3-12]. Considerando as equações citadas neste documento e a validade do modelo constitutivo de Hollomon, essa condição é alcançada nos ensaios de tração uniaxial quando $\varepsilon_I = n$, sendo n o coeficiente de encruamento da equação de fluxo plástico. Isso ocorre quando $\varepsilon_{ef} = (2/\sqrt{3}) n$ para o caso da tração no estado plano de tensões, $\varepsilon_{ef} = n$ para o estado uniaxial de tensões e, de acordo com os ajustes feitos a partir do modelo computacional, $\varepsilon_{ef} = (2/\sqrt{2}) n$ no surgimento de tal instabilidade plástica. No caso das chapas avaliadas neste trabalho a estrição surgiria quando $\varepsilon_{ef} = (2/\sqrt{3}) 0,23 \approx 0,27$, $\varepsilon_{ef} = 0,23$ e $\varepsilon_{ef} = (2/\sqrt{2}) 0,23 \approx 0,33$. A Tabela 8 mostra o intervalo de ε_{ef} na zona central dos corpos de prova nas simulações computacionais quando se atinge a carga máxima, o que caracteriza o surgimento da estrição.

Tabela 8: Intervalo da deformação efetiva nas amostras durante a carga máxima.

Dimensões da zona de trabalho (mm)			Intervalo da deformação efetiva
Espessura	Largura	Comprimento	
~0,5	~2	~2	0,27 – 0,31
~0,5	~5	~2	0,33 – 0,35
~0,5	~20	~2	0,27 - 0,34
~0,5	~2	~4	0,22 – 0,27
~0,5	~5	~4	0,27 – 0,35
~0,5	~20	~4	0,24 – 0,35

Observa-se boa concordância entre a previsão da estricção considerando o critério de Considère e os resultados analisados nas simulações. Isso também vai de encontro com os resultados experimentais obtidos nos ensaios de tração, uma vez que maiores alongamentos uniformes foram obtidos nas chapas com ~5 mm de largura, especialmente no caso dos corpos de prova confeccionados a partir de matrizes Ford com dimensão $b = 2$ mm.

6.2 Influência dos parâmetros geométricos nos gradientes de deformação

Os resultados apresentados nas Figuras 5.14 e 5.15 demonstram o efeito das dimensões das amostras nos gradientes de deformação sob tração. Nota-se, principalmente para os casos em que as chapas foram deformadas sob prevalência do estado plano de deformação, que a zona de deformação exibe uma região central com distribuição de deformação uniforme, mas menores magnitudes de deformação são atingidas nas bordas laterais das chapas, mesmo nos estágios iniciais do ensaio.

Verifica-se que para razões entre largura e espessura da zona de deformação ≥ 40 , como no caso dos corpos de prova de ~20 mm de largura, independentemente dos valores da largura da matriz Ford, a deformação ocorreu sob ou próximo do estado plano de deformação nos ensaios de tração. Por outro lado, corpos de prova de tração, cujas dimensões da zona de deformação na direção da largura são próximas ou menores do que na direção do comprimento, tendem a apresentar comportamento mecânico sob estado uniaxial de tensões. Tais observações devem ser utilizadas no dimensionamento dos corpos de prova de tração e tratamento matemático dos dados adquiridos nos ensaios realizados a partir de chapas previamente deformadas via ensaio Ford.

Por fim, observa-se que a largura da matriz Ford tem papel essencial na definição do limite da área útil do corpo de prova de tração. Matrizes de 4 mm proporcionaram áreas deformadas mais amplas sob tração, aumentando a região submetida ao estado plano de deformação e estado uniaxial de tensão. Entretanto, a extensão da região lateral das chapas que não se deforma em condições ideais também cresce com o aumento da largura da matriz e, conseqüentemente, com o comprimento da zona de fluxo plástico.

Avaliações experimentais futuras, contendo técnicas de medição de deformação local e ajustes de parâmetros, são fundamentais para consolidar a metodologia estudada como alternativa prática para a simulação física da laminação, seguida de tração.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho dedicou-se à análise do comportamento mecânico de chapas de cobre preparadas via compressão no estado plano de deformação em matriz Ford seguido de recozimento e ensaio de tração testados na prática e por simulação numérica pelo método dos elementos finitos.

Analisou-se a influência de diferentes larguras de chapa no estado de deformação e seus gradientes considerando razão de 1/2 entre espessura inicial (0,5 mm) na zona de trabalho e espessura da cabeça (1 mm) do corpo de prova e comprimentos da parte útil de 2 e 4 mm. Observou-se que, quanto maior a medida da largura em relação ao comprimento da parte útil, maior o gradiente de deformação na direção lateral. Nas chapas com largura de 2 e 5 mm prevaleceram características bem próximas ao estado uniaxial de tensões. Exceto na chapa com largura de 5 mm e comprimento de 2 mm na parte útil em que se verificou a existência de um estado de tensões e deformações intermediário. Nas chapas de 20 mm de largura predominou um estado plano de deformação até o aparecimento da estricção sob tração.

Verificou-se que as curvas de fluxo plástico das chapas tracionadas foram bem congruentes com a curva obtida experimentalmente pelo ensaio Ford. Foi fundamental entender o estado de tensões ao longo do caminho da deformação para definir a metodologia adequada para cálculo da curva de fluxo para cada geometria de chapa. No caso das chapas com larguras de 2 mm e a chapa com largura de 5 mm e comprimento da zona de deformação de 4 mm, recomenda-se utilizar as equações que descrevem o comportamento de um material tracionado sob estado uniaxial de tensão, levando em consideração as pequenas diferenças que podem ocorrer em relação à curva de referência apresentada neste trabalho.

Para chapa com largura de 20 mm recomenda-se utilizar as equações que descrevem o comportamento de chapa tracionada sob estado plano de deformação, quando possível e pertinente, com os ajustes nos coeficientes da equação da tensão efetiva a fim de contabilizar a leve redução de largura ao longo do ensaio. Como mostrado no trabalho, o valor de $\frac{\sqrt{3}}{1,90}$ é recomendado para chapa com 20 mm de largura e 4 mm de comprimento da parte útil.

A chapa com a zona de trabalho nas dimensões de 5 mm de largura e 2 mm de comprimento, apresentou estado intermediário de deformação, sendo necessária a utilização de equações modificadas para a previsão da tensão e deformação efetiva média sob tração. Tais equações, no entanto, são válidas apenas para as dimensões sob as quais foram avaliadas, sendo necessários estudos futuros visando a sua parametrização em outras relações geométricas.

Os ensaios virtuais realizados para analisar detalhadamente o comportamento de tensão e deformação das amostras tracionadas, apresentaram resultados similares aos resultados encontrados nos testes experimentais. Desta forma, a simulação numérica mostrou-se uma ferramenta fundamental para a definição das dimensões dos corpos de prova e estudos dos estados de tensões e deformações para entender qual a metodologia mais adequada para se determinar a relação entre tensão efetiva e deformação efetiva das chapas tracionadas, a partir da força resultante da máquina de tração, deslocamento do cabeçote e melhor local para o posicionamento do extensômetro.

O novo método se mostrou viável como alternativa prática do ensaio físico da laminação, seguida de tração, caso o procedimento proposto seja validado por avaliações experimentais futuras.

8 RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

- Proposição de novo método para preparação de corpo de prova com geometria especial para o ensaio de tração.
- A utilização da compressão em matriz Ford, pode ser um processo economicamente mais viável em relação ao uso de laminadores para alcançar o mesmo caminho de deformação desejado.
- Possibilidade de elaborar corpo de prova com geometria diferente do padrão estabelecido pela literatura otimizando a utilização de materiais.
- Obtenção da relação tensão efetiva (σ_{ef}) \times deformação efetiva (ϵ_{ef}) por meio de novas equações desenvolvidas a partir do estado de tensão e deformação pouco discutido em literatura.

9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar extensômetro óptico no ensaio de tração para capturar o mapa completo da distribuição de deformação na área de interesse do corpo de prova e a partir desses dados extraídos, estudar novas metodologias para obtenção da relação tensão efetiva (σ_{ef}) \times deformação efetiva (ε_{ef}), além de validar a metodologia proposta nesta pesquisa;
- Estudar outros tipos de materiais utilizando a metodologia realizada neste trabalho;
- Testar outras medidas de largura considerando a mesma razão estudada nesta pesquisa ou outras razões entre espessura da zona de trabalho e cabeça do corpo de prova de tração;

10 REFERÊNCIAS

- [1] CALLISTER JUNIOR, WILLIAM D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2002.
- [2] HOSFORD, WILLIAM F. **Physical metallurgy**. 2. ed. London; New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2010.
- [3] DIETER, GEORGE ELLWOOD. **Metalurgia mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1981.
- [4] HELMAN, HORACIO; CETLIN, PAULO ROBERTO. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2. ed. São Paulo: Editora Artliber, 2005.
- [5] TRAJANO, Adriano Amâncio. **Estudo da heterogeneidade de deformação em chapas de aço AISI 305 submetidas a um passe de laminação a frio**. 2017. 91 f. Dissertação (Mestrado em Processos de Fabricação) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/6909e621-1223-4d90-aca7-cea3e75fd404/content>. Acesso em: 28 abr. 2025.
- [6] CORRÊA, Elaine Carvalho Siqueira. **Aspectos do encruamento de metais previamente deformados a frio**. 2004. 262 f. Tese (Doutorado em Metalurgia de transformação) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/05389475-c7b5-401b-921d-0864aaa455e3/content>. Acesso em: 28 abr. 2025.
- [7] MCQUEEN, H. J., JONAS, J. J.. Recovery and recrystallization during high temperature deformation. **Treatise on Materials Science and Technology**. Maryland, v. 6, p. 393-493. 1975.
- [8] CHUNG, K; WAGONER, R. H.. Effect of Stress-Strain-Law transients on formability. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 17, p. 1001-1009, 1986.
- [9] SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos - Fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA., 1995.
- [10] VIEIRA, M. F.; FERNANDES, J. V.. Complex strain paths in polycrystalline copper: microstructural Aspects. **Materials Research**. v. 2, n. 3, p. 185-189, 1999.

- [11] NING, YI *et al.*. Anisotropic deformation behavior under various strain paths in commercially pure titanium Grade 1 and Grade 2 sheets. **Materials Science and Engineering: A**, v. 655, p. 70–85, 2016
- [12] VALBERG, HENRY S.. **Applied metal forming: including FEM analysis**. New York: Editora Cambridge University Press, 2018.
- [13] MOĆKO, Wojciech; KRUSZKA, Leopold. Results of strain rate and temperature on mechanical properties of selected structural steels. **Procedia Engineering**, v. 57, p. 789–797, 2013.
- [14] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test methods for tension testing of metallic materials: ASTM E8/E8M**. West Conshohocken: ASTM, 2013.
- [15] RATHMAYR, Georg B.; BACHMAIER, Andrea; PIPPAN, Reinhard. Development of a new testing procedure for performing tensile tests on specimens with sub-millimetre dimensions. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 41, p. 525-691, 2013.
- [16] WANG, Xiao-feng *et al.*. Effects of strain rate on mechanical properties, microstructure and texture of Al – Mg – Si – Cu alloy under tensile loading. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 30, p. 27-40, 2020.
- [17] KOBAYASHI, Shiro; OH, Soo-ik; ALTAN, Taylan.. **Metal Forming and the finite-element method**. New York: Oxford University Press, 1989.
- [18] CARVALHO, Amanda P. *et al.*. Using plane strain compression test to evaluate the mechanical behavior of magnesium processed by HPT, **Metals**, v. 12, 125, 2022.
- [19] BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith.. **Shigley's Mechanical Engineering Design**, 9 ed. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [20] HOLMBERG, S., ENQUIST, B., THILDERKVIST, P.. Evaluation of sheet metal formability by tensile tests, **Materials Processing Technology**, v. 145, p. 72-83, 2004.
- [21] SILVA, Pedro Henrique *et al.*. Strain partitioning in a dual-phase steel under plane strain compression, **Materials Science and Engineering: A**, v. 862, p. 144471, 2023.
- [22] ASM Handbook - **Heat treating fundamentals and processes**, v.4 - Editor: Jon Dossett and George E. Totten, 1991.
- [23] FLAUSINO, Paula Cibely Alves. **Influência da amplitude de deformação e da deformação acumulada na evolução microestrutural e comportamento mecânico do cobre processado por forjamento multidirecional**, 2021. 123 f. Tese (Doutorado

em Metalurgia de Transformação) - Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/items/5b883897-5d69-484e-aa52-005b88c80cf5>. Acesso em: 28 abr. 2025.

[24] BHADURI, Amit.. **Mechanical properties and working of metals and alloys**. Singapore: Springer; 2018.