

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

FABÍOLA KARLLA MENDES SILVA

**AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO NA TREFILAÇÃO
DE BARRAS DE COBRE E ALUMÍNIO**

**BELO HORIZONTE
2013**

FABIOLA KARLLA MENDES SILVA

AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO NA TREFILAÇÃO DE BARRAS DE COBRE E ALUMÍNIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação de Engenharia de Materiais do Centro federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Coorientador: Prof. Dr. Wellington Lopes

BELO HORIZONTE

2013

FABÍOLA KARLLA MENDES SILVA

AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO NA TREFILAÇÃO DE BARRAS DE COBRE E ALUMÍNIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação de Engenharia de Materiais do Centro federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em xx/xx/xxxx

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra Elaine Carballo Siqueira Corrêa. – Orientadora

Prof. Dr. Wellington Lopes - Coorientador

Prof. MSc. Joel Romano Brandão

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Alice, minha melhor amiga, por toda a paciência, colaboração e apoio durante essa jornada.

Agradeço à minha orientadora Profa. Elaine que ao longo desses anos se tornou uma grande amiga. Obrigada pelos conhecimentos passados, pela orientação e toda a ajuda durante a realização desse trabalho.

À todos os professores e técnicos do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, em especial aos Professores Wanderlei, Joel e Wellington, pelas preocupações diárias, apoio e amizade durante a minha Bolsa SAE.

À SAE/CEFET-MG pela concessão da Bolsa de Complementação Educacional.

A todos os meus amigos e familiares que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão do meu curso, o meu muito obrigado.

RESUMO

Uma das características mais relevantes no processo de trefilação é a ocorrência da deformação redundante, que leva ao desenvolvimento de uma distribuição heterogênea de deformação e das propriedades mecânicas. Dentro deste contexto, o objetivo do trabalho foi analisar a distribuição da deformação e determinar a relação entre o coeficiente de deformação redundante e o parâmetro geométrico Δ para barras de cobre e alumínio trefiladas em um passe utilizando a técnica dos perfis de microdureza. Diferentes semi-ângulos de fieira e reduções de área foram empregados. Resultados distintos foram observados para os dois metais em termos da distribuição de deformação e da deformação média. Entretanto, qualitativamente, o comportamento foi similar, resultando em uma relação crescente entre o coeficiente de deformação redundante e o parâmetro geométrico Δ .

Palavras-chave: trefilação, distribuição de deformação, coeficiente de deformação redundante

ABSTRACT

One of the most important features of the drawing operation is the occurrence of the redundant deformation, which leads to the development of non-homogeneous deformation and, consequently, mechanical properties in the cross section of the material. In this work, the deformation distribution and the relationship between the redundant deformation factor and the parameter Δ for one pass drawn aluminum and copper bars have been investigated through the microhardness profile technique. Several operation conditions have been used in the experiments, involving different area reductions and die semi-angles. Different results were observed for each metal in terms of deformation distribution and average deformation. However, both materials exhibited an increasing relationship between the redundant deformation factor and the parameter Δ .

Key-words: drawing, deformation distribution, redundant deformation factor

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	12
2.1. Objetivo Geral	12
2.2. Objetivos Específicos	12
3. Revisão Bibliográfica	13
3.1. Características Gerais do Processo de Trefilação	13
3.2. Processo de Trefilação	14
3.3. Características Geométricas do Processo de Trefilação.....	16
3.4. Deformação no Processo de Trefilação	18
3.4.1. Deformação homogênea	20
3.4.2. Deformação redundante	20
3.4.3. Deformação média	21
3.5. Análise da Deformação na Trefilação Através dos Métodos Experimentais	22
3.5.1. Visioplaticidade	22
3.5.2 Superposição das curvas tensão-deformação	23
3.5.3 Perfis de microdureza	23
4. MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1. Materiais	25
4.2. Características Gerais do Trabalho Realizado	26
4.3. Ensaio de Tração	27
4.4. Ensaio de Microdureza	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1. Relação entre a Deformação e a Dureza para Cobre e para o Alumínio	32
5.2. Distribuição de Microdureza ao Longo da Seção Transversal do Cobre Trefilado	33
5.3. Distribuição de Microdureza Longo da Seção Transversal do Alumínio Trefilado	35
5.4. Distribuição de Deformação ao Longo da Seção Transversal do Cobre Trefilado	38
5.5. Distribuição da Deformação Longo da Seção Transversal do Alumínio Trefilado	41
5.6. Relação Coeficiente de Deformação Redundante e Parâmetro Geométrico Δ	45
6. CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática da operação de trefilação.	13
Figura 2 - Representação da bancada de trefilação.	14
Figura 3 - Representação de trefilador de tambor.	16
Figura 4 - Representação das zonas da fieira de trefilação.....	17
Figura 5 - Representação dos ângulos da fieira de trefilação.....	17
Figura 6 - Representação da passagem do fio pela fieira e dos esforços presentes no processo de trefilação.	19
Figura 7 - Representação esquemática da deformação redundante.	21
Figura 8 - Representação esquemática da técnica de visioplasticidade – rede marcada no material antes e após/durante a operação.	22
Figura 9 - Representação das curvas tensão-deformação para um metal recozido e trefilado.	23
Figura 10 - Utilização da técnica dos perfis de microdureza em barras de alumínio: (a) exemplo de perfil de microdureza Vickers, (b) relação entre a deformação e a microdureza e (c) exemplo de perfil de deformação/cálculo da deformação média na trefilação.....	24
Figura 11 – Fluxograma relativo ao trabalho experimental desenvolvido.	27
Figura 12 – Forno marca <i>Magnus</i> utilizado no trabalho.	28
Figura 13 – Corpo de prova submetido ao ensaio de tração.....	28
Figura 14 – Máquina universal de ensaios marca <i>Instron</i> utilizada no trabalho.	29
Figura 15 - Imagem da prensa de embutimento marca <i>Arotec</i> utilizada no trabalho.	29
Figura 16 - Foto da lixadeira elétrica da marca <i>Struers</i> empregada no trabalho.....	30
Figura 17 - Imagem da politriz utilizada no polimento dos materiais.....	30
Figura 18– Microdurômetro marca <i>Shimadzu</i> utilizada na realização dos ensaios.	31
Figura 19–Representação da posição dos perfis de microdureza, sendo que a figura à direita representa todas as regiões consideradas para o ensaio e na figura à esquerda o detalhamento de uma das “linhas”.	31
Figura 20- Relação entre a deformação e a microdureza: (a) cobre e (b) alumínio 33	33
Figura 21– Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira e redução de área: (a) $\alpha = 20^\circ$, $r = 8\%$; (b) $\alpha = 20^\circ$, $r = 15\%$; (c) $\alpha = 8^\circ$, $r = 8\%$; (d) $\alpha = 8^\circ$, $r = 15\%$; (e) $\alpha = 3^\circ$, $r = 8\%$; (f) $\alpha = 3^\circ$, $r = 15\%$	36
Figura 22– Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira e redução de área: (a) $\alpha = 20^\circ$, $r = 8\%$; (b) $\alpha = 20^\circ$, $r = 15\%$; (c) $\alpha = 8^\circ$, $r = 8\%$, (d) $\alpha = 8^\circ$, $r = 15\%$, (e) $\alpha = 3^\circ$, $r = 8\%$, (f) $\alpha = 3^\circ$, $r = 15\%$	39
Figura 23- Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira e redução de área: (a) $\alpha = 20^\circ$, $r = 8\%$; (b) $\alpha = 20^\circ$, $r = 15\%$; (c) $\alpha = 8^\circ$, $r = 8\%$, (d) $\alpha = 8^\circ$, $r = 15\%$, (e) $\alpha = 3^\circ$, $r = 8\%$, (f) $\alpha = 3^\circ$, $r = 15\%$	42
Figura 24– Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira e redução de área: (a) $\alpha = 20^\circ$, $r = 8\%$; (b) $\alpha = 20^\circ$, $r = 15\%$; (c) $\alpha = 8^\circ$, $r = 8\%$, (d) $\alpha = 8^\circ$, $r = 15\%$, (e) $\alpha = 3^\circ$, $r = 8\%$, (f) $\alpha = 3^\circ$, $r = 15\%$;	44
Figura 25– Relação entre o coeficiente de deformação redundante e o parâmetro Δ obtida através do método dos perfis de microdureza: (a) cobre e (b) alumínio.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química (% em peso) do cobre eletrolítico e da liga de alumínio.	25
Tabela 2– Descrição dos valores de temperatura (°C) e tempo (s) no processo de tratamento térmico.	25
Tabela 3– Descrição dos parâmetros utilizados no processo de trefilação.....	26
Tabela 4- Relação entre a deformação e a microdureza do cobre recozido tracionado	32
Tabela 5- Relação entre a deformação e a microdureza do alumínio recozido tracionado	32
Tabela 6 - Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 20^\circ$, e redução de área $r = 8\%$	33
Tabela 7 - Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 20^\circ$, e redução de área $r = 15\%$	34
Tabela 8 - Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 8^\circ$, e redução de área $r = 8\%$	34
Tabela 9- Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 8^\circ$, e redução de área $r = 15\%$	34
Tabela 10 - Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 3^\circ$, e redução de área $r = 8\%$	34
Tabela 11 - Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 3^\circ$, e redução de área $r = 15\%$	34
Tabela 12 - Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 20^\circ$, e redução de área $r = 8\%$	37
Tabela 13 - Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 20^\circ$, e redução de área $r = 15\%$	37
Tabela 14 - Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 8^\circ$, e redução de área $r = 8\%$	37
Tabela 15 - Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 8^\circ$, e redução de área $r = 15\%$	37
Tabela 16 - Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 3^\circ$, e redução de área $r = 8\%$	37
Tabela 17 - Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe– semi-ângulo de fieira ($\alpha = 3^\circ$), e redução de área ($r = 15\%$)	38
Tabela 18 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 20^\circ$, e redução de área $r = 8\%$	40
Tabela 19 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 20^\circ$, e redução de área $r = 15\%$	40
Tabela 20 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 8^\circ$, e redução de área $r = 8\%$	40
Tabela 21 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 8^\circ$, e redução de área $r = 15\%$	40
Tabela 22 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 3^\circ$, e redução de área $r = 8\%$	40

Tabela 23 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 3^\circ$, e redução de área $r = 15\%$	41
Tabela 24 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 20^\circ$, e redução de área $r = 8\%$	41
Tabela 25 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 20^\circ$, e redução de área $r = 15\%$	41
Tabela 26 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 8^\circ$, e redução de área $r = 8\%$	43
Tabela 27 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 8^\circ$, e redução de área $r = 15\%$	43
Tabela 28 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 3^\circ$, e redução de área $r = 8\%$	43
Tabela 29 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 3^\circ$, e redução de área $r = 15\%$	43
Tabela 30 – Deformação média para cada condição de trefilação.	45
Tabela 31 - ϵ_m e ϕ das barras de cobre eletrolítico trefiladas.	45
Tabela 32 - ϵ_m e ϕ das barras de alumínio trefiladas.	46

LISTA DE ANOTAÇÕES

A_i = Área inicial da seção transversal da barra

A_f = Área final da seção transversal da barra

α = semi-ângulo de trefilação

d_i = diâmetro inicial

d_f = diâmetro final

Δ = parâmetro geométrico

ε = deformação uniforme ou homogênea

ε_m = deformação média na trefilação

r = redução de área na trefilação

ϕ = coeficiente de deformação redundante

1. INTRODUÇÃO

Os processos de conformação mecânica compreendem um conjunto de operações que empregam a deformação plástica de um corpo metálico, mantendo sua massa. Esses processos alteram a geometria do material através de forças aplicadas por ferramentas adequadas, que podem variar desde pequenas matrizes até grandes cilindros. Além dessas mudanças de dimensões, esperam-se também alterações nas propriedades mecânicas do material.

O número dos diferentes processos de conformação mecânica, desenvolvidos para aplicações específicas, atinge atualmente algumas centenas. É possível classificá-los em um pequeno número de categorias, com base em critérios tais como: o tipo de esforço que provoca a deformação do material, a variação relativa da espessura da peça, o regime da operação de conformação, o propósito da deformação, dentre outros aspectos.

Basicamente os processos de conformação podem ser classificados em: forjamento, laminação, extrusão, estampagem e trefilação, sendo este último o processo ao qual será dada ênfase neste trabalho. Neste caso, especificamente, será abordada a deformação nessa operação. Um dos fenômenos mais relevantes é a ocorrência de um processo de distorção interna no metal durante sua passagem pela matriz, que dá origem à deformação redundante. Essa, por sua vez, em conjunto com a deformação externa constitui a deformação efetiva na operação, sendo decrescente da superfície para o centro da peça, podendo levar à ocorrência de perfis de deformação heterogêneos ao longo da seção transversal e, conseqüentemente, a uma distribuição heterogênea das propriedades mecânicas. Diversos métodos vêm sendo empregados na análise da deformação na trefilação, envolvendo abordagens experimentais, teóricas e numéricas.

Dentro deste contexto, neste trabalho foi realizado um estudo da deformação na trefilação de barras de cobre e alumínio através da técnica experimental dos perfis de microdureza.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho foi à análise da deformação na trefilação em um passe de barras de cobre eletrolítico e de uma liga de alumínio através da técnica experimental dos perfis de microdureza.

2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são listados a seguir.

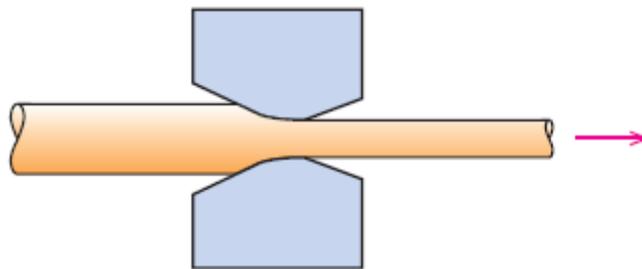
- Determinação da distribuição de microdureza dos materiais trefilados em um passe.
- Obtenção de uma relação entre a deformação e a microdureza para os metais investigados.
- Análise da distribuição de deformação ao longo da seção transversal dos metais trefilados.
- Determinação da relação entre o coeficiente de deformação redundante e o parâmetro Δ .
- Avaliação dos efeitos das características estruturais dos materiais nos resultados.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Características Gerais do Processo de Trefilação

Segundo Bresciani Filho et al. (1991), a trefilação é uma operação de conformação mecânica que é realizada através da aplicação de esforços de tração à saída matriz do processo, denominada fieira, forçando a passagem do material através de uma ferramenta denominada fieira. Geralmente, esse material apresenta simetria circular, podendo se tratar de barras, vergalhões, arames e tubos. Uma das principais características do produto trefilado é a tolerância dimensional e o bom acabamento superficial (CETLIN e HELMAN, 2005). Como o esforço externo é de tração, e o esforço que provoca a deformação é a compressão exercida pelas paredes da ferramenta sobre o fio, o processo de trefilação é classificado como um processo de compressão indireta. A operação de trefilação pode ser observada na representação esquemática da Figura 1 (CALLISTER, 2008).

Figura 1 - Representação esquemática da operação de trefilação.



Fonte: CALLISTER (2008)

A redução sucessiva de diâmetros pode resultar em barras, vergalhões e fios dependendo do diâmetro final do produto. Por outro lado, a trefilação pode também ser realizada em tubos e, neste caso, existem diversas técnicas empregadas, com a utilização ou não de um mandril interno ao tubo que permite um melhor controle da espessura final.

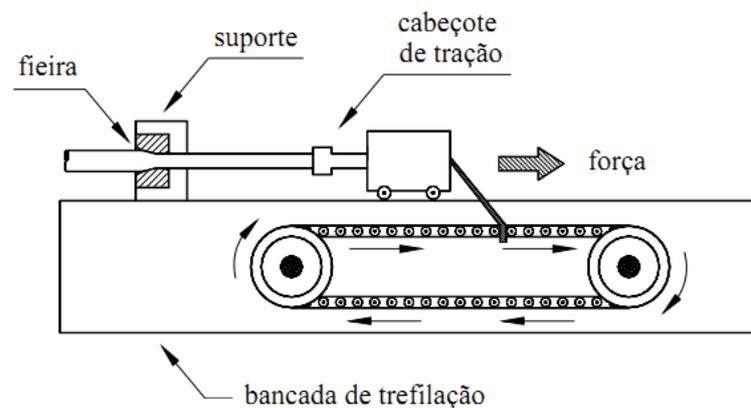
Esse processo de trefilação pode ser considerado uma operação de conformação mecânica realizada a frio, apesar das temperaturas no local das ferramentas se elevarem consideravelmente em função das condições de atrito e da velocidade de trabalho. No entanto, a temperatura de trabalho se encontra abaixo da temperatura de recristalização, levando assim

à ocorrência de encruamento, alterando propriedades mecânica do material, como a ductilidade e a resistência mecânica. Pode-se contornar essa situação com a realização de um tratamento térmico de recozimento, retornando a ductilidade do material necessária para o prosseguimento do processo.

A matéria-prima para o processo de trefilação é um produto na forma de arame, barra ou tubo obtido pelo processo de extrusão (em geral, para materiais não-ferrosos) ou pelo processo de laminação (para materiais ferrosos e também os não-ferrosos). O material mais usado é comumente denominado fio-máquina, sendo uma barra laminada a quente que não se fabrica em diâmetros menores que 5,5 mm, com isso têm-se a necessidade de uma maior redução de área.

Os equipamentos para trefilação classificam-se em dois grupos básicos: bancadas de trefilação (utilizadas para produção de componentes não bobináveis como barras e tubos) e trefiladoras de tambor (utilizada para produção de componentes bobináveis, ou seja, arames) (CETLIN; HELMAN, 2005). Nas Figuras 2 e 3 podem ser observados representações esquemáticas dos equipamentos mencionados (CORRÊA, 2004; DIETER, 1986)

Figura 2 - Representação da bancada de trefilação.



Fonte: CORRÊA (2004)

3.2. Processo de Trefilação

a) Tratamentos químicos e mecânicos

A preparação ou confecção da matéria-prima para o processo de trefilação ocorre em operações de deformação plástica a quente. No entanto, o aquecimento do metal leva ao

desenvolvimento de camadas de óxidos na superfície das peças, que devem ser retiradas, pois podem reduzir a vida útil da matriz e ainda ficar inclusas no produto trefilado, levando a problemas na sua qualidade, em termos de acabamento superficial e tolerância dimensional (BRESCIANI FILHO et al., 2011). A retirada da camada de óxidos pode ser por meio químico, denominada decapagem, ou por meio mecânico, denominada rebarbação. A utilização de umas dessas técnicas depende do custo e da qualidade superficial e de tolerância exigida do fio. A rebarbação é um processo de usinagem, portanto leva à produção de cavaco, tendo assim custo mais elevado. Por outro lado, essa operação leva à obtenção de um produto que apresenta melhor qualidade que aquele no qual é conduzido o procedimento de decapagem. A decapagem, por sua vez, consiste na imersão dos fios ou barras em tanques com soluções ácidas e lavagem em duas etapas, inicialmente com apenas água fria e posteriormente com água aquecida, essa última contendo aditivos neutralizantes da ação ácida.

b) Tratamento térmico de recozimento

Durante o processo de trefilação, que é realizado abaixo da temperatura de recristalização, o fio sofre um efeito de aumento da sua resistência mecânica e de redução da sua ductilidade, devido à deformação plástica, caracterizando o denominado efeito de encruamento. Acima de certo grau de encruamento não é mais possível trabalhar o fio, sendo então necessária a aplicação de um tratamento térmico de recozimento, caso o processo de trefilação em uma barra ou fio seja aplicado diversas vezes.

c) Lubrificação na trefilação

Os agentes lubrificantes são geralmente compostos de produtos líquidos ou sólidos emulsionáveis em água cuja concentração decresce com a diminuição do diâmetro do fio a trefilar. Esses compostos têm a finalidade de criar entre as superfícies de contato uma película contínua de fluido lubrificante para reduzir o atrito (BRESCIANI FILHO et al., 2011). O atrito é muito importante no processo de trefilação devido ao movimento relativo entre o fio e a fieira. O aumento desse atrito provoca maior desgaste da ferramenta e pode ocasionar o aparecimento de defeitos superficiais no fio, além de exigir maiores esforços de trefilação do equipamento e levar à elevação na temperatura. O coeficiente de atrito entre o metal trefilado e a fieira depende da natureza da superfície em contato e das condições de lubrificação. O calor gerado por esse atrito será controlado pela ação do agente lubrificante, que tem também uma ação de refrigerante. A ação lubrificante tem como consequência a diminuição do desgaste da fieira, dar bom acabamento superficial ao fio e reduzir o esforço da trefilação.

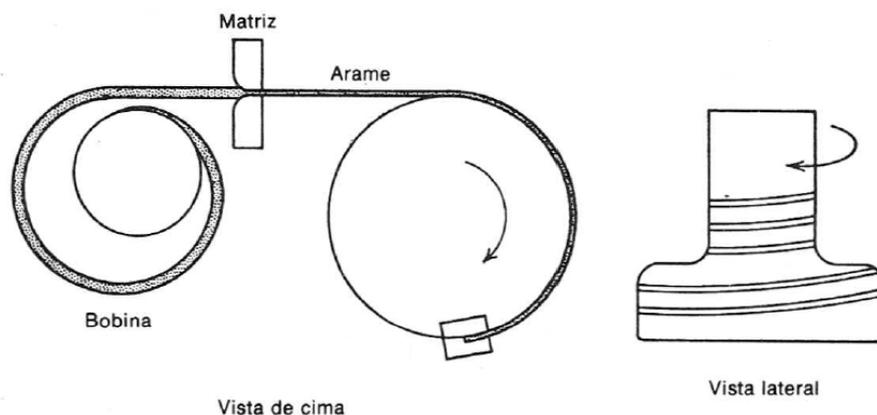
d) Classificação dos produtos trefilados

A classificação dos produtos trefilados é realizada em função do tipo de produto observado: barra, tubo, arame ou fio (BRESCIANI FILHO et al., 2011). As peças com seção transversal de diâmetro inferior a 5 mm são classificadas como arames ou fios, sendo que a primeira denominação é empregada quando o uso é para a construção mecânica e a segunda para aplicação em fins elétricos.

3.3. Características Geométricas do Processo de Trefilação

A fieira é o dispositivo básico da trefilação e compõe todos os equipamentos, tendo como função principal a realização da deformação plástica do material. É constituída por quatro regiões distintas, sendo a primeira região o cone de entrada, que tem por finalidade guiar o fio em direção à segunda zona, o cone de trabalho, local no qual ocorre a redução de área, e mais a frente do processo aparece a zona cilíndrica e, por fim, a zona de saída (BRESCIANI FILHO et al., 2011). Na Figura 4 pode ser observada uma representação esquemática de uma fieira de trefilação com as quatro zonas mencionadas, assim como os diâmetros inicial d_i e final d_f da operação (CORRÊA, 2004).

Figura 3 - Representação de trefilador de tambor.

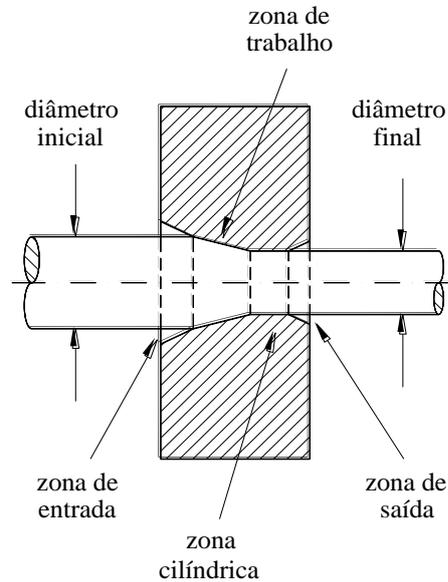


Fonte: DIETER (1986)

De acordo com Cetlin e Helman (2005), a geometria da fieira é construída de maneira diferente em cada região. A zona de entrada da fieira apresenta um ângulo maior em relação ao ângulo de trefilação, cujo objetivo é facilitar o processo de lubrificação. A zona cilíndrica é necessária por razões de fabricação e manutenção da matriz, e para dar estabilidade

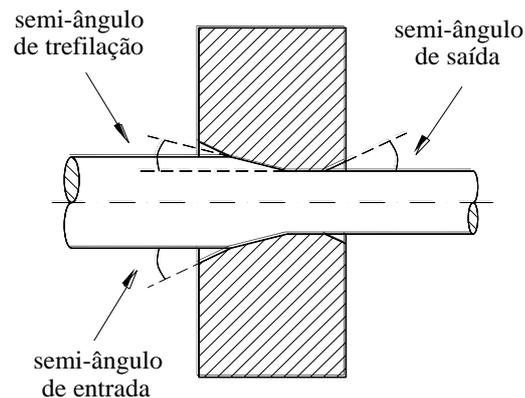
dimensional ao produto. Na Figura 5 é mostrada uma representação de uma fieira de trefilação com os ângulos de entrada, trabalho e saída (CORRÊA, 2004).

Figura 4 - Representação das zonas da fieira de trefilação



Fonte: CORRÊA (2004)

Figura 5 - Representação dos ângulos da fieira de trefilação



Fonte: CORRÊA (2004)

As fieiras de trefilação são geralmente construídas de acordo com as exigências do processo e do produto (dimensões, acabamento superficial, esforços) e das características estruturais do material metálico a ser trefilado. Os materiais mais utilizados para fabricação das fieiras são geralmente o carboneto de tungstênio, aços de alto carbono revestidos de cromo, aços

especiais (Cr-Ni, Cr-Mo, Cr-W) e diamante (BRESCIANI FILHO et al., 2011; CETLIN; HELMAN, 2005).

A redução de área r na operação de trefilação é um dos fatores mais importantes no processo, uma vez que, além levar às dimensões do produto, afeta as características da deformação e as propriedades mecânicas finais do material. O cálculo da redução de área na trefilação de barras é realizado a partir das áreas inicial A_i e final A_f , segundo a Equação 1 (CORRÊA, 2004).

$$r = \frac{A_i - A_f}{A_i} \quad \text{ou} \quad r = 1 - \frac{d_f^2}{d_i^2} \quad (1)$$

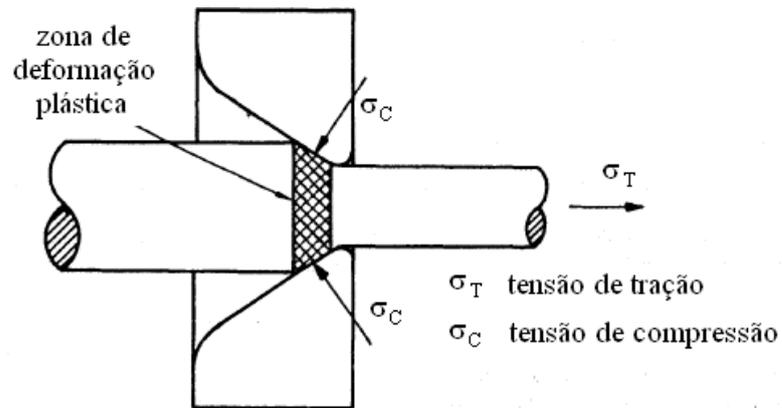
Outro aspecto fundamental para o processo é o semi-ângulo de fieira α que, assim como a redução de área, influencia nas características da operação de conformação e nas propriedades mecânicas finais do metal trefilado. Ambas variáveis podem ser associadas através do parâmetro geométrico Δ , conforme a Equação 2 (CADDELL; ATKINS, 1968), que considera os diâmetros inicial e final do material. Esse parâmetro costuma ser empregado em estudos associados às características da deformação na operação.

$$\Delta = \frac{d_i + d_f}{d_i - d_f} \text{ sen } \alpha \quad (2)$$

3.4. Deformação no Processo de Trefilação

A deformação plástica na trefilação ocorre em função da presença de esforços trativos, que movimentam o material na direção axial, e esforços compressivos, realizados pela parede da matriz sobre o material, causando deformação na direção radial. Considera-se que a maior parte do escoamento plástico é causada por esforços de compressão resultantes da reação do metal com a matriz (DIETER, 1982). A Figura 6 mostra uma representação das tensões de tração (externa) e de compressão (aplicada pela paredes da fieira) presentes no processo de trefilação (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

Figura 6 - Representação da passagem do fio pela fieira e dos esforços presentes no processo de trefilação.



Fonte: BRESCIANI (2011)

Em virtude das características mencionadas anteriormente, a trefilação exhibe um processo de distorção ou cisalhamento do material metálico na zona de deformação plástica, que não contribui diretamente para a alteração nas dimensões do componente, afetando apenas o comportamento no interior do material. Maiores detalhes são fornecidos nas seções 3.4.1, 3.4.2 e 3.4.3. Dessa forma, segundo Cetlin e Helman (2005), o estudo do processo de trefilação envolve uma série de fatores, tais como: a análise dos esforços necessários para executar a operação, os efeitos da lubrificação na interface fieira/metal, o acabamento e as propriedades mecânicas finais do produto, a evolução térmica do produto sob a conformação, ou seja, todos os fatores que podem afetar direta ou indiretamente na deformação do material.

Há uma grande importância na análise da deformação no processo de trefilação, uma vez que a mesma afeta a própria operação, por meio de modificações no trabalho e nas tensões envolvidas, e as propriedades do material trefilado. Neste contexto, pode-se mencionar que a deformação na trefilação seja composta por duas “parcelas”, deformação homogênea e deformação redundante, que em conjunto constituem a deformação média na operação.

3.4.1. Deformação homogênea

A deformação homogênea está associada apenas às alterações dimensionais do material no processo de trefilação, considerando as modificações observadas nas áreas inicial e final, podendo ser determinada através da Equação 3 (CETLIN; HELMAN, 2005). Essa deformação não considera quaisquer fatores externos do processo, não abrangendo o efeito do

atrato e nem mesmo a forma como esse material sofre a deformação no interior da matriz de trefilação.

$$\varepsilon = \ln \left[\frac{A_i}{A_f} \right] \quad \text{ou} \quad \varepsilon = \ln \left[\frac{1}{1-r} \right] \quad (3)$$

3.4.2. Deformação redundante

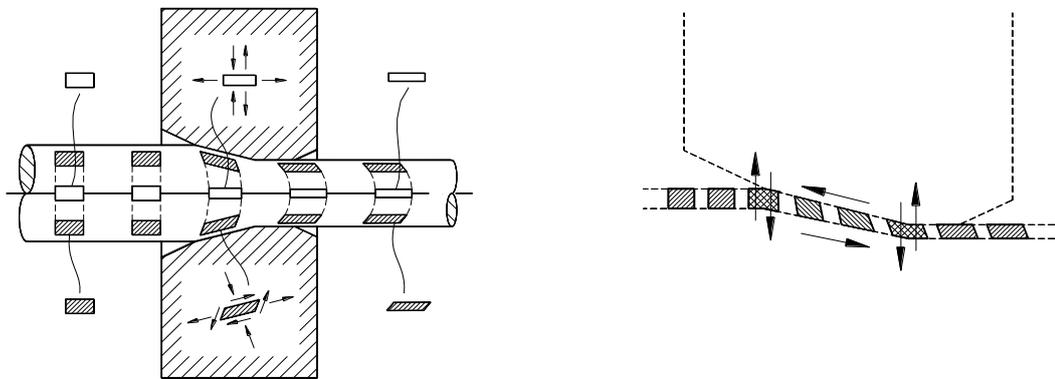
Conforme Cetlin e Helman (2005), o material a ser trefilado, na região próxima à superfície da barra ou arame, quando direcionado à matriz, adquire uma velocidade inicial, sendo essa uma componente perpendicular ao eixo da peça. Ao afastar-se da matriz (região próxima ao centro/eixo da barra ou arame), esse segue seu movimento paralelo ao eixo. Como se deduz na Figura 7 (CORRÊA, 2004), o material sofre internamente deformações cisalhantes (ou um processo de distorção), à entrada e à saída da fiação, decrescentes da superfície para o centro, que não contribuem para as mudanças dimensionais da barra trefilada. Essa deformação extra é chamada de “deformação redundante”, que origina por sua vez o chamado trabalho redundante (BACKOFEN, 1972; MAJZOABI; SANIEE; AGHILI, 2008). Como consequência da ocorrência da deformação redundante, em termos de deformação efetiva (que envolve as parcelas de deformação redundante e deformação homogênea), observa-se na trefilação o desenvolvimento de perfis de deformação heterogêneos ao longo da seção transversal do material (LIN; HSU; KEH, 2008).

Existe uma relação entre a deformação (e o trabalho) redundante e o semi-ângulo da matriz, ou seja, de maneira geral, considerando uma mesma redução em área, quanto maior for o semi-ângulo mais elevada será a magnitude da deformação redundante. Em relação aos efeitos do atrito na geometria de fluxo do metal durante a trefilação, Cetlin e Helman (2005), em estudos considerando uma ampla faixa de materiais e lubrificantes, verificaram que o atrito não afetava diretamente a deformação redundante e que a mesma dependeria realmente de forma preferencial do semi-ângulo e da redução de área.

Considerando o fenômeno de encruamento, em geral, é perceptível que um maior semi-ângulo de fiação leva a um produto final com uma tensão de escoamento superior ao de um material no qual foi realizada a mesma quantidade de deformação homogênea. Com isso, pode-se fazer

uma comparação nos materiais trefilados e tracionados, pois o efeito da deformação redundante em barras trefiladas resulta em uma maior dureza quando comparada com barras tracionadas. Em adição a esse fenômeno, em virtude da distribuição não uniforme de deformação ao longo da seção transversal do trefilado, verifica-se também uma distribuição heterogênea das propriedades mecânicas (SADOK; LUKSZA; MAJTA, 1994; KAZEMINEZHAD, 2008).

Figura 7 - Representação esquemática da deformação redundante.



Fonte: CORRÊA (2004)

3.4.3. Deformação média

A deformação média na trefilação representa a união das duas deformações citadas anteriormente, a deformação redundante, originada devido ao processo de cisalhamento interno no material, e a deformação homogênea, relativa à alteração dimensional da barra. As deformações externa e média na operação se relacionam através do coeficiente de deformação redundante, conforme a Equação 4 (CETLIN, 1984).

$$\varepsilon_m = \phi \varepsilon \quad (4)$$

3.5. Análise da Deformação na Trefilação Através dos Métodos Experimentais

As principais técnicas experimentais desenvolvidas para a avaliação da deformação na trefilação são os métodos de visioelasticidade, de superposição das curvas tensão-deformação e dos perfis de microdureza.

3.5.1. Visioplaticidade

A visioplaticidade associa o trabalho experimental com o estudo analítico dos mecanismos de deformação plástica. Essa técnica consiste na obtenção de campos de vetores de velocidade do metal conformado seguida da determinação das distribuições de taxa de deformação, de deformação efetiva e de tensão efetiva (CORRÊA, 2004). Esse método é considerado como um dos que descreve com mais precisão o comportamento do material, permitindo também o estudo em diversas outras operações.

A técnica é iniciada com a marcação de uma rede na região de interesse do material (Figura 8), de acordo com o escoamento do mesmo, que é fotografada após cada incremento de deformação, possibilitando a observação da mudança de posição das interseções da rede mencionada (CORRÊA, 2004). No caso da trefilação, operação caracterizada por um estado de escoamento estacionário, apenas uma imagem é capaz de fornecer as informações necessárias para a determinação do campo de velocidades. A partir dos campos de velocidades, os componentes de taxa de deformação radial, axial, angular e de cisalhamento são calculados e, por fim, a deformação efetiva.

Figura 8 - Representação esquemática da técnica de visioplaticidade – rede marcada no material antes e após/durante a operação.

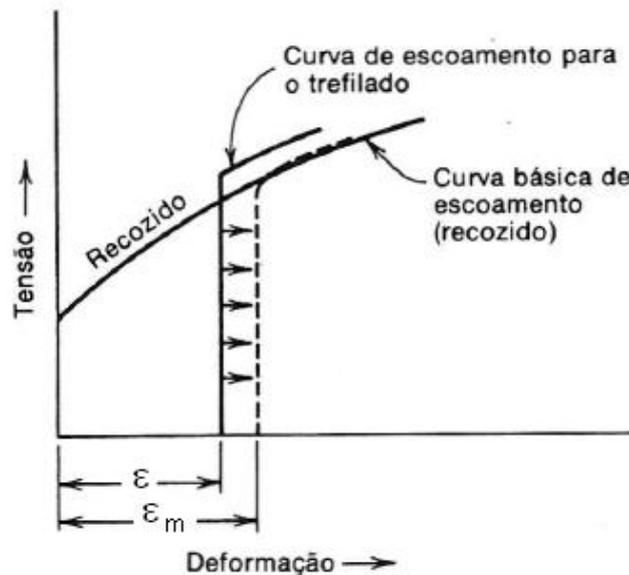


Fonte: CORREA (2004)

3.5.2. Superposição das curvas tensão-deformação

Outro método utilizado no estudo da deformação na trefilação é o de superposição das curvas tensão-deformação, que leva à obtenção da deformação média no processo (CORRÊA, 2004). Essa técnica foi desenvolvida a partir de uma análise teórica da tensão de trefilação, possibilitando a determinação da deformação média a partir da comparação (superposição) das curvas obtidas em testes de tração de amostras recozida e trefilada na condição de interesse, conforme a Figura 9 (DIETER, 1982; CETLIN, 1987).

Figura 9 - Representação das curvas tensão-deformação para um metal recozido e trefilado.



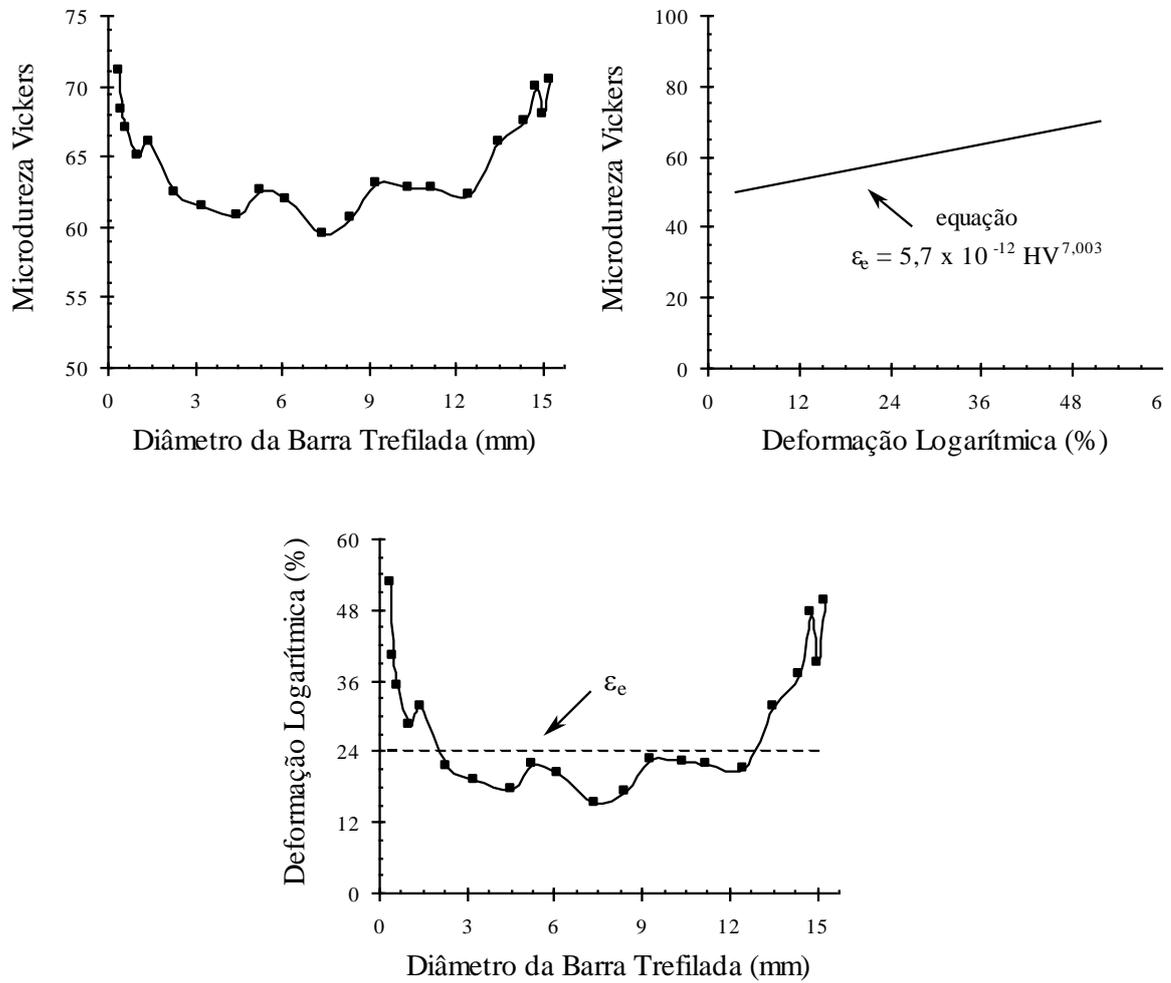
Fonte: DIETER (1982)

3.5.3. Perfis de microdureza

O método dos perfis de microdureza, tema analisado neste trabalho, consiste na obtenção da distribuição da deformação ao longo da seção transversal da barra através do perfil de microdureza da mesma e de uma relação entre essa propriedade e a deformação efetiva, previamente determinada empregando amostras apenas tracionadas (BACKOFEN, 1972). Após a obtenção da distribuição de deformação, é possível calcular a deformação média na operação pela integração na área ou no volume da curva, previamente descrita/aproximada de um polinômio ou outra formulação matemática.

Na Figura 10 podem ser observados como exemplos resultados obtidos através da técnica dos perfis de microdureza para barras de alumínio trefiladas em um passe, na qual é mostrada a distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do material após a operação, a relação entre a deformação e a microdureza obtida a partir de amostras tracionadas em diferentes magnitudes e a distribuição de deformação determinada através do emprego dos dados das duas primeiras imagens (CETLIN, 1984).

Figura 10 - Utilização da técnica dos perfis de microdureza em barras de alumínio: (a) exemplo de perfil de microdureza Vickers, (b) relação entre a deformação e a microdureza e (c) exemplo de perfil de deformação/cálculo da deformação média na trefilação



Fonte: CETLIN (1984)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

Os materiais avaliados foram o cobre eletrolítico e uma de liga de alumínio. Na Tabela 1 é exibida a composição química (% em peso) de cada um desses metais.

Tabela 1 - Composição química (% em peso) do cobre eletrolítico e da liga de alumínio.

Cobre Eletrolítico	Liga de Alumínio
0,01% Sn	0,373% Mg
0,018% Pb	0,27% Si
0,01% Fe	0,123% Fe
0,012% Zn	0,011% Cu
0,049% Al	0,032% Mn

Fonte: Produzida pela autora.

Uma parte dos materiais foi oriunda de um trabalho desenvolvido anteriormente (CORRÊA, 2004), consistindo em barras dos mesmos previamente recozidas nas condições apresentadas na Tabela 2 e posteriormente trefiladas em um passe empregando os parâmetros mostrados na Tabela 3. Maiores detalhes das operações realizadas podem ser observados no trabalho de Corrêa (2004). Dessa forma, para esta etapa, os materiais no estado inicial consistiram em barras trefiladas, que possibilitaram a obtenção das distribuições de microdureza ao longo da seção transversal das mesmas.

Tabela 2– Descrição dos valores de temperatura (°C) e tempo (s) no processo de tratamento térmico.

	Temperatura (°C)	Tempo (min)
Cobre	570°C	90
Alumínio	400°C	60

Fonte: Produzida pela autora

Tabela 3– Descrição dos parâmetros utilizados no processo de trefilação.

Diâmetro inicial dos corpos de prova	Semi-ângulos	Reduções de área
10,43mm	20°, 8° e 3°	8%
10,85mm	20°, 8° e 3°	15%

Fonte: Produzida pela autora

A outra parte dos materiais, que foi empregada para a determinação de uma relação entre a deformação efetiva e a microdureza para cada material a partir de amostras tracionadas em diferentes magnitudes de deformação, consistiu de barras no estado original, ou seja, como adquiridas, após o recozimento.

4.2. Características Gerais do Trabalho Realizado

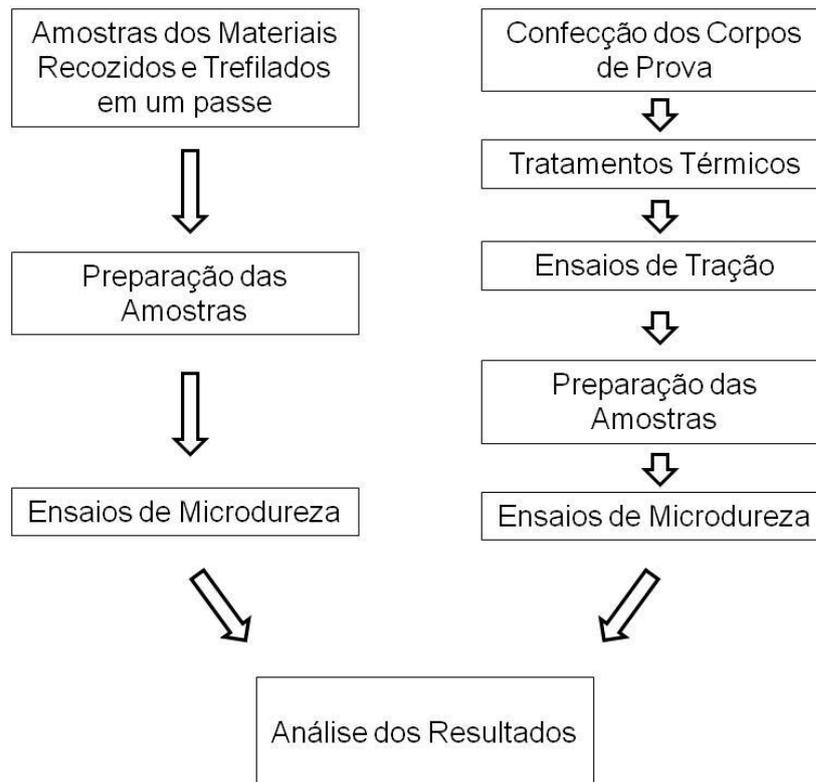
O trabalho consistiu na determinação da distribuição de deformação ao longo da seção transversal dos materiais trefilados, no cálculo da deformação média para cada situação e na obtenção de uma relação entre o coeficiente de deformação redundante e o parâmetro geométrico Δ .

Em termos experimentais, inicialmente, amostras das barras de cobre e alumínio já trefiladas foram preparadas metalograficamente e foram submetidas a ensaios de microdureza, conduzidos ao longo da seção transversal das peças de forma a levar à obtenção da distribuição de microdureza.

Paralelamente, corpos de prova dos materiais foram recozidos e tracionados até diferentes magnitudes de deformação efetiva. Em seguida, amostras desses corpos de prova também foram preparadas metalograficamente e submetidas a ensaios de microdureza. A partir destes resultados e dos valores de deformação efetiva foi determinada uma relação entre a deformação e a microdureza para cada material.

Na Figura 11 pode ser observado um fluxograma relativo ao trabalho experimental realizado, no qual podem ser verificadas as etapas associadas à determinação dos perfis de microdureza dos materiais trefilados e à obtenção da relação deformação x microdureza.

Figura 11 – Fluxograma relativo ao trabalho experimental desenvolvido.



Fonte: Produzida pela autora

4.3. Ensaio de Tração

Os ensaios de tração também foram realizados em uma máquina marca *Instron* modelo 5582, a uma velocidade de $6,67 \times 10^{-2}$ mm/s. Os testes foram executados nos corpos-de-prova recozidos até distintos valores de deformação, de maneira que pudesse ser obtida posteriormente a relação deformação - microdureza. O recozimento dos corpos de prova foi realizado nas mesmas condições descritas na Tabela 2, porém em um forno da marca *Magnus*, apresentado na Figura 12. Na Figura 13 é mostrada uma representação do corpo de prova utilizado nos ensaios e na Figura 14 uma imagem do equipamento.

4.4. Ensaio de Microdureza

As amostras trefiladas nas diferentes condições e as amostras tracionadas até distintas magnitudes de deformação foram preparadas metalograficamente através de corte com disco

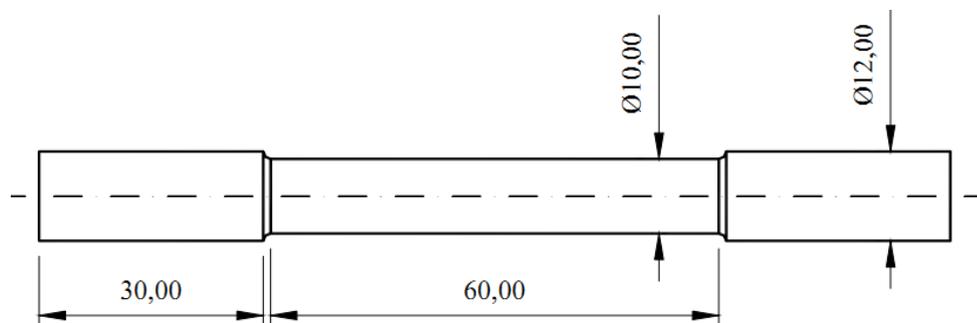
abrasivo de óxido de alumínio, embutimento a quente com baquelite, lixamento com óxido de alumínio com diferentes granulometrias (#120, #240, #320, #400, #600, #1000) e polimento com pasta de diamante com as granulometrias de $9\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}$ e $1\mu\text{m}$. Nas Figuras 15, 16 e 17 são apresentadas imagens dos principais equipamentos utilizados nesta etapa: prensa de embutimento a quente marca *Arotec*, lixadeira semi-automática marca *Struers* e politriz semi-automática marca *Arotec*.

Figura 12 – Forno marca *Magnus* utilizado no trabalho.



Fonte: Produzida pela autora

Figura 13 – Corpo de prova submetido ao ensaio de tração.



dimensões em milímetros

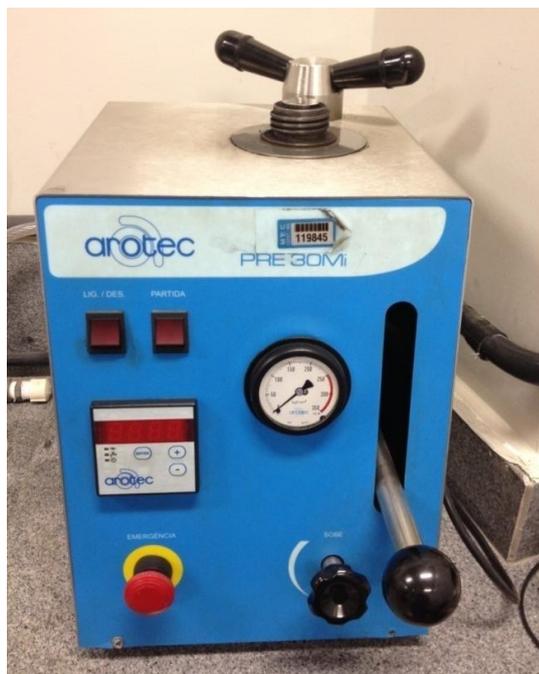
Fonte: CORRÊA (2004)

Figura 14 – Máquina universal de ensaios marca *Instron* utilizada no trabalho.



Fonte: Produzida pela autora

Figura 15 - Imagem da prensa de embutimento marca *Arotec* utilizada no trabalho.



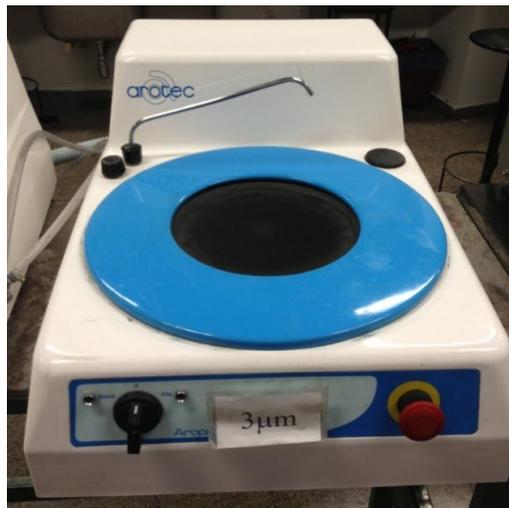
Fonte: Produzida pela autora

Figura 16 - Foto da lixadeira elétrica da marca *Struers* empregada no trabalho.



Fonte: Produzida pela autora

Figura 17 - Imagem da politriz utilizada no polimento dos materiais



Fonte: Produzida pela autora

Os ensaios de microdureza foram executados em um microdurômetro da marca Shimadzu modelo HV-2T, mostrado na Figura 18. Todos os testes foram conduzidos na seção transversal das amostras, com carga de 300gf e o tempo de indentação de 15s. Para os corpos-de-prova apenas tracionados (em diferentes magnitudes), os testes foram realizados aleatoriamente e foi considerado um valor médio correspondente a cada valor de deformação, dentro de um total de seis ensaios. Para as peças trefiladas, os ensaios (quatro para cada condição) foram realizados ao longo do raio das peças, como mostra a Figura 19. Neste caso,

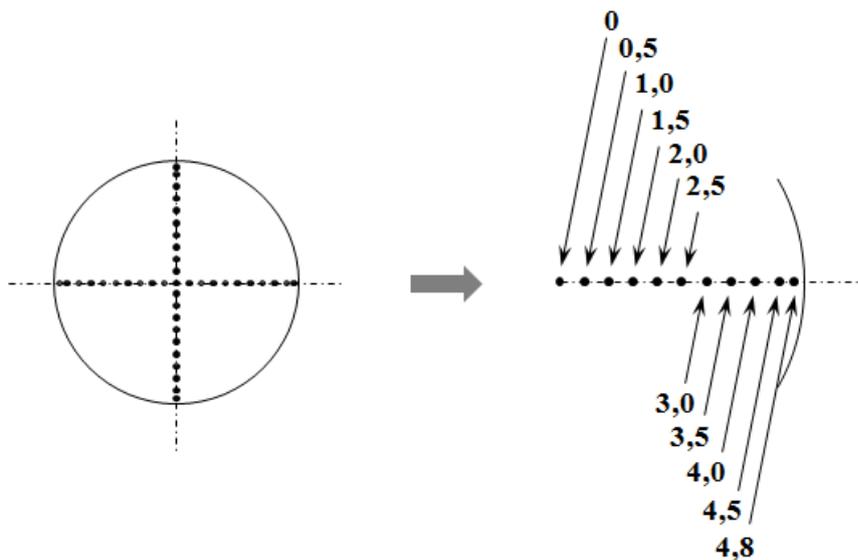
perfis foram divididos em 11 posições, com distância de 0,5mm uma da outra e no final uma distância de 0,3mm para não coincidir com a superfície da peça.

Figura 18– Microdurômetro marca *Shimadzu* utilizada na realização dos ensaios.



Fonte: Produzida pela autora

Figura 19–Representação da posição dos perfis de microdureza, sendo que a figura à direita representa todas as regiões consideradas para o ensaio e na figura à esquerda o detalhamento de uma das “linhas”.



Fonte: Produzida pela autora

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Relação entre a Deformação e a Dureza para Cobre e para o Alumínio

Nos metais tracionados, a princípio, para uma mesma seção transversal, a deformação é uniformemente distribuída em toda região até o ponto de carga máxima. Dessa forma, as posições na seção transversal dessas amostras nas quais o ensaio de microdureza foi realizado foram escolhidas de forma aleatória. Os resultados de microdureza médios obtidos para os metais apenas tracionados e os valores de deformação para cada situação são exibidos nas Tabelas 4 e 5 para o cobre e para o alumínio, respectivamente. De maneira geral, conforme o esperado, observa-se que os valores de dureza aumentaram com a deformação na tração.

Tabela 4- Relação entre a deformação e a microdureza do cobre recozido tracionado

Cobre Recozido Tracionado – Microdureza e Deformação										
mHV	82	98	111	115	116	118	122	124	131	132
ϵ	0,08	0,17	0,34	0,37	0,40	0,42	0,70	0,65	1,28	1,40

Fonte: Produzida pela autora

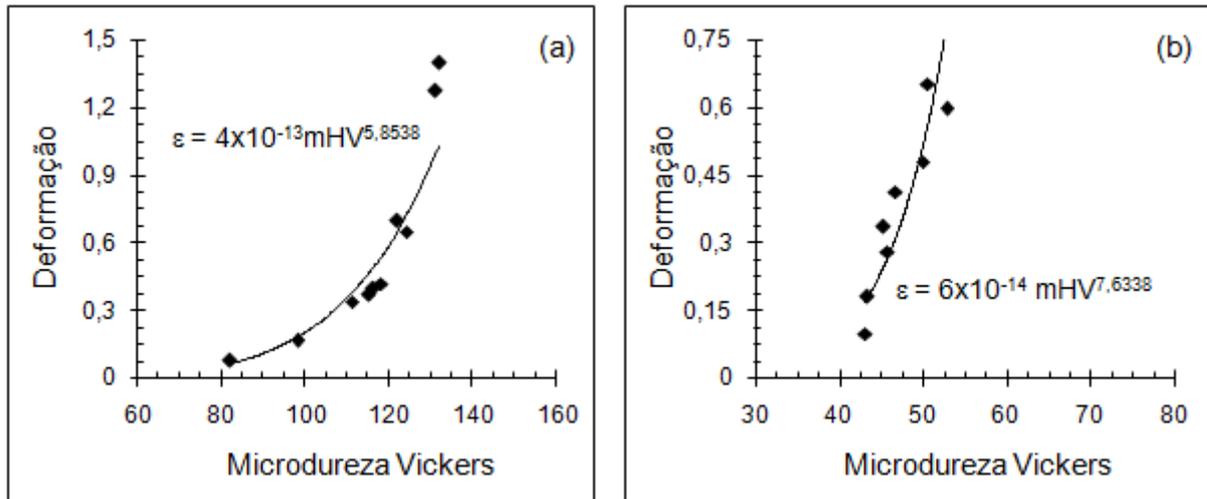
Tabela 5- Relação entre a deformação e a microdureza do alumínio recozido tracionado

Alumínio Recozido Tracionado – Microdureza e Deformação									
mHV	43,1	43,4	42,3	45,9	46,7	50,0	50,6	52,9	
ϵ	0,10	0,18	0,34	0,28	0,41	0,48	0,65	0,6	

Fonte: Produzida pela autora

A partir dos dados apresentados anteriormente foram elaboradas curvas e determinadas expressões relacionando a deformação com a microdureza, exibidas na Figura 20. Observa-se que, como na literatura (CETLIN, 1984), o modelo de equação escolhido foi o de potência. Tanto o alumínio como o cobre são metais relativamente dúcteis e susceptíveis à conformação, passíveis também durante a deformação plástica a frio ao fenômeno de enncruamento.

Figura 20- Relação entre a deformação e a microdureza: (a) cobre e (b) alumínio



Fonte: Produzida pela autora

5.2. Distribuição de Microdureza ao Longo da Seção Transversal do Cobre Trefilado

Os resultados de microdureza determinados ao longo da seção transversal do cobre trefilado são exibidos nas Tabelas 6 a 11, organizadas de acordo com as condições de trefilação. Verifica-se o efeito tanto da posição ao longo da seção transversal do material como dos parâmetros da operação de conformação. Percebe-se que, em geral, para maiores semi-ângulos, considerando uma mesma redução de área, e para maiores reduções, considerando um mesmo semi-ângulo, os valores de microdureza são mais elevados. Em relação à primeira análise, esse comportamento é associado ao processo de cisalhamento/distorção ao qual o material é submetido. Em relação à segunda análise, os resultados são associados ao aumento na deformação homogênea no processo.

Tabela 6 - Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de feira $\alpha = 20^\circ$, e redução de área $r = 8\%$.

Cobre Trefilado em um Passe – $\alpha = 20^\circ$, $r = 8\%$											
R (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
mHV	87,9	89,2	88,4	91,4	89,92	92,81	91,4	89,81	94,3	101,09	111,42

Fonte: Produzida pela autora

Tabela 7 - Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de feira $\alpha = 20^\circ$, e redução de área $r = 15\%$.

Cobre Trefilado em um Passe – $\alpha = 20^\circ$, $r = 15\%$											
R (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
mHV	96,65	100,18	96,95	101,33	99,7	97,12	99,41	102,58	105,35	109,61	107,95

Fonte: Produzida pela autora

Tabela 8 - Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de feira $\alpha = 8^\circ$, e redução de área $r = 8\%$.

Cobre Trefilado em um Passe – $\alpha = 8^\circ$, $r = 8\%$											
raio (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
mHV	84,2	85,33	87,19	88,86	89,65	91,72	89,97	85,59	93,64	93,17	95,9

Fonte: Produzida pela autora

Tabela 9- Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de feira $\alpha = 8^\circ$, e redução de área $r = 15\%$.

Cobre Trefilado em um Passe – $\alpha = 8^\circ$, $r = 15\%$											
raio (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
mHV	94,9	96,32	96,14	93,41	92,4	93,47	89,09	94,49	95,51	98,1	99,93

Fonte: Produzida pela autora

Tabela 10 - Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de feira $\alpha = 3^\circ$, e redução de área $r = 8\%$.

Cobre Trefilado em um Passe – $\alpha = 3^\circ$, $r = 8\%$											
raio (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
mHV	84,9	83,62	86,04	86,5	84,9	84,8	86,43	86,03	86,34	87,6	87,1

Fonte: Produzida pela autora

Tabela 11 - Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de feira $\alpha = 3^\circ$, e redução de área $r = 15\%$.

Cobre Trefilado em um Passe – $\alpha = 3^\circ$, $r = 15\%$											
raio (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
mHV	96,4	94,41	96,95	95,67	97,78	94,49	96,8	96,77	96,27	97,27	95,59

Fonte: Produzida pela autora

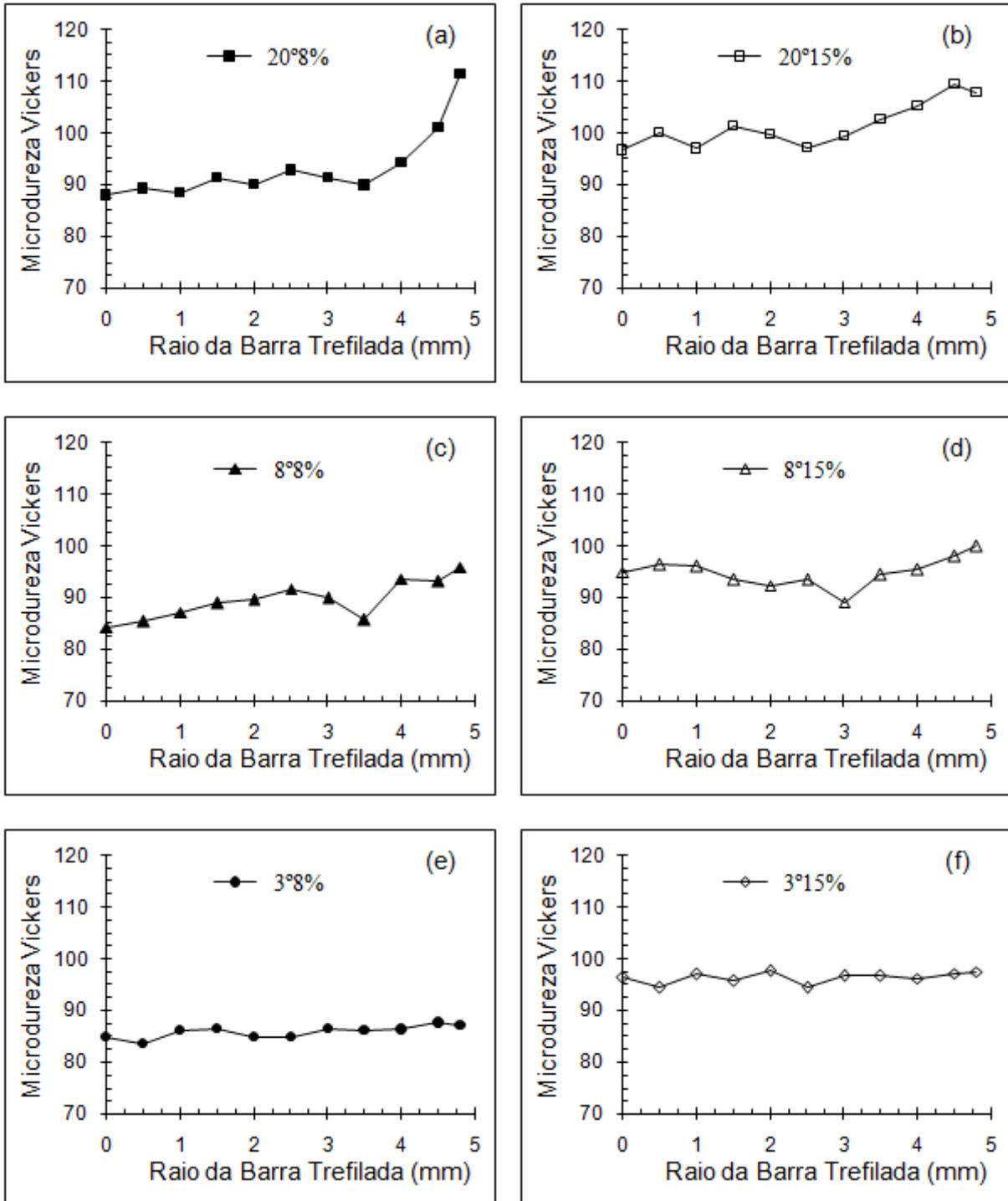
O comportamento do cobre trefilado pode ser observado de forma mais clara na Figura 21, na qual são apresentados perfis de microdureza do metal nas seis condições de trefilação. Verifica-se que, para o semi-ângulo de 20° , a distribuição de dureza na barra trefilada é heterogênea, ou seja, a dureza do material na região central da amostra é inferior àquela observada na superfície. Essa não homogeneidade, entretanto, é mais acentuada para a redução de 8% do que para 15%. Resultados similares são verificados para o semi-ângulo de 8° . No entanto, neste caso, a diferença entre os valores do centro e da superfície da barra são mais suaves. Por fim, para o semi-ângulo de 3° , a distribuição da propriedade mecânica é relativamente uniforme. Em relação à redução de área, para os três semi-ângulos avaliados, percebe-se que a dureza, em geral, é maior para reduções mais elevadas. Já em relação ao semi-ângulo, percebe-se que, além de nas condições nas quais o valor de α é mais baixo a tendência é um perfil relativamente homogêneo, oposto do que é observado para semi-ângulos mais elevados, os valores de microdureza tendem a aumentar com α .

Os resultados observados nas Tabelas 6 a 11 e na Figura 21 estão de acordo com aqueles relatados em outros trabalhos, conduzidos com outros materiais metálicos e em diferentes condições de operação, em termos da distribuição das propriedades mecânicas nas barras trefiladas (SADOK; LUKSZA; MAJTA, 1994; KAZEMINEZHAD, 2008).

5.3. Distribuição de Microdureza ao Longo da Seção Transversal do Alumínio Trefilado

Os valores de microdureza das barras de alumínio trefiladas são mostrados nas Tabelas 12 a 17 e as curvas microdureza x raio da barra trefilada são apresentadas na Figura 22. Observa-se que, em geral, microdureza obtida para o alumínio é inferior àquela determinada para o cobre, resultado que está de acordo com o comportamento mecânico esperado para ambos materiais metálicos. Similarmente ao que foi verificado para cobre eletrolítico, o emprego do semi-ângulo de 20° na trefilação do alumínio levou à ocorrência de perfis de dureza heterogêneos, fenômeno mais acentuado para a redução de área de 8%. Já a utilização do semi-ângulo de 3° resultou em uma distribuição relativamente homogênea de dureza. Por outro lado, para o alumínio trefilado com $\alpha = 8^\circ$, os perfis de dureza obtidos também foram uniformes, contrastando com os resultados do cobre. Por fim, ainda em relação aos resultados da Figura 22, observa-se que para um mesmo semi-ângulo, o aumento na redução de área implicou na elevação dos valores de dureza.

Figura 21– Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de feira e redução de área: (a) $\alpha = 20^\circ$, $r = 8\%$; (b) $\alpha = 20^\circ$, $r = 15\%$; (c) $\alpha = 8^\circ$, $r = 8\%$; (d) $\alpha = 8^\circ$, $r = 15\%$; (e) $\alpha = 3^\circ$, $r = 8\%$; (f) $\alpha = 3^\circ$, $r = 15\%$.



Fonte: Produzido pela autora

Tabela 12 - Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 20^\circ$, e redução de área $r = 8\%$.

Alumínio Trefilado em um Passe – $\alpha = 20^\circ$, $r = 8\%$											
raio (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
mHV	40,7	41,85	43,0	43,85	44,85	45,1	43,6	45,05	45,2	47,65	49,25

Fonte: Produzida pela autora

Tabela 13 - Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 20^\circ$, e redução de área $r = 15\%$.

Alumínio Trefilado em um Passe – $\alpha = 20^\circ$, $r = 15\%$											
raio(mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
mHV	45,7	46,4	45,8	45,7	45,25	46,8	46,55	47,15	47,4	48,55	49,2

Fonte: Produzida pela autora

Tabela 14 - Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 8^\circ$, e redução de área $r = 8\%$.

Alumínio Trefilado em um Passe – $\alpha = 8^\circ$, $r = 8\%$											
raio (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
mHV	41,4	42,45	42,75	42,15	43,25	41,65	42,7	42,9	42,95	42,5	41,6

Fonte: Produzida pela autora

Tabela 15 - Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 8^\circ$, e redução de área $r = 15\%$.

Alumínio Trefilado em um Passe – $\alpha = 8^\circ$, $r = 15\%$											
raio (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
mHV	45,2	45,05	45,65	45,35	44,6	44,8	45,0	45,2	44,85	45,3	44,95

Fonte: Produzida pela autora

Tabela 16 - Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 3^\circ$, e redução de área $r = 8\%$.

Alumínio Trefilado em um Passe – $\alpha = 3^\circ$, $r = 8\%$											
raio (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
mHV	40,8	41,0	40,85	41,3	41,05	41,2	40,7	41,9	41,35	40,5	40,7

Fonte: Produzida pela autora

Tabela 17 - Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe– semi-ângulo de fieira ($\alpha = 3^\circ$), e redução de área ($r = 15\%$)

Alumínio Trefilado em um Passe – $\alpha = 3^\circ$, $r = 15\%$											
raio (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
mHV	44,2	46,25	45,1	45,85	45,3	45,5	46,0	44,85	45,6	46,55	45,15

Fonte: Produzida pela autora

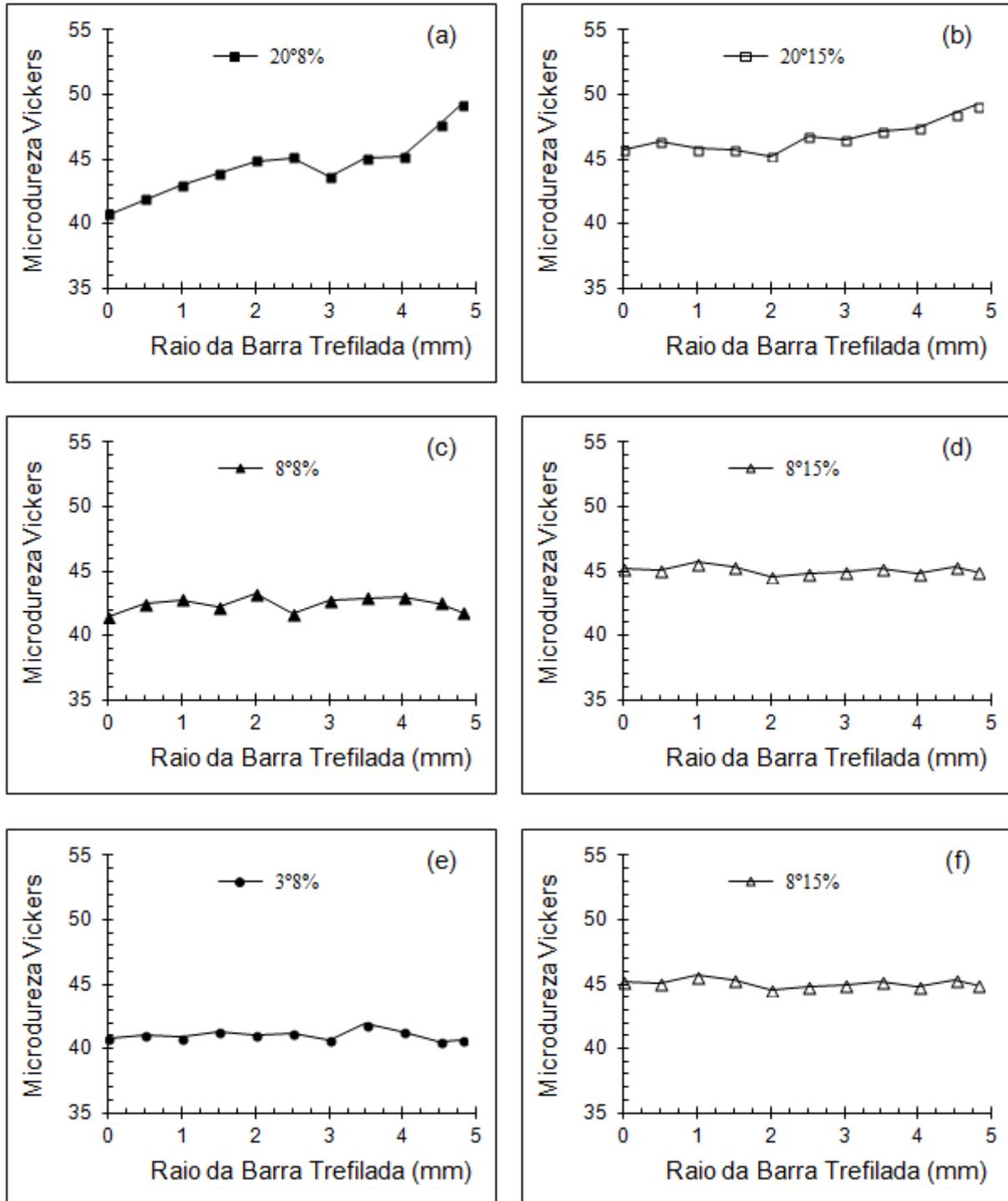
5.4. Distribuição de Deformação ao Longo da Seção Transversal do Cobre Trefilado

Com os dados determinados nos ensaios de microdureza e as expressões deformação x microdureza dos metais recozidos apenas tracionados, foram obtidos os valores de deformação ao longo da seção transversal do cobre trefilado com os diferentes semi-ângulos de fieira (20° , 8° e 3°) e reduções de área (8% e 15%), resultados apresentados nas Tabelas 18 a 23. As distribuições de deformação ao longo da seção transversal das barras de cobre trefiladas, assim como as expressões polinomiais de terceira ordem relativas às mesmas, são exibidas na Figura 23.

Verifica-se que os fenômenos observados nos perfis de microdureza são refletidos nas distribuições de deformação, através das quais também é verificada a influência dos parâmetros geométricos de trefilação, α e r , na deformação no processo. Nas condições nas quais o valor de α é mais baixo, a tendência é a ocorrência de um perfil de deformação relativamente homogêneo, oposto do que é observado para semi-ângulos de trefilação mais elevados. Novamente, para um mesmo semi-ângulo, quando for o caso da distribuição de deformação ser não uniforme, a heterogeneidade é maior para o menor valor de redução de área. Assim como foi mencionado na análise dos perfis de microdureza do cobre, esses resultados se dão em função da presença da deformação cisalhante na operação, que decresce da superfície para o centro da amostra e se torna mais acentuada com a elevação do semi-ângulo de fieira.

Mais uma vez, os resultados estão de acordo com os trabalhos apresentados na literatura, desenvolvidos a partir da mesma técnica experimental de análise da trefilação, porém para outros materiais, ou conduzido por meio de outras técnicas, inclusive para os mesmos materiais metálicos (CETLIN, 1984; SADOK et al., 1994; CORRÊA et al., 2006).

Figura 22– Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de feira e redução de área: (a) $\alpha = 20^\circ$, $r = 8\%$; (b) $\alpha = 20^\circ$, $r = 15\%$; (c) $\alpha = 8^\circ$, $r = 8\%$, (d) $\alpha = 8^\circ$, $r = 15\%$, (e) $\alpha = 3^\circ$, $r = 8\%$, (f) $\alpha = 3^\circ$, $r = 15\%$



Fonte: Produzida pela autora

Tabela 18 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 20^\circ$, e redução de área $r = 8\%$.

Cobre Trefilado em um Passe – $\alpha = 20^\circ$, $r = 8\%$											
raio (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
ε	0,10	0,10	0,10	0,12	0,11	0,13	0,12	0,11	0,14	0,22	0,38

Fonte: Produzido pelo autor

Tabela 19 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 20^\circ$, e redução de área $r = 15\%$.

Cobre Trefilado em um Passe – $\alpha = 20^\circ$, $r = 15\%$											
raio (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
ε	0,17	0,21	0,17	0,22	0,20	0,17	0,20	0,24	0,28	0,35	0,32

Fonte: Produzida pela autora

Tabela 20 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 8^\circ$, e redução de área $r = 8\%$.

Cobre Trefilado em um Passe – $\alpha = 8^\circ$, $r = 8\%$											
raio (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
ε	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,11	0,08	0,14	0,13	0,16

Fonte: Produzida pela autora

Tabela 21 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 8^\circ$, e redução de área $r = 15\%$.

Cobre Trefilado em um Passe – $\alpha = 8^\circ$, $r = 15\%$											
raio (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
ε	0,15	0,16	0,16	0,14	0,13	0,14	0,10	0,15	0,16	0,18	0,20

Fonte: Produzida pela autora

Tabela 22 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 3^\circ$, e redução de área $r = 8\%$.

Cobre Trefilado em um Passe – $\alpha = 3^\circ$, $r = 8\%$											
raio (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
ε	0,08	0,07	0,08	0,09	0,08	0,08	0,09	0,08	0,09	0,09	0,09

Fonte: Produzida pela autora

Tabela 23 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 3^\circ$, e redução de área $r = 15\%$.

Cobre Trefilado em um Passe – $\alpha = 3^\circ$, $r = 15\%$											
raio (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
ϵ	0,16	0,15	0,17	0,16	0,18	0,15	0,17	0,17	0,16	0,17	0,18

Fonte: Produzida pela autora

5.5. Distribuição da Deformação ao Longo da Seção Transversal do Alumínio Trefilado

Nas Tabelas 24 a 29 são exibidos os valores de deformação para cada posição ao longo da seção transversal do alumínio trefilado e na Figura 24 os perfis de deformação correspondentes a esses dados, acompanhados das expressões associadas aos mesmos. O comportamento observado está de acordo com a análise realizada para os perfis de microdureza e é relativamente similar àquele apresentado pelo cobre: o aumento no semi-ângulo de fieira implicou na heterogeneidade de deformação e o aumento na redução de área levou a valores mais elevados de deformação.

Tabela 24 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 20^\circ$, e redução de área $r = 8\%$.

Alumínio Trefilado em um Passe – $\alpha = 20^\circ$, $r = 8\%$											
raio (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
ϵ	0,12	0,14	0,18	0,21	0,24	0,25	0,20	0,25	0,26	0,39	0,50

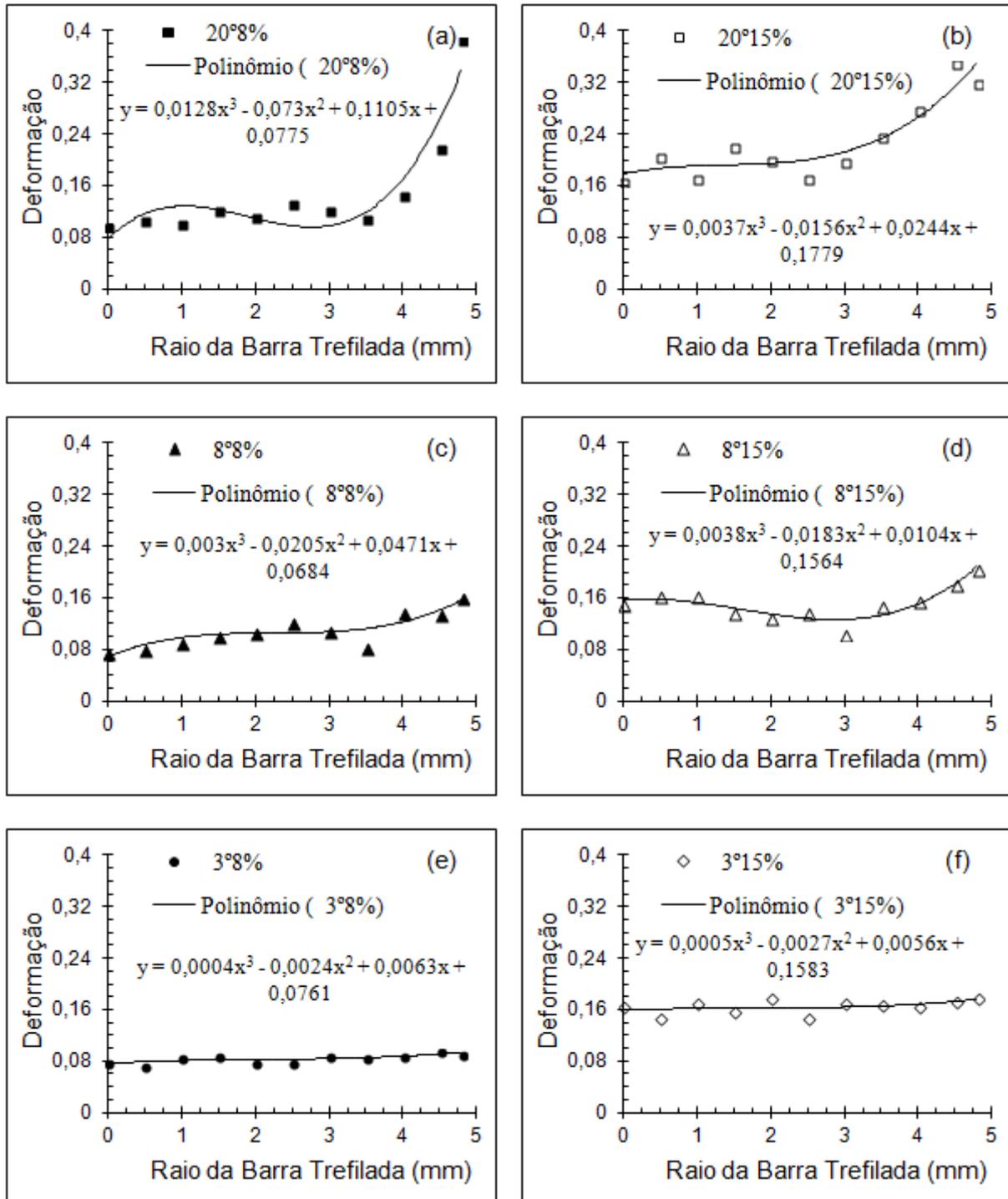
Fonte: Produzida pela autora

Tabela 25 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fieira $\alpha = 20^\circ$, e redução de área $r = 15\%$.

Alumínio Trefilado em um Passe – $\alpha = 20^\circ$, $r = 15\%$											
raio (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
ϵ	0,28	0,32	0,29	0,28	0,26	0,34	0,32	0,36	0,37	0,45	0,49

Fonte: Produzida pela autora

Figura 23- Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do cobre trefilado em um passe – semi-ângulo de feira e redução de área: (a) $\alpha = 20^\circ$, $r = 8\%$; (b) $\alpha = 20^\circ$, $r = 15\%$; (c) $\alpha = 8^\circ$, $r = 8\%$; (d) $\alpha = 8^\circ$, $r = 15\%$; (e) $\alpha = 3^\circ$, $r = 8\%$; (f) $\alpha = 3^\circ$, $r = 15\%$.



Fonte: Produzida pela autora

Tabela 26 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fiação $\alpha = 8^\circ$, e redução de área $r = 8\%$.

Alumínio Trefilado em um Passe – $\alpha = 8^\circ$, $r = 8\%$											
raio (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
ϵ	0,13	0,16	0,17	0,15	0,18	0,14	0,17	0,17	0,18	0,16	0,14

Fonte: Produzida pela autora

Tabela 27 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fiação $\alpha = 8^\circ$, e redução de área $r = 15\%$.

Alumínio Trefilado em um Passe – $\alpha = 8^\circ$, $r = 15\%$											
raio (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
ϵ	0,26	0,25	0,28	0,27	0,23	0,24	0,25	0,26	0,24	0,26	0,25

Fonte: Produzida pela autora

Tabela 28 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fiação $\alpha = 3^\circ$, e redução de área $r = 8\%$.

Alumínio Trefilado em um Passe – $\alpha = 3^\circ$, $r = 8\%$											
raio (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
ϵ	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,13	0,12	0,15	0,13	0,11	0,12

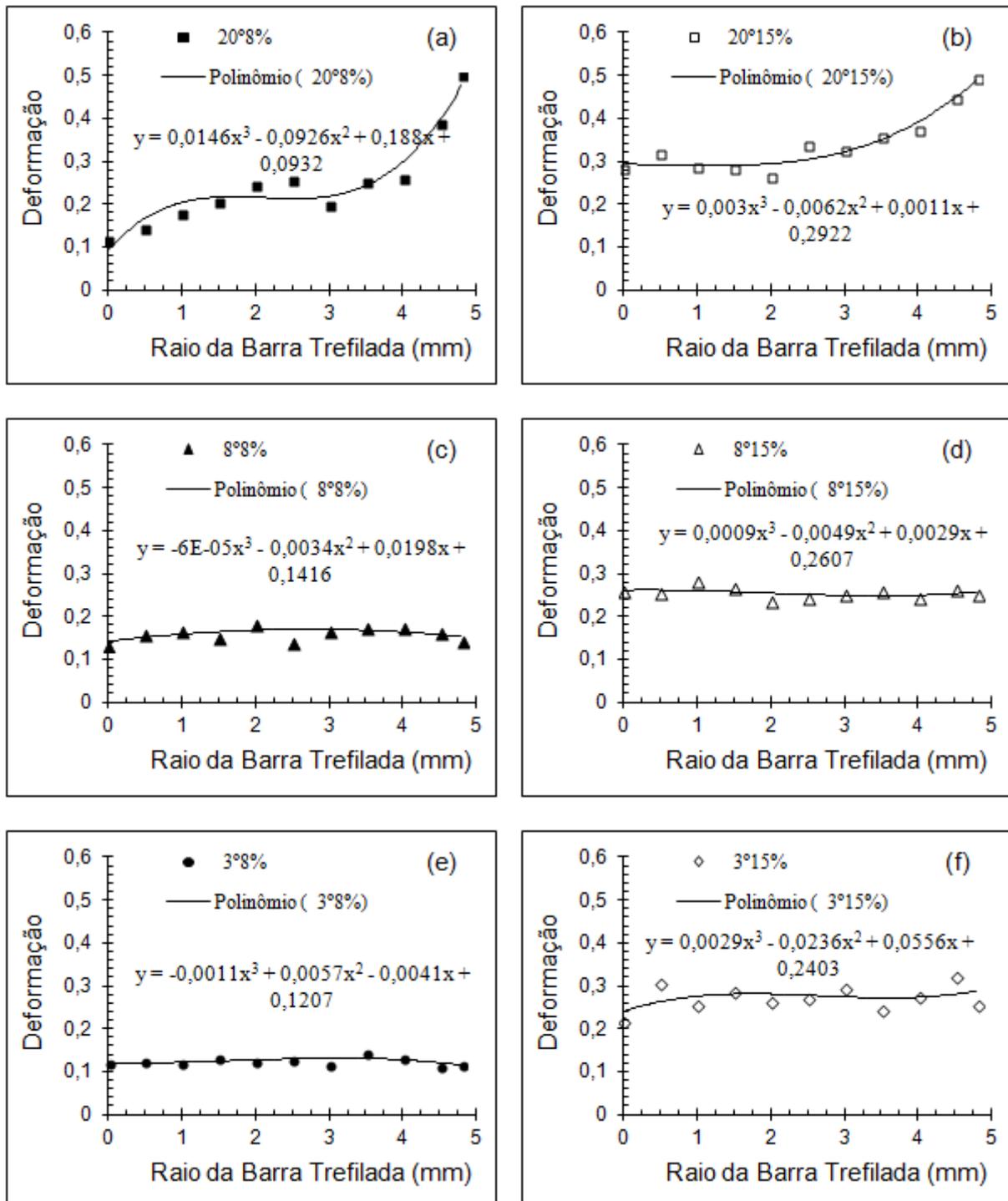
Fonte: Produzida pela autora

Tabela 29 - Distribuição da deformação ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de fiação $\alpha = 3^\circ$, e redução de área $r = 15\%$.

Alumínio Trefilado em um Passe – $\alpha = 3^\circ$, $r = 15\%$											
raio (mm)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	4,8
ϵ	0,22	0,31	0,25	0,29	0,26	0,27	0,30	0,24	0,28	0,32	0,26

Fonte: Produzida pela autora

Figura 24– Distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do alumínio trefilado em um passe – semi-ângulo de feira e redução de área: (a) $\alpha = 20^\circ$, $r = 8\%$; (b) $\alpha = 20^\circ$, $r = 15\%$; (c) $\alpha = 8^\circ$, $r = 8\%$, (d) $\alpha = 8^\circ$, $r = 15\%$, (e) $\alpha = 3^\circ$, $r = 8\%$, (f) $\alpha = 3^\circ$, $r = 15\%$;



Fonte: Produzida pela autora

5.6. Relação Coeficiente de Deformação Redundante e Parâmetro Geométrico Δ

Na Tabela 30 são mostrados os valores de deformação média ε_m , calculados a partir da integração no volume das curvas (equações) distribuições de deformação x raio da barra trefilada e divididos por uma área de seção circular associada ao raio de 5mm. Observa-se que, em geral, para ambos materiais, a elevação tanto no semi-ângulo de fieira como na redução de área levou a maiores valores de deformação média no processo de trefilação. O alumínio exibiu maiores valores de deformação média para todas as condições analisadas no trabalho.

Os coeficientes de deformação redundante ϕ para o cobre e o alumínio, determinados através da Eq. (4), são exibidos nas Tabelas 31 e 32, acompanhados dos valores de parâmetro geométrico Δ , determinados através da Equação (2), e de deformação homogênea da operação, calculados por meio da Equação (3). Verifica-se que, de acordo com os resultados de deformação média na trefilação, o alumínio exibiu coeficientes de deformação redundante mais elevados que o cobre.

Tabela 30 – Deformação média para cada condição de trefilação.

Condições de trefilação	Cobre (ε_m)	Alumínio (ε_m)
$\alpha = 20^\circ$ e $r = 8\%$	0,173	0,292
$\alpha = 20^\circ$ e $r = 15\%$	0,249	0,370
$\alpha = 8^\circ$ e $r = 8\%$	0,119	0,162
$\alpha = 8^\circ$ e $r = 15\%$	0,152	0,254
$\alpha = 3^\circ$ e $r = 8\%$	0,087	0,123
$\alpha = 3^\circ$ e $r = 15\%$	0,168	0,276

Fonte: Produzida pela autora

Tabela 31 - ε_m e ϕ das barras de cobre eletrolítico trefiladas.

Condições de trefilação	ε	Δ	Cobre	
			ε_m	ϕ
$\alpha = 20^\circ$ e $r = 8\%$	0,083	16,75	0,173	2,084
$\alpha = 20^\circ$ e $r = 15\%$	0,163	8,60	0,249	1,528
$\alpha = 8^\circ$ e $r = 8\%$	0,083	6,7	0,119	1,434
$\alpha = 8^\circ$ e $r = 15\%$	0,163	3,44	0,152	0,933
$\alpha = 3^\circ$ e $r = 8\%$	0,083	2,51	0,087	1,048
$\alpha = 3^\circ$ e $r = 15\%$	0,163	1,29	0,168	1,031

Fonte: Produzida pela autora

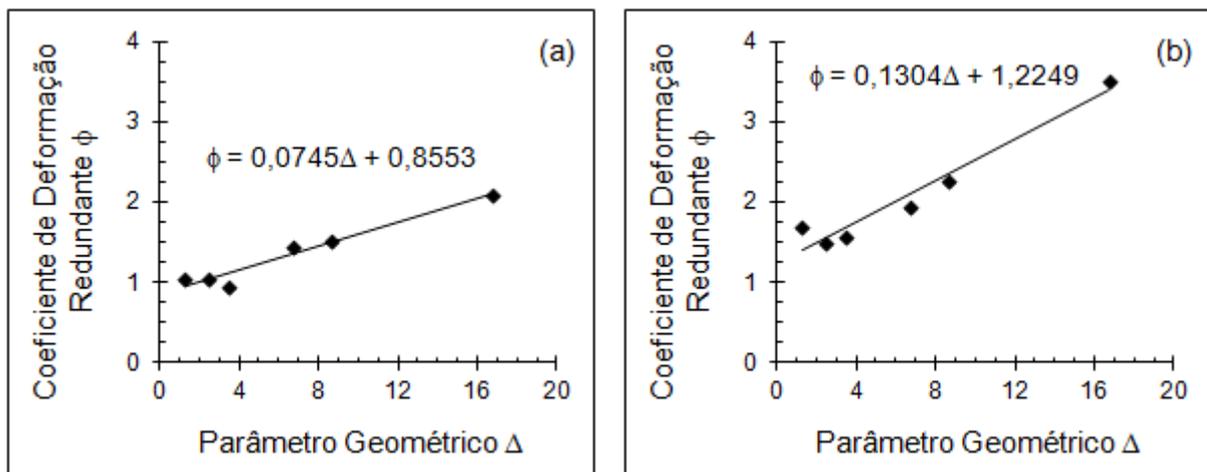
Tabela 32 - ϵ_m e ϕ das barras de alumínio trefiladas.

Condições de trefilação	ϵ	Δ	Alumínio	
			ϵ_m	ϕ
$\alpha = 20^\circ$ e $r = 8\%$	0,083	16,75	0,292	3,518
$\alpha = 20^\circ$ e $r = 15\%$	0,163	8,60	0,370	2,269
$\alpha = 8^\circ$ e $r = 8\%$	0,083	6,7	0,162	1,952
$\alpha = 8^\circ$ e $r = 15\%$	0,163	3,44	0,254	1,558
$\alpha = 3^\circ$ e $r = 8\%$	0,083	2,51	0,123	1,482
$\alpha = 3^\circ$ e $r = 15\%$	0,163	1,29	0,276	1,693

Fonte: Produzida pela autora

Na figura 25 podem ser observados os dados de ϕ associados aos respectivos parâmetros geométricos, bem como expressões determinadas através da regressão linear dos mesmos. Verifica-se que os dois materiais exibiram uma relação monotônica crescente entre o coeficiente de deformação redundante e o parâmetro Δ , similarmente ao que é apresentado em outros trabalhos para metais diversos, utilizando o método dos perfis de microdureza ou a técnica de superposição das curvas tensão-deformação (CETLIN, 1984; CETLIN, 1987, CETLIN; MARCOS, 1987). Neste caso, a diferença observada está associada à sensibilidade do metal a alterações no parâmetro Δ , ou seja, às condições de processamento. Observa-se que o alumínio se mostrou mais afetado por modificações no parâmetro geométrico.

Figura 25– Relação entre o coeficiente de deformação redundante e o parâmetro Δ obtida através do método dos perfis de microdureza: (a) cobre e (b) alumínio.



Fonte: Produzida pela autora

6. CONCLUSÕES

- Os resultados mostraram a influência dos parâmetros de trefilação na distribuição de dureza e na deformação ao longo da seção transversal das barras trefiladas assim como os efeitos das características estruturais dos metais.
- Relações entre a deformação efetiva e a microdureza distintas foram obtidas para os dois metais investigados.
- Ambos os metais avaliados exibiram perfis de microdureza e de deformação heterogêneos para as situações nas quais o semi-ângulo de fieira era mais elevado e relativamente homogêneos para os experimentos nos quais α era mais baixo.
- Em geral, maiores valores de dureza e de deformação foram observados nos metais com a elevação do semi-ângulo de trefilação e da redução de área.
- As distribuições de microdureza e de deformação não dependeram apenas dos parâmetros geométricos da operação de trefilação, mas também das características do material processado uma vez que, apesar de alguma similaridade em termos qualitativos, esses perfis se apresentaram distintos de maneira quantitativa.
- O alumínio exibiu maiores valores de deformação média e, conseqüentemente, de coeficiente de deformação redundante que o cobre, para todas as condições analisadas no trabalho.
- Uma relação linear monotônica e linear entre o coeficiente de deformação redundante e o parâmetro geométrico Δ para cada um dos metais trefilados foi determinada através da técnica dos perfis de microdureza.
- Em termos de coeficiente de deformação redundante, o alumínio se mostrou mais sensível a alterações no parâmetros geométrico Δ que o cobre.

REFERÊNCIAS

- BACKOFEN, W. A. **Deformation processing**. Massachusetts: Addison Wesley Reading, 1972. 326p.
- BRESCIANI FILHO, E.; SILVA, I. B.; BATALHA, G. F.; BUTTON, S. T. **Conformação plástica dos metais**. 6 ed (1 digital). Campinas: EPUSP, 2011. 258p. Disponível em: www.fem.unicamp.br/~sergio1/CONFORMACAOPLASTICADOSMETAIS.pdf. Acesso em: 07 set. 2011.
- CADDELL, R.M., ATKINS, A.G. The Influence of Redundant Work When Drawing Rods Through Conical Dies. **Journal of Engineering for Industry**, p. 411-419, May 1968.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 590p.
- CETLIN, P.R. Redundant deformation factor evaluation through the hardness profile method in round section bar drawing. **Journal of Engineering Materials and Technology**, v. 106, p. 147-151, 1984.
- CETLIN, P. R. Redundant deformation factor evaluation through the stress-strain curves superposition method in round section bar drawing – Experimental results. **Journal of Engineering Materials and Technology**, v. 109, p. 272-275, 1987.
- CETLIN, P. R., MARCOS., J. L. N. Redundant deformation factor evaluation through the stress-Strain curves superposition method in round section bar drawing. **Journal of Engineering Materials and Technology**, v. 109, p. 276-281, 1987.
- DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982. 653p.
- HELMAN, H.; CETLIN, P. R. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2 ed. São Paulo: Artliber, 2005. 264p.
- CORRÊA, E. C. S. **Aspectos do encruamento de metais previamente deformados a frio**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2004. 233p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
- CORRÊA, E. C. S.; SANTOS, C. A.; AGUILAR, M. T. P.; CETLIN, P. R. Avaliação experimental da deformação em barras de cobre e alumínio trefiladas. In: XVII CBECIMAT, Foz do Iguaçu. **Anais...** p. 7194-7205, 2006.
- KAZEMINEZHAD, M. A study on the computation of the redundant deformation factor in wire drawing of austenitic 304 stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 199, n. 1-3, p. 230-233, 2008.
- LIN, H.S., HSU, Y.C., KEH, C.C. Inhomogeneous deformation and residual stress in skin-pass axisymmetric drawing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 201, p. 128-132, 2008.

MAJZOobi, G.H., SANIEE, F.F., AGHILI, A. An investigation into the effect of redundant shear deformation in bar drawing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 201, p. 133-137, 2008.

SADOK, L., LUKSZA, J., MAJTA, J. Inhomogeneity of mechanical properties in stainless steel rods after drawing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 44, p. 129-141, 1994.

SADOK, L., LUKSZA, J., PACKO, M., BURDEK, M. Analysis of the strain state in the stainless steel rods after drawing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 45, p. 305-310, 1994.