

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**BÁRBARA DE SOUZA LARA**

**ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE MICRODUREZA EM BARRAS DE COBRE E DE  
ALUMÍNIO TREFILADAS E TRACIONADAS**

**BELO HORIZONTE**

**2015**

**BÁRBARA DE SOUZA LARA**

**ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE MICRODUREZA EM BARRAS DE COBRE E DE ALUMÍNIO TREFILADAS E TRACIONADAS**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título em Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Coorientador: Prof. Dr. Wellington Lopes

**BELO HORIZONTE**

**2015**

BÁRBARA DE SOUZA LARA

**ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE MICRODUREZA EM BARRAS DE COBRE E DE ALUMÍNIO TREFILADAS E TRACIONADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso 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:

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa - Orientadora

---

Prof. Dr. Wellington Lopes - Coorientador

---

Prof.<sup>a</sup> Ma. Aline Silva Magalhães

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Danielle Marra de Freitas Silva Azevedo

*Dedico este trabalho à meus pais, Eduardo e Beth, e ao Pedro por estarem sempre presentes e serem grande fonte de estímulo.*

## RESUMO

Os processos de fabricação de peças metálicas por conformação mecânica são responsáveis por uma considerável parcela de produtos do mercado atual. Diversos tipos de materiais metálicos podem ser conformados mecanicamente, com destaque para o aço e ligas de Alumínio (Al). A conformação mecânica é um processo em que a modificação das dimensões e forma da peça (normalmente metálica) ocorre devido a aplicação de tensões que causam deformação plástica sem que haja remoção de material. O processo de trefilação é um tipo de processo de conformação mecânica que confere ao material grande precisão dimensional e melhora nas propriedades mecânicas. Sendo assim, tem a finalidade de obter produtos com dimensões controladas e propriedades mecânicas otimizadas. O processo consiste na passagem forçada do material através de uma fieira mediante a aplicação de uma força de tração à saída desta. O presente trabalho tem como objetivo de estudo a análise da distribuição de microdureza ao longo da seção transversal em dois materiais distintos, uma liga de alumínio e o cobre eletrolítico, que foram submetidos ao processo de trefilação em um passe e tracionados posteriormente. Diferentes semi-ângulos de fieira e reduções de área foram empregados. Tal análise teve como base comparativa os mesmos materiais submetidos somente ao processo de trefilação em um passe, com os mesmos parâmetros.

Palavras-chave: Conformação mecânica. Trefilação. Propriedades mecânicas.

## **ABSTRACT**

The manufacturing processes of metal parts for metal forming are responsible for a considerable portion of the current market products. Various types of metallic materials may be formed mechanically, especially for steel and aluminum alloys (Al). The metal forming is a process in which the modification of the size and shape of the part (usually metal) occurs due to the application of stresses that cause plastic deformation without removing material. The drawing process is a kind of mechanical forming process which gives the dimensional precision equipment and improves the mechanical properties. Thus, the purpose is to obtain products with controlled dimensions and optimized mechanical properties. The process consists in the forced passage of the material through a die by applying a traction force to the output thereof. This work has as study objective analysis of the hardness distribution along the cross section in two different materials, an aluminum alloy and electrolytic copper, which underwent the drawing process in a pass and pulled later. Different string of semi-angles and area reductions were employed. Such analysis was comparative basis the same materials submitted only to the drawing process in one pass with the same parameters.

**Keywords:** Mechanical Conformation. Drawing. Mechanical properties.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação da bancada de trefilação.....	13
Figura 2 – Representação da passagem do material pela fieira.....	14
Figura 3 – Matérias-primas utilizadas no processo de trefilação.....	14
Figura 4 – Fieira de trefilação.....	15
Figura 5 – Regiões da fieira.....	16
Figura 6 – Ângulos da fieira.....	17
Figura 7 – Lubrificação na fieira.....	18
Figura 8 – Esforços presentes no processo de trefilação.....	20
Figura 9 – Representação da deformação redundante.....	21
Figura 10 – Representação da técnica de visioplasticidade – rede marcada no material antes e após/durante a operação.....	22
Figura 11 – Utilização da técnica dos perfis de microdureza em barras de alumínio.....	23
Figura 12 – Representação de uma máquina sem deslizamento.....	24
Figura 13 – Representação de uma máquina com deslizamento.....	25
Figura 14 – Fluxograma referente às etapas do trabalho desenvolvido.....	26
Figura 15 – Cortadora metalográfica marca Arotec modelo Arcor 80.....	29
Figura 16 – Embutidora metalográfica marca AROTEC modelo PRE 30 Mi.....	29
Figura 17 – Lixadeira e Politriz AROTEC modelo AROPOL 2V 200.....	29
Figura 18 – Microdurômetro marca Shimadzu modelo HV-27.....	30
Figura 19 – Amostra após embutimento a quente com baquelite.....	31
Figura 20 – Representação das posições nos perfis de microdureza.....	32
Figura 21 – Perfis de microdureza das amostras da liga de alumínio trefiladas em um passe.....	36
Figura 22 – Perfis de microdureza das amostras de cobre eletrolítico trefiladas em um passe.....	41
Figura 23 – Perfis de microdureza das amostras da liga de alumínio trefiladas em um passe com tracionamento subsequente.....	43
Figura 24 – Perfis de microdureza das amostras da liga de alumínio trefiladas em um passe com tracionamento subsequente.....	45
Figura 25 – Perfis de microdureza das amostras da liga de alumínio trefiladas em um passe com tracionamento subsequente.....	47
Figura 26 – Perfis de microdureza das amostras de cobre eletrolítico trefiladas em um passe com tracionamento subsequente.....	50

Figura 27 – Perfis de microdureza das amostras de cobre eletrolítico trefiladas em um passe com tracionamento subsequente.....	52
Figura 28 – Perfis de microdureza das amostras de cobre eletrolítico trefiladas em um passe com tracionamento subsequente.....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química (% em peso) do Cobre eletrolítico e da liga de Alumínio.....	27
Tabela 2 – Parâmetros utilizados para a trefilação em um passe dos materiais.....	27
Tabela 3 - Parâmetros utilizados para a trefilação em um passe dos materiais – Tração subsequente.....	28
Tabela 4 - Microdureza das amostras da liga de alumínio trefiladas com semi-ângulo de 3°.....	33
Tabela 5 - Microdureza das amostras da liga de alumínio trefiladas com semi-ângulo de 8°.....	34
Tabela 6 - Microdureza das amostras da liga de alumínio trefiladas com semi-ângulo de 20°.....	35
Tabela 7 - Microdureza das amostras de cobre eletrolítico trefiladas com semi-ângulo de 3°.....	38
Tabela 8 - Microdureza das amostras de cobre eletrolítico trefiladas com semi-ângulo de 8°.....	39
Tabela 9 - Microdureza das amostras de cobre eletrolítico trefiladas com semi-ângulo de 20°.....	40
Tabela 10 – Microdureza das amostras da liga de alumínio trefiladas em um passe com semi-ângulo de 3°, com tracionamento subsequente.....	42
Tabela 11 – Microdureza das amostras da liga de alumínio trefiladas em um passe com semi-ângulo de 8°, com tracionamento subsequente.....	44
Tabela 12 – Microdureza das amostras da liga de alumínio trefiladas em um passe com semi-ângulo de 20°, com tracionamento subsequente.....	46
Tabela 13 – Microdureza das amostras de cobre eletrolítico trefiladas em um passe com semi-ângulo de 3°, com tracionamento subsequente.....	49
Tabela 14 – Microdureza das amostras de cobre eletrolítico trefiladas em um passe com semi-ângulo de 8°, com tracionamento subsequente.....	51
Tabela 15 – Microdureza das amostras de cobre eletrolítico trefiladas em um passe com semi-ângulo de 20°, com tracionamento subsequente.....	53

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Upsilon$  = Tensão de escoamento do material

$\Upsilon_0$  = Constante

$V_\varepsilon$  = Velocidade de deformação

$m$  = Constante

$\sigma_T$  = Tensão trativa

$\sigma_C$  = Tensão compressiva

$\varepsilon$  = Deformação homogênea

$A_i$  = Área inicial da seção transversal do material

$A_f$  = Área final da seção transversal do material

$r$  = Redução de área por passe no processo de trefilação

$\varepsilon_m$  = Deformação média

$\phi$  = Coeficiente de deformação redundante

$d$  = Diâmetro do material

$\alpha$  = Semi-ângulo da fieira

$\beta$  = Semi-ângulo de entrada

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>1.1 Justificativa e Relevância</b> .....	10
<b>1.2 Objetivo</b> .....	10
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	11
<b>2.1 Processos de conformação</b> .....	11
<i>2.1.1 Classificação dos processos de conformação</i> .....	11
<i>2.1.2 Influência da temperatura em processos de conformação mecânica</i> .....	11
<i>2.1.3 Influência da velocidade de deformação em processos de conformação mecânica</i> .....	13
<b>2.2 Processo de trefilação</b> .....	13
<i>2.2.1 Aspectos gerais do processo</i> .....	13
<i>2.2.1.1 Características geométricas da operação de trefilação – Fieira de trefilação</i> .....	15
<i>2.2.1.2 Lubrificação</i> .....	17
<i>2.2.2 Deformação plástica no processo de trefilação</i> .....	19
<i>2.2.2.1 Análise da deformação na trefilação por meio de métodos experimentais</i> .....	22
<i>2.2.3 Máquinas de trefilação</i> .....	24
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	26
<b>3.1 Descrição Geral do Trabalho Desenvolvido</b> .....	26
<b>3.2 Materiais</b> .....	26
<b>3.3 Equipamentos Utilizados</b> .....	28
<b>3.4 Procedimento experimental</b> .....	30
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	33
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	56
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	57

# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 Justificativa e Relevância**

Sabe-se que o Brasil é um país que contém uma das maiores reservas minerais do mundo. A transformação desta matéria-prima em um produto acabado, com valor agregado, passa pelos processos de fabricação por conformação. Sendo assim, tais processos são estrategicamente importantes para o país. São através deles que se obtêm produtos empregados nas mais diversas áreas. Além disso, determinadas propriedades mecânicas requeridas ao produto final somente podem ser obtidas através do emprego de um processo de conformação específico.

Devido ao atual desenvolvimento tecnológico, novos equipamentos foram confeccionados e possibilitaram a fabricação de peças com altas velocidades implicando em redução nos custos de produção.

O processo de trefilação é um processo de conformação plástica que confere ao produto acabado propriedades mecânicas importantes para determinadas aplicações e, conseqüentemente, possui relevância no cenário industrial brasileiro. O trabalho foi desenvolvido para uma compreensão geral do processo e das variáveis que afetam a dureza do produto acabado.

## **1.2 Objetivo**

O presente trabalho tem como objetivo de estudo analisar a distribuição de microdureza ao longo da seção transversal em dois materiais distintos, uma liga de alumínio e o cobre eletrolítico, que foram submetidos ao processo de trefilação em um passe e tracionados posteriormente. Diferentes semi-ângulos de fieira e reduções de área foram empregados. Tal análise teve como base comparativa os mesmos materiais submetidos somente ao processo de trefilação em um passe, com os mesmos parâmetros.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Processos de conformação**

#### ***2.1.1 Classificação dos processos de conformação***

Os processos de conformação dos materiais metálicos podem ser definidos como operações que visam a alteração da forma de um corpo para uma outra forma específica. Segundo Bresciani et al. (2011), essas operações podem ser divididas em dois grupos distintos, de acordo com a seguinte classificação:

- 1) Processos mecânicos: compreendem os processos em que a modificação da forma se dá pela aplicação de uma força externa sem a liquefação do metal utilizado. Tais processos são constituídos pelos processos de conformação mecânica (nesse caso os esforços aplicados geram níveis de tensões geralmente inferiores ao limite de resistência do material) e pelos processos de conformação por usinagem (os esforços aplicados geram níveis de tensões sempre superiores ao limite de resistência do material, ou seja, a forma do produto final se deve à retirada de material do mesmo - geração de cavaco).
- 2) Processos metalúrgicos: compreendem os processos em que a modificação da forma do produto pode estar relacionada a aplicação de forças externas, mas com a liquefação do metal ou difusão de partículas metálicas.

Considerando os processos de conformação mecânica dos materiais metálicos, tema do presente trabalho, essas operações permitem a obtenção de produtos com determinadas características controladas, tais como: dimensão e forma, aspectos superficiais e propriedades mecânicas. Além disso, são processos de grande velocidade, relativamente baixos custos de produção e que conferem qualidade ao produto final (BRESCIANI et al., 2011). Esses processos podem ser definidos como operações nas quais um esforço externo é aplicado levando a uma alteração permanente na geometria e dimensões, ou seja, à deformação plástica do material, sendo caracterizados em geral pela conservação de volume e massa no metal (DIETER, 1982).

#### ***2.1.2 Influência da temperatura em processos de conformação mecânica***

A temperatura para conformação dos metais e suas ligas varia desde a temperatura ambiente até temperaturas próximas ao início de sua fusão. Devido ao fato destas serem muito

variadas para os diferentes materiais, é comum tomar a temperatura de processamento de um dado metal em relação à sua temperatura de início de fusão (CETLIN; HELMAN, 2005).

Nesse contexto, tendo em vista a temperatura de trabalho, os processos de conformação mecânica podem ser classificados em processos com trabalho mecânico a frio ou processos com trabalho mecânico a quente. Quando a temperatura de trabalho é maior do que a temperatura de recristalização do metal, o processo é classificado como trabalho à quente. Caso a temperatura de trabalho esteja abaixo da temperatura de recristalização do metal, o mesmo é designado como trabalho à frio (BRESCIANI et al., 2011). Ressalta-se que a recristalização pode ser definida como a formação de novos grãos em detrimento à microestrutura anterior, envolvendo os processos de nucleação e crescimento (REED-HILL, 1982). Outras bibliografias dividem os processos de conformação mecânica diretamente de acordo com a temperatura de fusão. Nesse caso, tem-se que: 1) trabalho a frio, quando a deformação é conduzida em uma temperatura inferior a 0,3 vezes a temperatura de fusão; 2) trabalho a morno, para temperaturas entre 0,3 e 0,6 vezes a temperatura de fusão e 3) trabalho a quente, para operações realizadas com temperaturas 0,6 vezes a temperatura de fusão da liga metálica (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

De acordo com Bresciani et al. (2011), no trabalho mecânico à frio tem-se o efeito do encruamento. Esse fenômeno pode ser definido como a elevação contínua da tensão cisalhante com a ocorrência da deformação plástica, devido à redução na capacidade de movimentação das discordâncias através da rede cristalina, que interagem entre si e com outras barreiras durante sua movimentação (DIETER, 1982). O encruamento, além de uma consequência usual do processamento, é também apontado como um dos mais importantes métodos para endurecer os materiais metálicos (MEYERS; CHAWLA, 1982). A capacidade de um metal sofrer deformação com trabalho mecânico à frio é limitada pela ocorrência de fratura. Logo, quando se deseja obter grandes deformações com trabalho mecânico à frio, utilizam-se ciclos de deformação e tratamentos térmicos envolvendo recristalização, nos quais o material endurecido pela deformação é aquecido, ocorrendo amaciamento do mesmo (CETLIN; HELMAN, 2005).

Por fim, considerando o produto final obtido, é de grande relevância a análise do histórico termomecânico do processamento. A estrutura do material metálicos, em seus diversos níveis, pode ser controlada através de modificações deste histórico (CETLIN; HELMAN, 2005).

### 2.1.3 Influência da velocidade de deformação em processos de conformação mecânica

Ao se deformar um corpo metálico, grande parte da energia cedida ao mesmo é transformada em calor. Quanto maior a velocidade de deformação do processo, menor será a dissipação desse calor e, assim, maior será a temperatura do produto final (CETLIN; HELMAN, 2005).

Segundo Cetlin; Helman (2005), a velocidade de deformação influi na tensão necessária para deformar o metal. Tal Influência é expressa pela Equação 1.

$$\Upsilon = \Upsilon_0 (V\varepsilon)^m \quad (1)$$

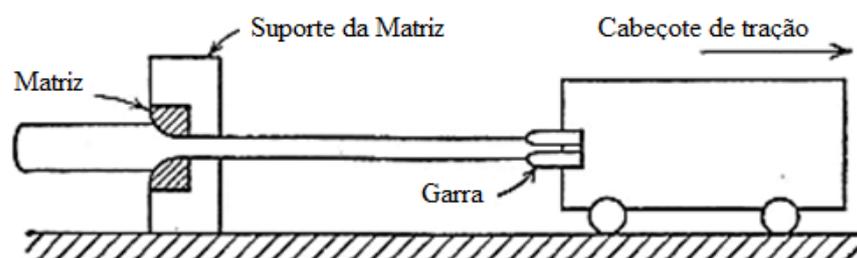
Onde:  $\Upsilon$  é a tensão de escoamento do material,  $\Upsilon_0$  é uma constante,  $V\varepsilon$  é a velocidade de deformação e  $m$  é uma constante

## 2.2 Processo de trefilação

### 2.2.1 Aspectos gerais do processo

A trefilação é um processo de conformação plástica que consiste na passagem de um fio, barra ou tubo através de uma ferramenta que contém um furo em seu centro, por onde passa o material, denominada feira. Esse furo possui um diâmetro decrescente e apresenta forma de funil cônico ou curvo (BRESCIANI et al., 2011). A passagem do material através da feira ocorre a partir da aplicação de uma força trativa à saída dessa matriz (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013). Na Figura 1 é mostrada uma representação esquemática da operação de trefilação como um todo e na Figura 2 é apresentada uma representação esquemática (vista em corte) do material metálico passando através da feira (DIETER, 1982; BRESCIANI et al., 2005).

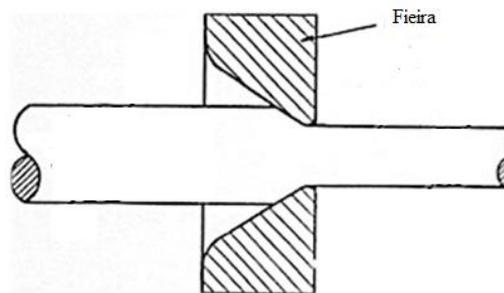
Figura 1 – Representação da bancada de trefilação.



Fonte: DIETER, 1982.

Segundo Bresciani et al. (2011), a passagem do material a ser trefilado pela fieira causa uma redução em sua seção transversal e alterações nas suas propriedades mecânicas devido ao fenômeno de encruamento. O processo de trefilação comumente é um trabalho de deformação mecânica realizado a frio, que tem como objetivo promover grandes reduções de seção, garantir propriedades mecânicas específicas e controladas, precisão dimensional e bom acabamento superficial do produto (CETLIN; HELMAN, 2005). A operação pode ocorrer em um ou diversos passes, até que as dimensões desejadas sejam atingidas.

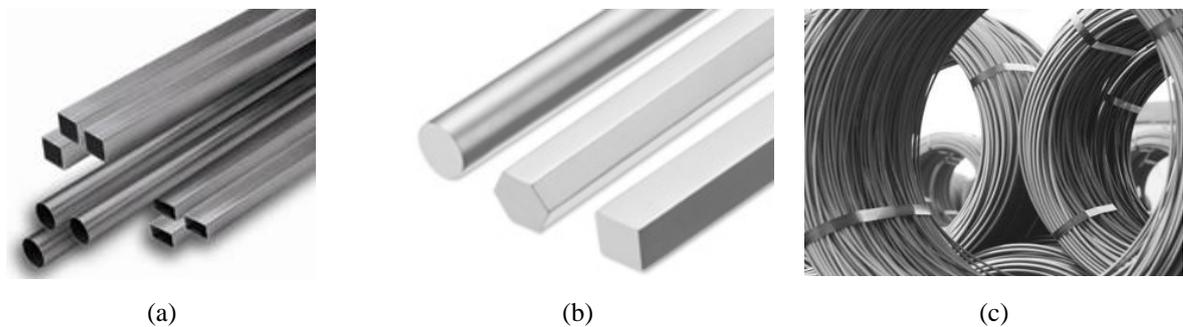
**Figura 2 – Representação da passagem do material pela fieira.**



Fonte: BRESCIANI et al., 2011.

A matéria-prima para tal processo é um material na forma de arame (fio-máquina), barra ou tubo. Estes são obtidos geralmente pelo processo de extrusão caso os metais sejam não ferrosos ou pelo processo de laminação, se estes forem ferrosos ou não ferrosos. (BRESCIANI et al., 2011). Na Figura 3 são mostrados imagens de matérias-primas do processo de trefilação.

**Figura 3 – Matérias-primas utilizadas no processo de trefilação.**



(a)Tubo, (b) barra e (c) fio-máquina.

Fonte: [https://www.belgo.com.br/produtos/planos\\_derivados/tubos\\_industriais/tubos\\_industriais.asp](https://www.belgo.com.br/produtos/planos_derivados/tubos_industriais/tubos_industriais.asp);  
[https://www.gerdau.com/br/pt/produtos/industria](https://www.gerdau.com/br/pt/produtos/industria;); <https://www.gerdau.com/br/pt/produtos/fio-maquina-sextavado#ad-image-0>

O processo de trefilação como um todo pode ser dividido em algumas etapas: escolha do material a ser trefilado (fio-máquina, barra ou tubo), decapagem, lavagem, recobrimento e secagem (quando for o caso), trefilação e tratamento térmico. Uma vez escolhido o material, muitas vezes é necessário que este passe por um processo de decapagem a fim de retirar a camada de óxido superficial proveniente do processo de laminação (carepa) e do prolongado tempo de estocagem. A decapagem pode ser realizada por meio químico ou mecânico, tornando a trefilação mais eficiente e econômica. Feita a decapagem, o material é lavado em água corrente. Em seguida, pode ser iniciado o processo de recobrimento (quando for o caso), cuja finalidade é neutralizar resíduos de ácido, proteger a superfície do material e servir de suporte para a lubrificação durante a trefilação. A secagem ocorre em estufa com objetivo de remover o hidrogênio absorvido na superfície do material durante o processo de decapagem. Concluídas as etapas de preparação da superfície do material, é iniciado o processo de conformação mecânica propriamente dita, que pode ser feita de rolo para barra, bobina para bobina ou de barra para barra.

#### 2.2.1.1 Características geométricas da operação de trefilação - Fieira de trefilação

A matriz utilizada no processo de trefilação, denominada fieira, é composta por uma carcaça de aço e, internamente, por um núcleo de material com elevada dureza, que geralmente é de metal duro ou diamante sintético. As fieiras com núcleo de metal duro são utilizadas usualmente em fios de diâmetro superior a 2 mm, fios grossos, barras redondas ou tubos. Já as de diamante sintético são utilizadas para fios de diâmetro menor ou igual a 2 mm, fios finos, capilares ou para produtos com perfis pequenos de elevada qualidade (BRESCIANI et al., 2011). Na Figura 4 são mostradas imagens de fieiras e uma representação em corte, evidenciando a carcaça ou estojo de aço e o núcleo.

**Figura 4 – Fieira de trefilação.**



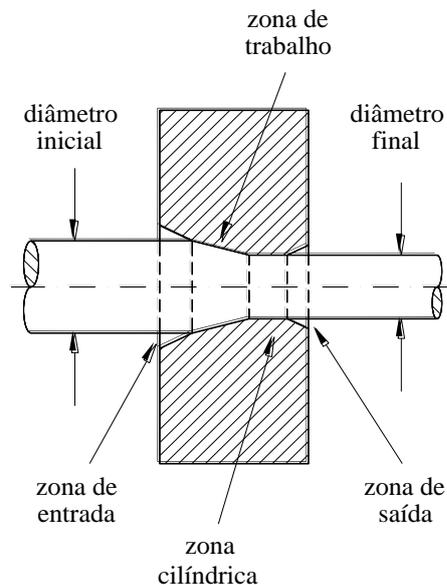
(a) Fieiras diversas e (b) parte interna fieira.

Fonte: (a) <http://www.uniwidia.com.br/retificado.html> (b) GUIMARÃES, 2010.

Dos materiais utilizados para a confecção de fieiras são exigidas algumas características, tais como: conferir longa vida à ferramenta de maneira que não sejam necessárias paradas na produção para manutenção da mesma, permitir a obtenção de produtos com superfície lisa e brilhante, permitir a trefilação de uma grande quantidade de material à elevadas taxas de produção sem perder a qualidade do produto final e permitir elevadas reduções de seção transversal (BRESCIANI, et al., 2011).

Segundo Corrêa (2004) a fieira contém em seu interior quatro regiões distintas, conforme mostrado na Figura 5 para o processo de trefilação de barras: zonas de entrada, de trabalho, cilíndrica e de saída. Na Figura 5 podem ser observadas também as representações dos diâmetros inicial e final do material metálicos. Na Figura 6 é mostrada novamente a fieira de trefilação com os demais aspectos geométricos relevantes do processo: os semi-ângulos de entrada, de trefilação e de saída (CORRÊA, 2004).

**Figura 5 – Regiões da fieira**

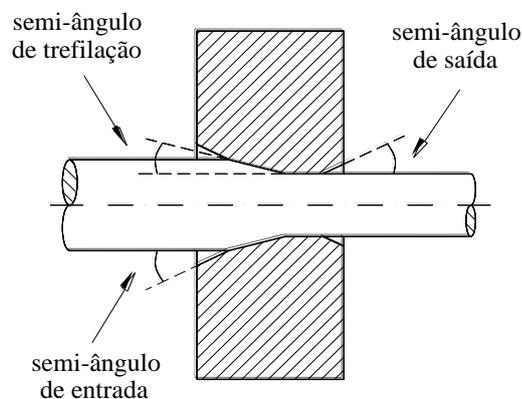


Fonte: CORRÊA, 2004

As quatro regiões ou zonas da fieira de trefilação tem funções específicas (BRESCIANI, et al., 2011). A zona de entrada ou cone de entrada é a região de entrada do material compreendida pelo ângulo de entrada, cuja principal função é auxiliar a entrada de lubrificante para reduzir o atrito entre a superfície do material e o cone de trabalho. A zona de trabalho ou cone de trabalho é a região em que ocorre a redução da seção transversal do

material. O ângulo  $2\alpha$  ( $\alpha$  é o chamado semi-ângulo de trefilação) do cone de trabalho é o principal responsável pela quantidade de lubrificante que passa pela fieira. Caso este ângulo diminua, ocorre o aumento do atrito e, conseqüentemente, um aumento de tensão no processo de trefilação. Quando o ângulo aumenta, atingindo um valor ideal, o atrito e a tensão alcançam menores valores. Caso o ângulo aumente excessivamente, pode ocorrer uma considerável deformação na superfície do material e pouca deformação em sua região central. Esse parâmetro é considerado uma das variáveis mais importantes da operação de trefilação (DIETER, 1982). Nessa região, o atrito deve ser minimizado para reduzir o desgaste da fieira. A zona cilíndrica ou região de calibração tem como função proporcionar um bom acabamento na superfície do material, sendo a região responsável pela manutenção da geometria e das dimensões do produto trefilado. Por fim, a zona de saída ou cone de saída é a região de saída da fieira onde ocorre uma pequena recuperação elástica do material. O cone de saída deve proporcionar uma saída livre do produto trefilado sem causar danos na superfície do mesmo e da fieira.

**Figura 6 – Ângulos da fieira**



Fonte: CORRÊA, 2004

### 2.2.1.2 Lubrificação

Na conformação plástica dos metais, o atrito está presente em todos os processos, sendo normalmente considerado nocivo. Pode-se considerar alguns aspectos importantes diretamente ligados ao atrito em tais processos como: aumento do desgaste das ferramentas e matrizes, influência sobre a qualidade superficial do produto, alteração dos estados de tensão necessários para a ocorrência da deformação, elevação da temperatura do material a níveis capazes de comprometer suas características mecânicas, aparecimento de tensões residuais no

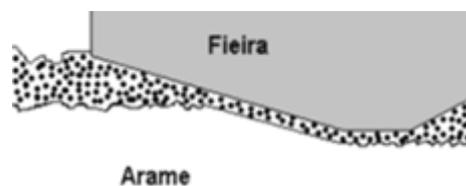
produto e aumento do consumo de energia necessária para a realização da operação (CETLIN; HELMAN, 2005).

Considerando especificamente a trefilação, o atrito é um fator de grande relevância no processo, visto que sua elevação pode causar um maior desgaste da fieira, provocar defeitos superficiais no produto final, aumentar a temperatura de trabalho e exigir uma maior tensão no processo. No caso dessa última, o aumento da tensão de trefilação a níveis muito elevados pode levar à ocorrência de tração do material durante o processo de trefilação.

O calor gerado pelo atrito será controlado pela ação dos agentes lubrificantes que possuem, dentre outras funções, uma ação refrigerante. Uma das principais funções da lubrificação é criar uma película contínua entre as superfícies de contato de maneira a reduzir o atrito entre as mesmas. Como consequência, pode ser conseguido um bom acabamento superficial, redução no desgaste da fieira e diminuição na tensão de trefilação (BRESCIANI et al., 2011).

Como definição, pode-se afirmar que lubrificante é qualquer substância, fluida ou sólida, colocada entre duas superfícies a fim de reduzir o desgaste e a fricção entre essas. O objetivo do lubrificante é impedir o contato direto entre o material e a fieira, diminuindo o atrito. Na Figura 7 é mostrada uma representação da lubrificação entre as paredes da região interna da fieira de trefilação e da barra ou arame durante o processo (BRUSIUS JÚNIOR, 2009).

**Figura 7 – Lubrificação na fieira**



Fonte: BRUSIUS JÚNIOR, 2009.

Segundo Brusius Junior (2009), a escolha correta de um lubrificante é de grande dificuldade em qualquer processo de conformação mecânica. Para que tal escolha seja eficiente, é necessária a análise de alguns parâmetros, tais como: tipo de material a ser trefilado, a ferramenta, a temperatura e a velocidade de conformação. Nesse contexto, os lubrificantes utilizados durante o processo de trefilação são classificados em lubrificantes

sólidos e lubrificantes líquidos. Os lubrificantes sólidos são à base de sabões, talco, mica, cal, grafite, dissulfeto de molibdênio e tungstênio, entre outros. Já os lubrificantes líquidos possuem origens diversas (animal e vegetal). São utilizados para trefilar arames finos e recobertos com camadas de cobre, zinco, bronze, dentre outros, a altas velocidades. São utilizados, normalmente, em processos que demandam pouco resíduo de lubrificante na superfície (BRUSIUS JÚNIOR, 2009).

Segundo Brusius Junior (2009), existem três tipos de lubrificação: 1) lubrificação limite, caracterizada por baixas velocidades, em que a quantidade de lubrificante inserido na região de cone de trabalho da fiação é mínima; 2) lubrificação mista, caracterizada por velocidades relativamente altas, em que uma maior quantidade de lubrificante é inserida na região de cone de trabalho da fiação, preenchendo assim os vales do material e 3) lubrificação hidrodinâmica, caracterizada pela formação de uma camada contínua entre as superfícies, ocasionando assim, uma completa separação entre elas. A diminuição do coeficiente de atrito é explicado pelo aumento da separação entre as superfícies. Já o aumento do coeficiente de atrito, após atingir o regime hidrodinâmico, é explicado pela quantidade de lubrificação entre as superfícies.

### ***2.2.2 Deformação plástica no processo de trefilação***

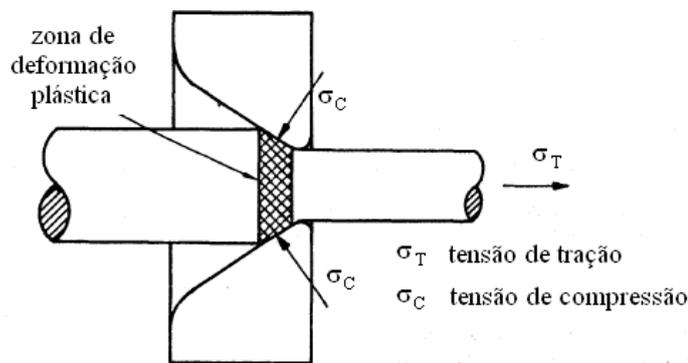
A deformação plástica na trefilação ocorre em função da presença de esforços trativos, que movimentam o material na direção axial, e esforços compressivos, realizados pela parede da matriz sobre o material, causando deformação na direção radial. Considera-se que a maior parte do escoamento é causada por esforços de compressão resultantes da reação do metal com a matriz (DIETER, 1982). Na Figura 8 é apresentada a representação dos esforços, por meio das tensões trativas ( $\sigma_T$ ) e compressivas ( $\sigma_C$ ) (BRESNICANI et al., 2011).

O estudo da deformação no processo de trefilação possui grande relevância, uma vez que a mesma afeta a própria operação, por meio de modificações nas tensões envolvidas e nas propriedades do material trefilado. Pode-se dizer que a deformação na trefilação é composta por deformação homogênea e deformação redundante, que em conjunto constituem a deformação média na operação.

A deformação homogênea está associada somente às alterações dimensionais do material no processo de trefilação, considerando as modificações observadas nas áreas inicial

e final da seção transversal. Tal deformação não considera quaisquer fatores externos do processo, não abrangendo o efeito do atrito, do semi-ângulo de trefilação  $\alpha$  e nem mesmo a forma como esse material sofre a deformação no interior da matriz de trefilação. A mesma pode ser calculada de acordo com as Equações 2 e 3 (CORRÊA, 2004). Apresenta-se ainda a Equação 4, referente à chamada redução de área  $r$  na operação, parâmetro muito comum empregado.

**Figura 8 – Esforços presentes no processo de trefilação**



Fonte: BRESCIANI, 2011

$$\varepsilon = \ln \left[ \frac{A_i}{A_f} \right] \quad (2)$$

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

$$r = \frac{A_i - A_f}{A_i} \quad (4)$$

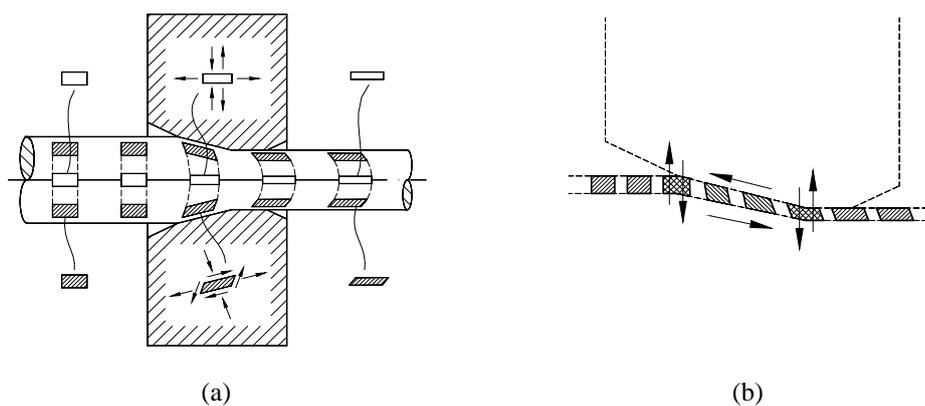
Onde:  $\varepsilon$  é a deformação homogênea ou externa na trefilação,  $A_i$  é a área inicial da seção transversal do material,  $A_f$  é a área final da seção transversal do material e  $r$  é a redução de área por passe no processo.

Considerando a outra parcela da deformação, como ilustrado na Figura 9, o material sofre internamente deformações cisalhantes, à entrada e à saída da fieira, decrescentes da superfície para o centro, que não contribuem para as mudanças dimensionais da barra trefilada (CORRÊA, 2004; CETLIN; HELMAN, 2005). Tal deformação denomina-se deformação

redundante. Como consequência da ocorrência dessa deformação, em termos de deformação efetiva, podem ser observados na trefilação o desenvolvimento de perfis de deformação heterogêneos ao longo da seção transversal do material, de acordo com as variáveis da operação, especialmente a combinação semi-ângulo de fiação de trefilação e redução de área. A relação entre a deformação redundante e o semi-ângulo da matriz é estabelecida de maneira que, em geral, para uma mesma redução de área, quanto maior for o semi-ângulo mais elevada será a magnitude da deformação redundante.

Para 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 apenas tracionadas. Em adição a esse fenômeno, em virtude da distribuição não uniforme de deformação ao longo da seção transversal do trefilado, pode ser verificada também uma distribuição heterogênea das propriedades mecânicas (SADOK; LUKSZA; MAJTA, 1994; SADOK et al., 1994).

**Figura 9 – Representação da deformação redundante**



(a) Representação geral da deformação e (b) detalhe das camadas superficiais.

Fonte: CORRÊA, 2004

A deformação média na trefilação representa a união da deformação redundante, originada devido ao processo de cisalhamento interno no material, e a deformação homogênea, relativa à alteração dimensional da barra, em média na seção transversal do material. As deformações externa e média na operação se relacionam através do coeficiente de deformação redundante, apresentado na Equação 5 (KAZEMINEZHAD, 2008).

$$\varepsilon_m = \phi \varepsilon \quad (5)$$

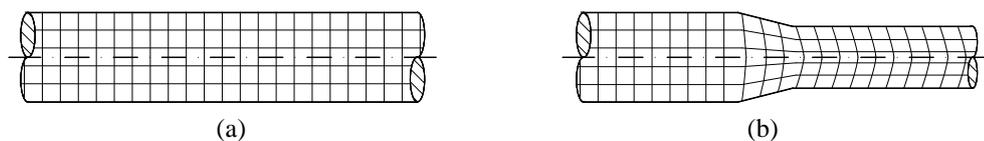
Onde:  $\varepsilon_m$  é a deformação média,  $\phi$  é o coeficiente de deformação redundante e  $\varepsilon$  é a deformação homogênea ou externa na trefilação,

### 2.2.2.1 Análise da deformação na trefilação por meio de métodos experimentais

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

A visioplasticidade associa o trabalho experimental com o estudo analítico dos mecanismos de deformação plástica. É uma técnica que consiste na obtenção de campos de vetores de velocidade do metal, depois ocorre a determinação das distribuições de taxa de deformação e, por fim, de deformação efetiva no material (CORRÊA, 2004). É considerado o método que melhor descreve o comportamento do material. A técnica é iniciada com a marcação de uma rede na região de interesse do material, de acordo com o escoamento do mesmo, que é fotografada após cada incremento de deformação, o que possibilita observar a mudança nas posições das intercessões da rede feita. Na trefilação, operação que se caracteriza por um estado de escoamento estacionário, apenas uma imagem é suficiente para fornecer as informações necessárias para a determinação do campo de velocidades. A partir dos campos de velocidades, os componentes de taxa de deformação axial, radial, de cisalhamento e angular são calculados e, por fim, a deformação efetiva. Na Figura 10 é mostrada uma representação da rede marcada na seção longitudinal do material metálico antes e após a trefilação (CORRÊA, 2004).

**Figura 10 - Representação da técnica de visioplasticidade – rede marcada no material antes e após/durante a operação.**



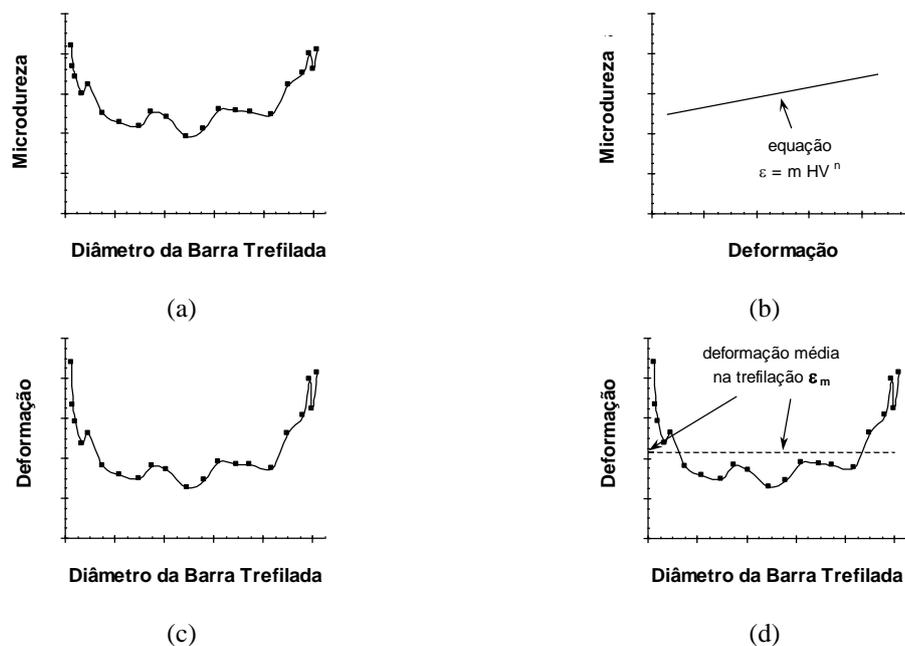
(a) Rede marcada antes da trefilação e (b) após a trefilação.

Fonte: CORRÊA, 2004

Com o método de superposição das curvas de tensão-deformação, se tem a obtenção da deformação média no processo de trefilação (CORRÊA, 2004). Tal técnica foi desenvolvida a partir da análise teórica da tensão de trefilação, possibilitando a determinação da deformação média pela comparação (superposição) das curvas obtidas em testes de tração de amostras recozida e trefilada na condição de interesse (CETLIN, 1987). Por meio dessa técnica, diferentemente da visioelasticidade, o valor da deformação média na operação é obtido de maneira relativamente direta, sem a avaliação prévia da distribuição de deformação ao longo da seção transversal da barra.

O método dos perfis de microdureza consiste na obtenção da distribuição da deformação ao longo da seção transversal da barra a partir da distribuição de microdureza e de uma relação entre essa propriedade e a deformação efetiva, previamente determinada empregando amostras apenas tracionadas (CETLIN, 1984). 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 11 pode ser observada uma representação esquemática da técnica dos perfis de microdureza, desde a obtenção da distribuição da propriedade até o cálculo da deformação média (CETLIN, 1984).

**Figura 11 - Utilização da técnica dos perfis de microdureza em barras de alumínio**



(a) distribuição de microdureza ao longo da seção transversal do trefilado, (b) equação dureza x deformação obtida através de amostras apenas tracionadas, (c) distribuição de deformação e (d) determinação da deformação média.

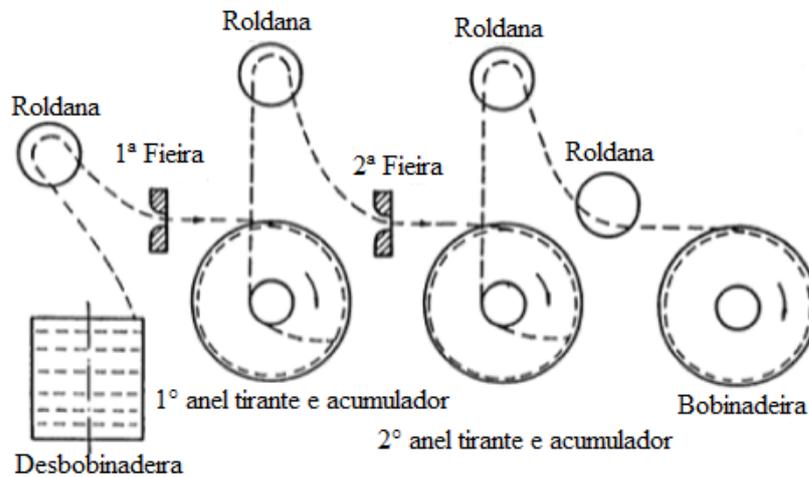
Fonte: CETLIN, 1984 (adaptado).

### 2.2.3 Máquinas de trefilação

As máquinas de trefilar podem ser classificadas segundo três critérios: quanto ao modo com que exercem o esforço de trefilação, quanto ao sistema de lubrificação adotado; e quanto ao diâmetro dos fios trefilados.

De acordo com Kiminami; Castro; Oliveira (2013), a classificação quanto ao modo com que as máquinas exercem o esforço de trefilação é dada da seguinte forma: máquinas com deslizamento ou máquinas sem deslizamento. As máquinas de trefilar sem deslizamento possuem um sistema de tração do fio, constituído de um anel tirante que primeiramente acumula o material trefilado para posteriormente permitir o seu movimento em direção a próxima fieira. O processo prossegue de modo similar para as fieiras seguintes. Em função do aumento do comprimento do fio posterior a passagem pelas fieiras, as velocidades dos anéis tirantes são diferentes e de valores crescentes. Na Figura 12 é mostrada a representação desse processo (BRESCIANI et al., 2011).

Figura 12 – Representação de uma máquina sem deslizamento

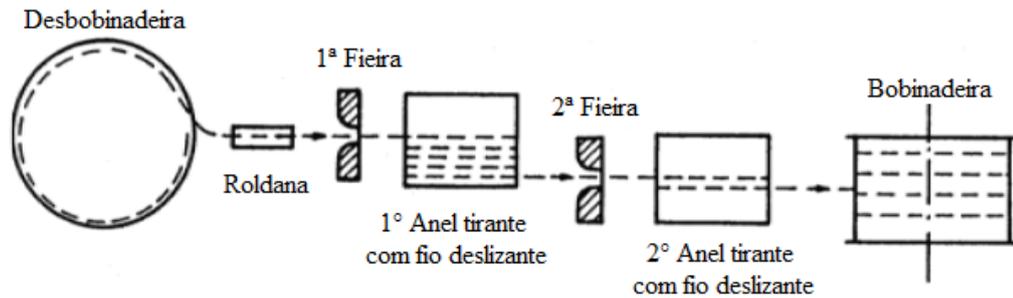


Fonte: BRESCIANI et al., 2011.

As máquinas de trefilar com deslizamento, em geral empregadas para a trefilação de materiais de diâmetros reduzidos, tem o seguinte princípio de funcionamento: o fio parte de uma desbobinadeira, passa por uma roldana e segue alinhado em direção a primeira fieira (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013). Na saída desta, o fio é tracionado por um anel tirante que acondiciona o material trefilado em forma de hélice de maneira que no início da hélice o fio fique alinhado com a primeira fieira e no fim alinhado com a segunda fieira. O

processo segue desta maneira para as demais fieiras e anéis tirantes. Na Figura 13 pode ser observada uma imagem deste tipo de máquina (BRESCIANI, et al., 2011).

**Figura 13 – Representação de uma máquina com deslizamento**



Fonte: BRESCIANI, 2011.

As máquinas utilizadas no processo de trefilação também podem ser classificadas de acordo com o sistema de lubrificação adotado. Nessa classificação, podem ser divididas em máquinas com sistema de imersão, em que a fieira e os anéis tirantes permanecem imersos em um líquido refrigerante e lubrificante e em máquinas com sistema de aspersão, em que a fieira recebe um jato de líquido refrigerante e lubrificante (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

As máquinas com classificação segundo o diâmetro do produto trefilado podem ser: 1) para barras redondas (com diâmetro superior a 5 mm), equipamento grandes que permitem significativas reduções de seção transversal; 2) para fios grossos (com diâmetro entre 2 mm - 5 mm); 3) para fios médios (com diâmetro entre 0,50 mm - 2 mm), sendo essas sempre do tipo com deslizamento; 4) para fios finos (com diâmetro entre 0,15mm - 0,50 mm), sempre do tipo com deslizamento e 5) para fios capilares (com diâmetro inferior a 0,15 mm), cujo sistema de lubrificação permite que o lubrificante toque levemente o fio para atender as condições de pequena redução e pequeno atrito entre fio e fieira. (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013; BRESCIANI, et al., 2011).

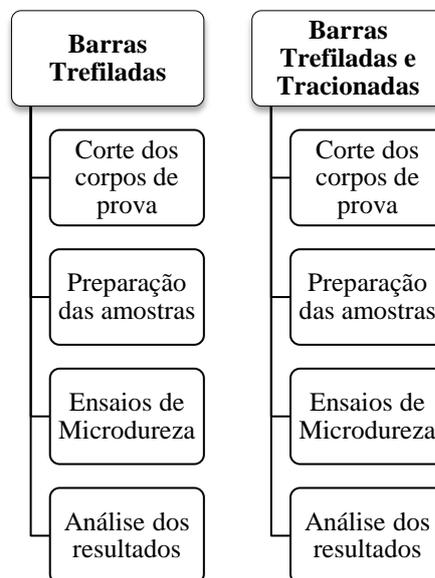
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Descrição Geral do Trabalho Desenvolvido

Amostras de barras de uma liga de alumínio e de cobre eletrolítico previamente trefiladas em um passe com diferentes parâmetros geométricos de operação foram preparadas para serem submetidas ao ensaio de microdureza. Tal ensaio foi conduzido ao longo da seção transversal das mesmas de modo a se obter a distribuição de microdureza nos materiais referente à operação de conformação mecânica. Paralelamente, amostras de barras de uma liga de alumínio e de cobre eletrolítico, previamente trefiladas em um passe com tracionamento subsequente, em diferentes magnitudes, foram preparadas de modo similar ao mencionado anteriormente para serem submetidas ao ensaio de microdureza e assim se obter a distribuição de microdureza ao longo da seção transversal das mesmas.

Na Figura 14 pode ser observado um fluxograma, como síntese do procedimento experimental realizado, para melhor compreensão das etapas associadas ao trabalho desenvolvido.

Figura 14 – Fluxograma referente às etapas do trabalho desenvolvido



Fonte: Própria autora

#### 3.2 Materiais

Os materiais analisados no trabalho foram o cobre eletrolítico e uma liga de alumínio, cujas composições químicas (% em peso) são mostradas na Tabela 1.

**Tabela 1 - Composição química (% em peso) do Cobre eletrolítico e da liga de Alumínio.**

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

Fonte: CORRÊA, 2004 (adaptado).

Os materiais utilizados no trabalho foram provenientes de um trabalho desenvolvido anteriormente (CORRÊA, 2004). Uma parte consistiu em amostras de barras trefiladas em um passe conforme os parâmetros apresentados na Tabela 2. A outra parte consistiu em amostras de barras de provenientes da trefilação em um passe, conforme parâmetros apresentados na Tabela 3, que foram submetidas a um tracionamento subsequente em diferentes magnitudes de deformação real. Ressalta-se que para as amostras apenas trefiladas, não foi considerada a condição com redução de área de 3% devido à ausência das barras.

**Tabela 2 – Parâmetros utilizados para a trefilação em um passe dos materiais**

<b>MATERIAL</b>	<b>DIÂMETRO INICIAL DA BARRA (<math>d_i</math>)</b>	<b>SEMI-ÂNGULO DE TREFILAÇÃO (<math>\alpha</math>)</b>	<b>REDUÇÃO DE ÁREA (r)</b>	
Corpo de prova de Alumínio (Al)	10,85 mm	3°	8%	Amostra 1
			15%	Amostra 2
8°		8%	Amostra 3	
		15%	Amostra 4	
20°		8%	Amostra 5	
		15%	Amostra 6	
Corpo de prova de Cobre (Cu)	10,43 mm	3°	8%	Amostra 7
			15%	Amostra 8
8°		8%	Amostra 9	
		15%	Amostra 10	
20°		8%	Amostra 11	
		15%	Amostra 12	

Fonte: Própria autora

**Tabela 3 - Parâmetros utilizados para a trefilação em um passe dos materiais – Tração subsequente**

MATERIAL	DIÂMETRO INICIAL DA BARRA ( $d_i$ )	SEMI-ÂNGULO DE TREFILAÇÃO ( $\alpha$ )	REDUÇÃO DE ÁREA (r)			
Corpo de prova de Alumínio (Al)	10,85 mm	3°	3%	Amostra 13		
			8%	Amostra 14		
			15%	Amostra 15		
Corpo de prova de Alumínio (Al)		10,85 mm	8°	3%	Amostra 16	
				8%	Amostra 17	
				15%	Amostra 18	
Corpo de prova de Alumínio (Al)			10,85 mm	20°	3%	Amostra 19
					8%	Amostra 20
					15%	Amostra 21
Corpo de prova de Cobre (Cu)	10,43 mm			3°	3%	Amostra 22
					8%	Amostra 23
					15%	Amostra 24
Corpo de prova de Cobre (Cu)		10,43 mm		8°	3%	Amostra 25
					8%	Amostra 26
					15%	Amostra 27
Corpo de prova de Cobre (Cu)			10,43 mm	20°	3%	Amostra 28
					8%	Amostra 29
					15%	Amostra 30

Fonte: Própria autora

### 3.3 Equipamentos Utilizados

O trabalho envolveu basicamente três etapas: corte das amostras trefiladas e trefiladas e tracionadas, preparação metalográfica e ensaios de microdureza. Para a etapa de corte das amostras, foi empregada uma cortadora metalográfica da marca Arotec modelo Arocor 80, conforme mostrado na Figura 15. Para a fase de preparação das amostras, que envolveu embutimento, lixamento e polimento, foram utilizadas a prensa de embutimento a quente marca AROTEC modelo PRE 30Mi e as lixadeiras e politrizes AROTEC modelo AROPOL 2V 200 (Figura 16 e 17, respectivamente).

**Figura 15 - Cortadora metalográfica marca Arotec modelo Arocor 80**



Fonte: Própria autora

**Figura 16 - Embutidora metalográfica marca AROTEC modelo PRE 30Mi**



Fonte: Própria autora

**Figura 17 - Lixadeira e poltriz AROTEC modelo AROPOL 2V 200**



(a)



(b)

(a) Lixadeira e (b) poltriz.

Fonte: Própria autora

Para os ensaios de microdureza foi utilizado um microdurômetro da marca Shimadzu modelo HV-2T, mostrado na Figura 18. A carga utilizada nos ensaios foi de 300 gF com tempo de endentação de 15s.

**Figura 18 – Microdurômetro marca Shimadzu modelo HV-2T**



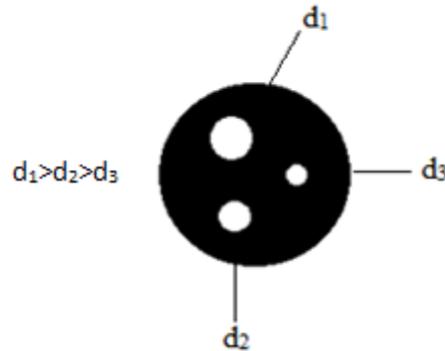
Fonte: Própria autora

### **3.4 Procedimento Experimental**

Considerando inicialmente os materiais apenas trefilados em um passe, amostras provenientes das barras foram cortadas e preparadas metalograficamente, envolvendo embutimento a quente com baquelite, lixamento com lixas d'água com diferentes granulometrias (#120, #240, #320, #400, #600) e polimento com pasta de diamante com as granulometrias de 9 $\mu$ m, 3 $\mu$ m e 1 $\mu$ m. Concluída a preparação superficial, todas as amostras foram submetidas ao ensaio de microdureza (seção transversal).

Considerando os materiais trefilados e tracionados, amostras foram cortadas tomando regiões com diferentes diâmetros após a tração, ou seja, que foram submetidas a distintas magnitudes de deformação no ensaio uniaxial. Nesse caso, foram consideradas amostras com três diâmetros diferentes. As mesmas foram agrupadas, três a três, de acordo com os parâmetros de trefilação previamente empregados, por meio do embutimento a quente (Figura 19). Posteriormente, as amostras obtidas foram preparadas metalograficamente, realizando o procedimento similar ao anteriormente descrito. Novamente concluída a preparação superficial, todas as amostras foram submetidas ao ensaio de microdureza (seção transversal).

**Figura 19 – Amostra após embutimento a quente com baquelite**



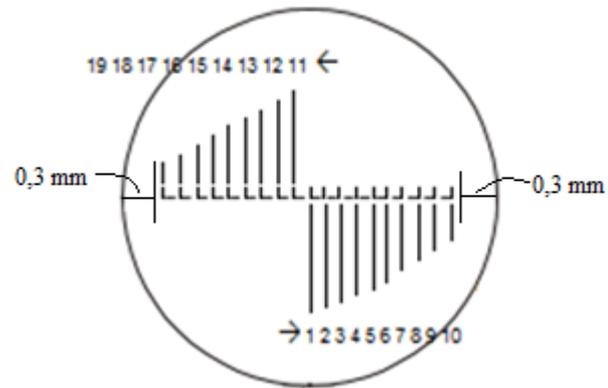
Fonte: Própria autora

Os ensaios de microdureza, tanto para as amostras trefiladas como para as amostras tracionadas, foram realizados na seção transversal das peças. Optou-se por realizar um ensaio na região central das peças e nove ensaios para cada um dos lados, igualmente espaçados, de forma a totalizar 19 medidas de dureza para cada condição. Na Figura 20 é mostrada uma representação da distribuição dos testes realizados. Ressalta-se que um distanciamento de 0,3 mm da superfície foi considerado, de forma a não "mascarar" os resultados, e que a distância de ao menos três impressões foi verificada para decidir o número de ensaios ao longo da seção transversal das peças.

Para as análises gráficas, as microdurezas relativas às posições de 2 à 10 correspondem a uma média aritmética das microdurezas medidas em posições opostas nos perfis (2,11; 3,12; 4,13; 5,14; 6,15; 7,16; 8,17; 9,18; 10,19). A posição 01 corresponde a microdureza medida no centro.

Ressalta-se que, independentemente das dimensões do material (diâmetro de 10 mm para os materiais apenas trefilados e diâmetros variados para os materiais trefilados e tracionados), os ensaios de dureza foram realizados em posições semelhantes em relação à região central das amostras. Nesse caso, foram conduzidos cálculos a partir do diâmetro específico de cada peça. Esse diâmetro foi determinado antes de iniciar os ensaios de microdureza em cada amostra, no próprio equipamento de ensaio. Por fim, ressalta-se que esse dado também foi empregado para o cálculo da deformação apenas associada ao processo de trefilação e associada também à tração.

**Figura 20 – Representação das posições nos perfis de microdureza**



Fonte: Própria autora

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 4 a 6 são apresentados os resultados de microdureza obtidos ao longo da seção transversal das barras da liga de alumínio trefiladas em um passe com semi-ângulos de feira de 3°, 8° e 20°, respectivamente. Na Figura 21 são mostradas os perfis de microdureza agrupados de acordo com o semi-ângulo utilizado. Nos gráficos são mostrados, além do semi-ângulo e da redução de área, o valor de deformação homogênea correspondente a cada situação ( $\epsilon = 0,0833$  para  $r = 8\%$  e  $\epsilon = 0,1625$  para  $r = 15\%$ ).

**Tabela 4 - Microdureza das amostras da liga de alumínio trefiladas com semi-ângulo de 3°**

POSICÃO	MATERIAL: Liga de alumínio	
	$\alpha = 3^\circ$	
	$r = 8\% / \epsilon = 0,0833$	$r = 15\% / \epsilon = 0,1625$
	Amostra 01 (Hv)	Amostra 02 (Hv)
1	40,2	44,2
2	41,3	46,3
3	40,5	45,1
4	41,3	45,7
5	41,5	45,8
6	41,6	45,3
7	40,6	46,2
8	41,7	44,8
9	41,9	45,8
10	40,5	46,5
11	40,3	46,5
12	41,5	45,6
13	40,6	45,1
14	41,5	45,3
15	41,9	45,9
16	41,8	45,6
17	41,3	46,2
18	41,5	44,6
19	40,2	45,9

Fonte: Própria autora

Tabela 5 - Microdureza das amostras da liga de alumínio trefiladas com semi-ângulo de 8°

POSIÇÃO	MATERIAL: Liga de alumínio	
	$\alpha = 8^\circ$	
	r= 8% / $\epsilon= 0,0833$	r= 15% / $\epsilon= 0,1625$
	Amostra 03 (Hv)	Amostra 04 (Hv)
1	41,3	45,2
2	42,5	45,1
3	43,1	45,6
4	42,7	45,3
5	43,6	44,5
6	41,6	44,8
7	42,2	45,3
8	43,1	45,2
9	42,9	44,1
10	42,5	45,2
11	42,1	45,2
12	43,2	45,5
13	43,1	45,1
14	42,5	45,4
15	43,6	44,6
16	41,8	44,2
17	42,5	45,1
18	43,1	45,9
19	42,5	45,6

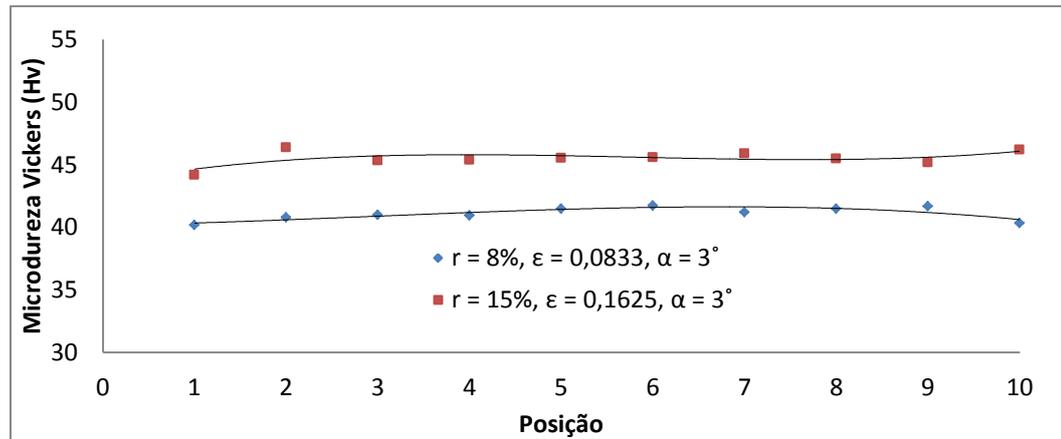
Fonte: Própria autora

Tabela 6 - Microdureza das amostras da liga de alumínio trefiladas com semi-ângulo de 20°

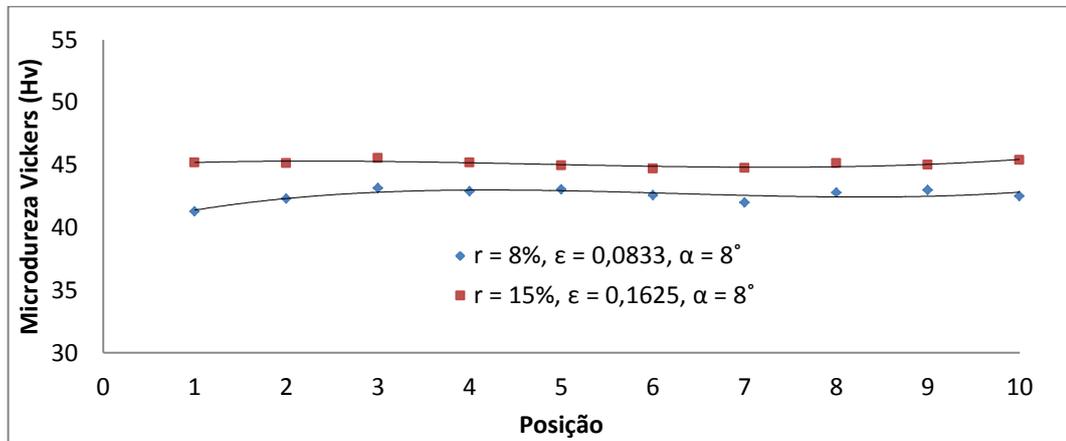
POSIÇÃO	MATERIAL: Liga de alumínio	
	$\alpha = 20^\circ$	
	r= 8% / $\epsilon= 0,0833$	r= 15% / $\epsilon= 0,1625$
	Amostra 05 (Hv)	Amostra 06 (Hv)
1	40,8	45,6
2	42,1	47,1
3	43,4	45,3
4	43,8	45,7
5	45,1	45,8
6	44,8	46,1
7	43,6	49,3
8	45,1	47,5
9	45,3	47,3
10	47,7	48,3
11	41,2	46,3
12	42,3	45,2
13	43,1	45,6
14	44,2	47,1
15	45,7	46,3
16	43,5	49,1
17	44,1	48,0
18	46,1	47,0
19	47,2	49,2

Fonte: Própria autora

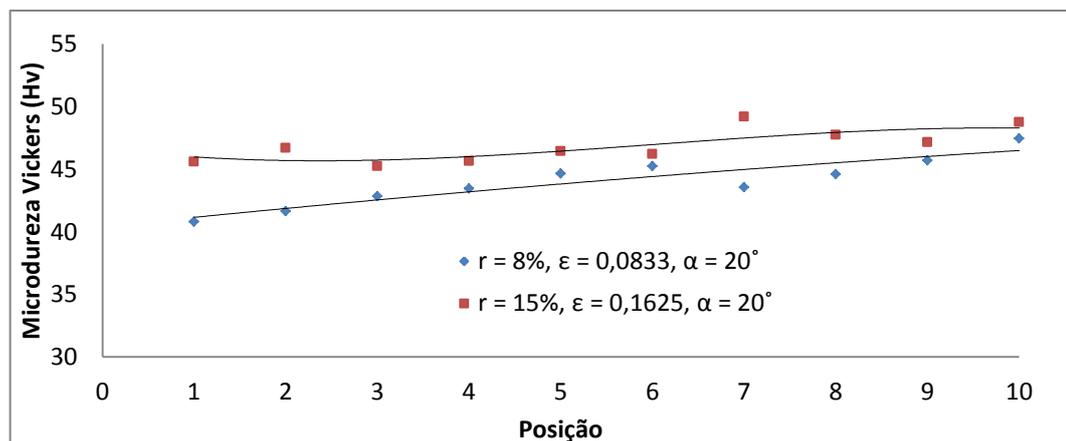
Figura 21 - Perfis de microdureza das amostras da liga de alumínio trefilada em um passe



(a)



(b)



(c)

Semiângulos  $\alpha$  de (a)  $3^\circ$ , (b)  $8^\circ$  e (c)  $20^\circ$

Fonte: Própria autora

Considerando inicialmente os efeitos da redução de área na trefilação ou da deformação homogênea aplicada, observa-se que maiores valores de deformação homogênea levaram a resultados de microdureza superiores, independentemente da posição ao longo da seção transversal das amostras e do semi-ângulo. Esses resultados estão de acordo com o que era esperado, uma vez que quanto maior a deformação realizada em um material metálico, a princípio, mais acentuado será o fenômeno de encruamento, o que irá refletir na distribuição das propriedades mecânicas. Em relação à influência de  $\alpha$ , observa-se que empregando o semiângulo de  $3^\circ$  a distribuição de microdureza é relativamente homogênea. O mesmo ocorre empregando o semiângulo de  $8^\circ$ . No entanto, para  $\alpha = 20^\circ$  pode ser verificada a ocorrência de perfis de microdureza mais heterogêneos. Em termos de valores gerais de dureza, ao passar de  $\alpha = 3^\circ$  para  $\alpha = 8^\circ$  não foram verificadas alterações significativas de dureza. No entanto, ao passar para  $\alpha = 20^\circ$ , verifica-se elevação nos valores de dureza, evidenciando a influência da deformação redundante não somente na região próxima à superfície do material trefilado mas em quase toda a sua seção transversal, ainda que mais discretamente.

Nas Tabelas 7 a 9 são mostrados os resultados de microdureza obtidos ao longo da seção transversal das barras de cobre eletrolítico trefiladas em um passe com semi-ângulo de feira de  $3^\circ$ ,  $8^\circ$  e  $20^\circ$ , respectivamente. Na Figura 22 são apresentadas as distribuições de dureza agrupadas de acordo com o semi-ângulo utilizado. Novamente, nos gráficos são mostrados, além do semi-ângulo e da redução de área, o valor de deformação homogênea correspondente a cada situação ( $\epsilon = 0,0833$  para  $r = 8\%$  e  $\epsilon = 0,1625$  para  $r = 15\%$ ).

Similarmente ao que foi verificado para a liga de alumínio, a elevação na redução de área levou a um maior encruamento do cobre eletrolítico e, conseqüentemente, a maiores valores de dureza. Considerando o efeito do semi-ângulo de trefilação, percebe-se claramente que com a sua elevação, a distribuição da propriedade mecânica passa de praticamente uniforme,  $\alpha = 3^\circ$ , para não uniforme, tanto para  $\alpha = 8^\circ$  como para  $\alpha = 20^\circ$ , especialmente para o último valor. Ou seja, os valores de dureza próximos à superfície das amostras trefiladas nessas condições são nitidamente superiores àqueles observados nas regiões próximas ao centro das peças. Tal fato está associado ao processo de cisalhamento/distorção ao qual o material é submetido, estando de acordo com o comportamento esperado para o material (CETLIN; HELMAN, 2005; CETLIN, 1984; CORRÊA, 2004).

Comparando o comportamento dos dois materiais, percebe-se que o cobre eletrolítico parece ser mais sensível à ocorrência da deformação redundante, visto que é verificada

distribuição de dureza heterogênea tanto para o semi-ângulo de 8° como para 20°, enquanto para a liga de alumínio esse fenômeno só é claro para o maior valor de  $\alpha$ . Observa-se ainda que os valores de microdureza obtidos para a liga de alumínio são inferiores aos encontrados para o cobre, resultado que está de acordo com o comportamento mecânico esperado para ambos os materiais metálicos.

**Tabela 7 - Microdureza das amostras de cobre eletrolítico trefiladas com semi-ângulo de 3°**

POSIÇÃO	MATERIAL: Cobre eletrolítico	
	$\alpha = 3^\circ$	
	r= 8% / $\varepsilon= 0,0833$	r= 15% / $\varepsilon= 0,1625$
	Amostra 07 (Hv)	Amostra 08 (Hv)
1	85,1	96,4
2	83,5	95,1
3	86,4	97,4
4	87,1	95,3
5	85,1	98,5
6	84,8	95,1
7	86,7	96,5
8	86,3	96,7
9	87,4	97,3
10	89,1	98,1
11	85,2	97,1
12	84,1	96,3
13	85,0	98,5
14	87,3	98,1
15	87,5	96,5
16	85,6	96,3
17	87,1	96,4
18	88,1	97,3
19	90,2	99,1

Fonte: Própria autora

Tabela 8 - Microdureza das amostras de cobre eletrolítico trefiladas com semi-ângulo de 8°

MATERIAL: Cobre eletrolítico		
POSICÃO	$\alpha = 8^\circ$	
	r= 8% / $\epsilon= 0,0833$	r= 15% / $\epsilon= 0,1625$
	Amostra 09 (Hv)	Amostra 10 (Hv)
1	85,7	94,8
2	86,4	95,6
3	87,5	96,1
4	88,9	94,7
5	89,7	92,5
6	92,4	94,8
7	89,5	89,1
8	84,6	95,5
9	94,1	95,7
10	96,4	98,4
11	86,0	96,5
12	86,3	96,1
13	87,1	95,7
14	89,4	93,4
15	89,2	95,4
16	93,5	89,1
17	85,7	96,4
18	95,1	96,5
19	97,4	99,1

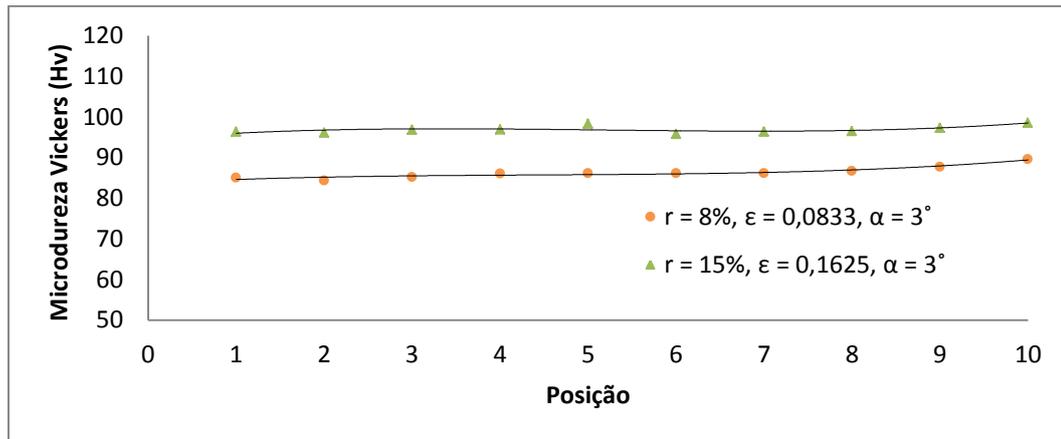
Fonte: Própria autora

Tabela 9 - Microdureza das amostras de cobre eletrolítico trefiladas com semi-ângulo de 20°

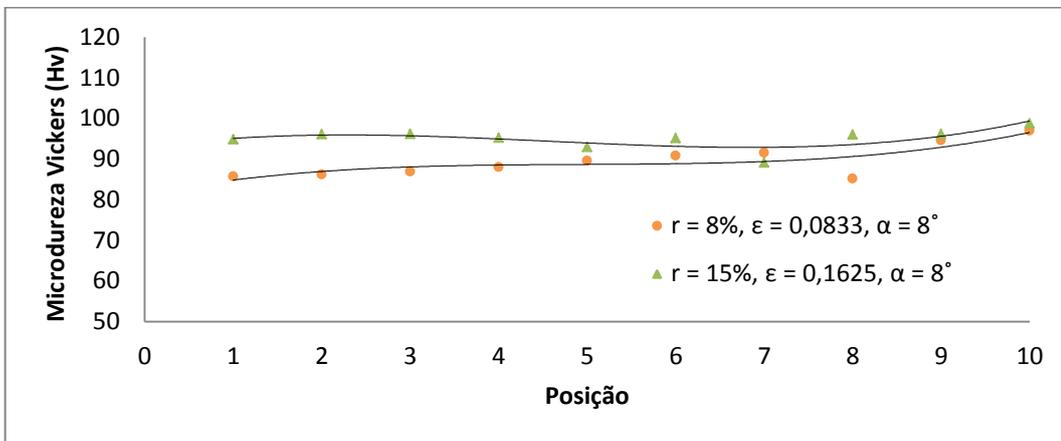
POSIÇÃO	MATERIAL: Cobre eletrolítico	
	$\alpha = 20^\circ$	
	r= 8% / $\varepsilon= 0,0833$	r= 15% / $\varepsilon= 0,1625$
	Amostra 11 (Hv)	Amostra 12 (Hv)
1	88,3	96,7
2	89,5	100,4
3	88,7	97,6
4	91,8	102,5
5	90,0	99,5
6	93,1	98,2
7	92,2	100,5
8	90,1	102,8
9	95,1	105,5
10	101,2	110,7
11	90,5	101,4
12	90,4	97,5
13	92,2	101,2
14	90,3	100,3
15	94,7	99,5
16	92,0	101
17	92,3	103,4
18	96,4	106,7
19	102,3	110,9

Fonte: Própria autora

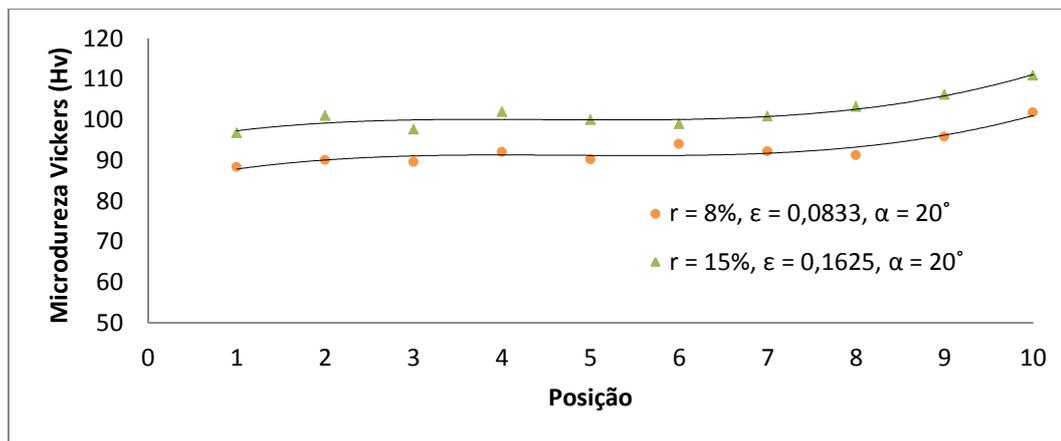
Figura 22 – Perfis de microdureza das amostras de cobre eletrolítico trefiladas em um passe



(a)



(b)



(c)

Semiângulos  $\alpha$  de (a)  $3^\circ$ , (b)  $8^\circ$  e (c)  $20^\circ$

Fonte: Própria autora

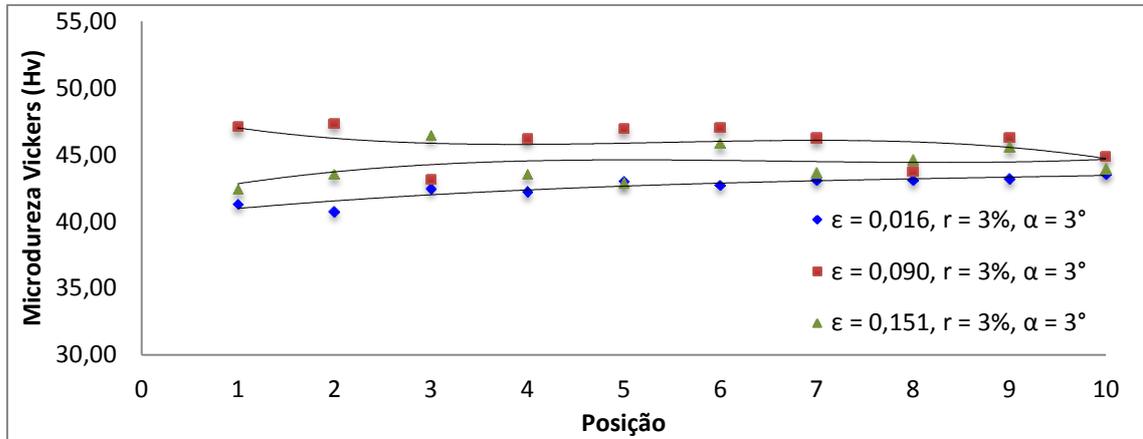
Nas Tabelas 10 a 12 e nas Figuras 23 a 25 são apresentados os valores de dureza e as distribuições ao longo da seção transversal da liga de alumínio trefilada com três semi-ângulos e três reduções e tracionada posteriormente, em três magnitudes de deformação. Ressalta-se que nas tabelas são exibidos os parâmetros de trefilação  $\alpha$  e  $r$  e ainda os diâmetros das amostras após a tração e a deformação calculada a partir desses na tração. Nos gráficos são exibidos a deformação na tração e os parâmetros da trefilação.

**Tabela 10 - Microdureza das amostras da liga de alumínio trefiladas em um passe com semi-ângulo de 3°, com tracionamento subsequente**

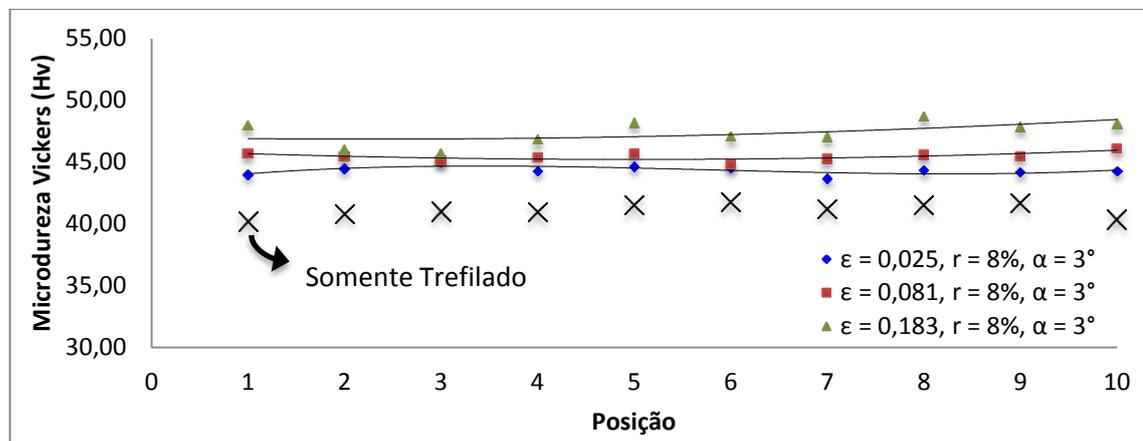
<b>MATERIAL: Liga de alumínio</b>									
<b>POSICÃO</b>	<b><math>\alpha = 3^\circ</math></b>								
	<b>r= 3%</b>			<b>r= 8%</b>			<b>r= 15%</b>		
	<b>Amostra 13 (Hv)</b>			<b>Amostra 14 (Hv)</b>			<b>Amostra 15 (Hv)</b>		
	<b>d= 9,921</b>	<b>d= 9,559</b>	<b>d= 9,271</b>	<b>d= 9,873</b>	<b>d= 9,603</b>	<b>d= 9,124</b>	<b>d= 9,901</b>	<b>d= 9,706</b>	<b>d= 9,292</b>
<b><math>\varepsilon= 0,016</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,090</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,151</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,025</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,081</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,183</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,019</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,059</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,146</math></b>	
1	41,3	47,1	42,4	44,0	45,7	48,0	45,2	47,0	48,4
2	41,2	46,4	45,2	43,7	45,0	46,2	47,6	47,6	46,9
3	43,8	42,9	46,9	44,0	43,7	46,1	45,7	47,5	48,6
4	41,3	45,9	44,3	46,0	45,3	47,5	45,9	49,2	47,9
5	42,8	44,3	42,9	44,7	45,3	49,9	44,6	46,7	46,5
6	43,1	45,8	46,7	44,8	45,6	47,3	46,3	47,6	47,4
7	43,0	45,0	45,0	43,8	44,1	47,4	46,2	47,0	48,2
8	43,7	43,7	45,6	44,6	45,7	49,4	46,0	46,7	48,4
9	43,3	45,9	45,7	44,1	45,7	48,2	45,9	47,6	50,3
10	43,1	44,3	44,6	44,2	47,4	49,4	46,5	46,1	49,5
11	40,3	48,3	41,9	45,2	45,9	45,8	46,7	45,6	47,1
12	41,1	43,4	46,0	46,1	46,5	45,3	48,3	47,1	45,7
13	43,1	46,5	42,8	42,5	45,5	46,2	46,1	44,2	46,0
14	43,2	49,6	42,9	44,5	46,1	46,5	44,5	48,4	46,6
15	42,3	48,3	45,0	44,3	44,1	46,9	44,5	46,9	47,1
16	43,2	47,5	42,3	43,5	46,4	46,7	46,0	46,4	49,2
17	42,5	43,8	43,6	44,1	45,5	48,0	46,5	47,6	48,6
18	43,1	46,7	45,5	44,3	45,3	47,5	47,8	46,9	48,2
19	44,0	45,5	43,3	44,3	44,8	46,8	45,3	48,2	47,3

Fonte: Própria autora

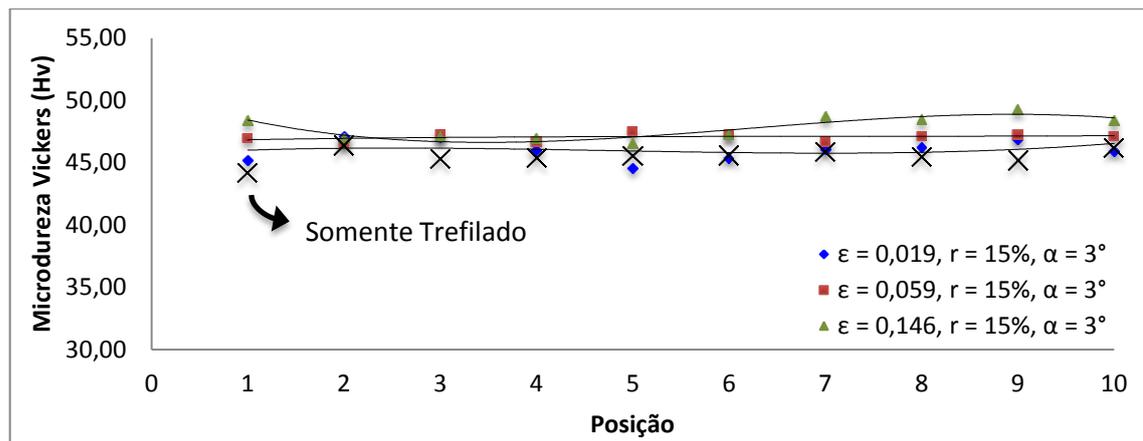
Figura 23 - Perfis de microdureza das amostras da liga de alumínio trefiladas em um passe com tracionamento subsequente



(a)



(b)



(c)

Redução de área  $r$  de (a) 3%, (b) 8% e (c) 15%

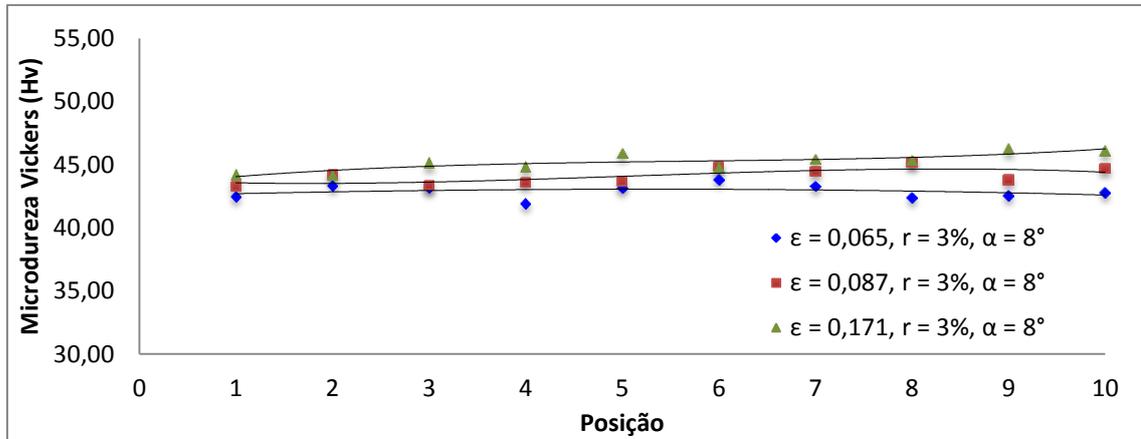
Fonte: Própria autora

**Tabela 11 - Microdureza das amostras da liga de alumínio trefiladas em um passe com semi-ângulo de 8°, com tracionamento subsequente**

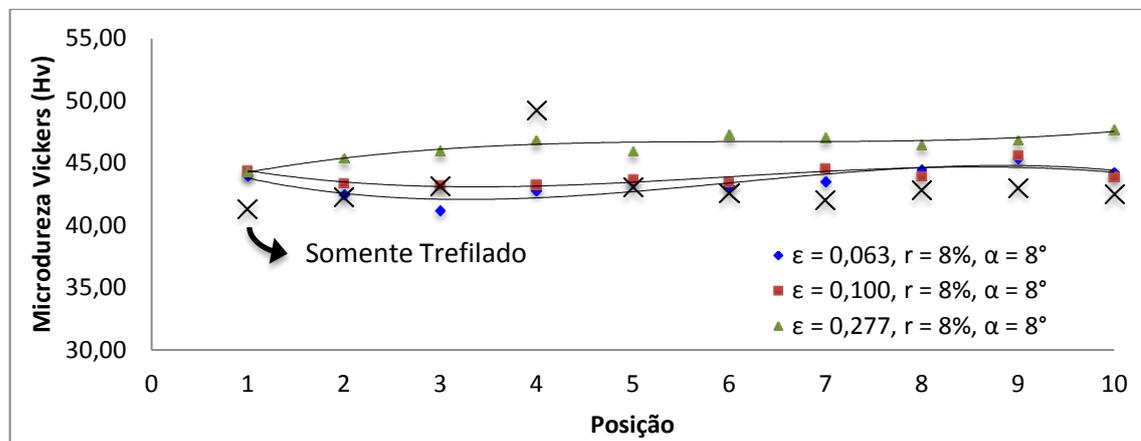
<b>MATERIAL: Liga de alumínio</b>									
<b>POSICÃO</b>	<b><math>\alpha = 8^\circ</math></b>								
	<b>r = 3%</b>			<b>r = 8%</b>			<b>r = 15%</b>		
	<b>Amostra 16 (Hv)</b>			<b>Amostra 17 (Hv)</b>			<b>Amostra 18 (Hv)</b>		
	<b>d= 9,677</b>	<b>d= 9,573</b>	<b>d= 9,180</b>	<b>d= 9,687</b>	<b>d= 9,512</b>	<b>d= 8,926</b>	<b>d= 9,972</b>	<b>d= 9,751</b>	<b>d= 9,432</b>
	<b><math>\varepsilon= 0,065</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,087</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,171</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,063</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,100</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,227</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,005</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,050</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,116</math></b>
1	42,5	43,3	44,2	44,0	44,4	44,3	45,5	43,2	45,7
2	43,0	45,1	43,7	43,8	43,9	44,4	43,5	43,0	45,2
3	43,2	42,8	45,1	41,0	44,3	45,0	44,5	43,2	46,2
4	42,1	42,9	45,1	42,1	43,3	47,2	44,0	44,3	46,5
5	43,7	43,1	48,0	44,0	43,2	46,2	45,9	44,3	44,9
6	44,2	46,3	44,8	44,1	43,4	47,8	43,1	44,7	45,7
7	43,1	45,7	46,5	42,9	44,0	47,5	45,6	44,3	46,5
8	41,6	45,5	45,9	43,7	43,3	46,8	45,7	44,8	46,7
9	43,7	43,3	46,8	45,3	46,2	47,5	46,0	43,5	45,7
10	42,9	44,6	46,3	44,2	45,9	47,8	44,8	43,5	44,8
11	43,7	43,3	44,6	41,2	42,9	46,4	44,3	44,8	44,5
12	43,1	43,9	45,2	41,4	42,1	47,0	43,5	45,6	44,3
13	41,7	44,3	44,6	43,5	43,2	46,5	43,8	43,5	46,2
14	42,6	44,2	43,8	43,1	44,2	45,7	44,5	43,0	44,2
15	43,4	43,5	44,7	42,2	43,5	46,7	44,6	46,0	47,5
16	43,5	43,2	44,4	44,1	45,2	46,6	44,5	44,4	45,9
17	43,2	44,9	44,8	45,3	44,6	46,2	44,7	43,7	45,5
18	41,4	44,3	45,7	45,4	45,0	46,2	45,1	43,9	48,3
19	42,7	44,8	45,9	44,3	41,9	47,6	45,0	43,7	46,2

Fonte: Própria autora

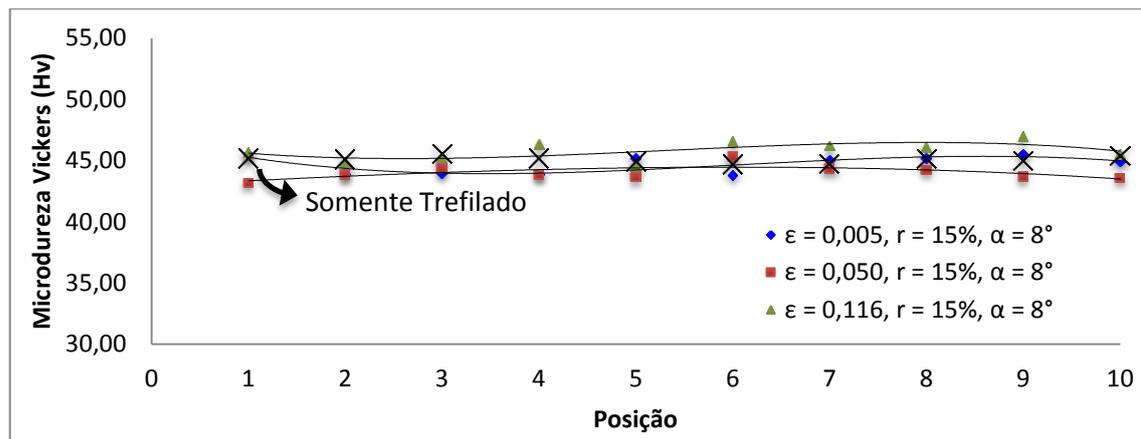
**Figura 24 - Perfis de microdureza das amostras da liga de alumínio trefiladas em um passe com tracionamento subsequente**



(a)



(b)



(c)

Redução de área  $r$  de (a) 3%, (b) 8% e (c) 15%

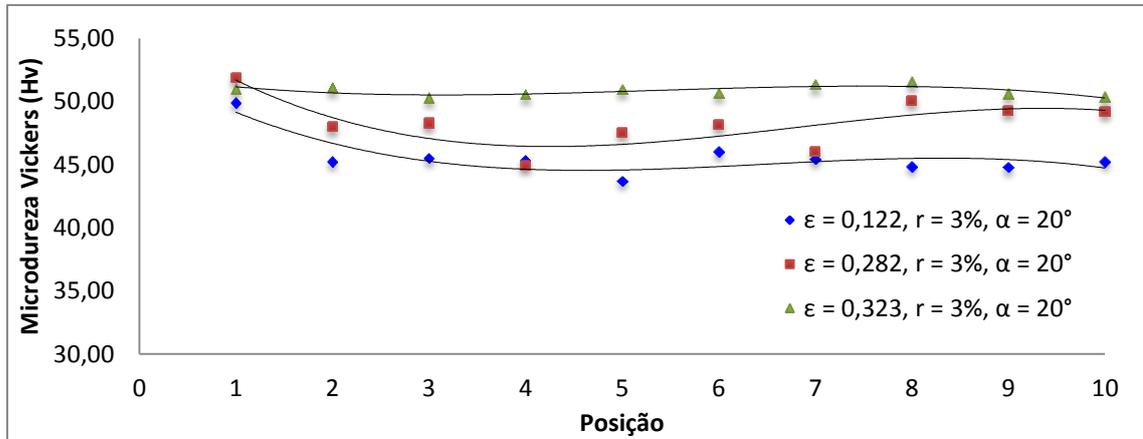
Fonte: Própria autora

**Tabela 12 - Microdureza das amostras da liga de alumínio trefiladas em um passe com semi-ângulo de 20°, com tracionamento subsequente**

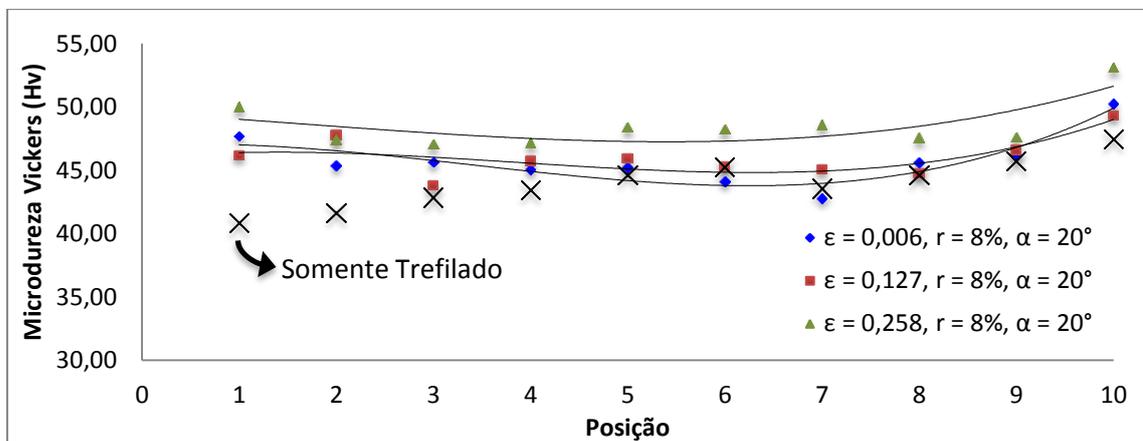
<b>MATERIAL: Liga de alumínio</b>									
<b>POSICÃO</b>	<b><math>\alpha = 20^\circ</math></b>								
	<b>r = 3%</b>			<b>r = 8%</b>			<b>r = 15%</b>		
	<b>Amostra 19 (Hv)</b>			<b>Amostra 20 (Hv)</b>			<b>Amostra 21 (Hv)</b>		
	<b>d= 9,405</b>	<b>d= 8,685</b>	<b>d= 8,506</b>	<b>d= 9,966</b>	<b>d= 9,385</b>	<b>d= 8,788</b>	<b>d= 9,931</b>	<b>d= 9,331</b>	<b>d= 8,940</b>
<b><math>\varepsilon= 0,122</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,282</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,323</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,006</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,127</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,258</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,013</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,138</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,224</math></b>	
1	49,9	51,9	51,0	47,7	46,2	50,0	46,1	51,5	46,0
2	47,1	45,3	50,9	45,0	50,4	49,4	45,2	50,5	50,2
3	47,1	47,0	49,0	45,5	44,0	47,5	47,2	51,0	48,8
4	46,7	45,1	50,2	45,8	45,9	47,0	47,9	45,6	47,5
5	43,6	46,4	51,9	46,6	45,2	47,2	46,6	46,3	50,3
6	47,6	47,1	50,3	46,2	45,7	46,0	45,2	46,9	48,1
7	45,3	46,1	50,7	41,9	44,2	47,4	46,6	48,7	45,7
8	44,8	52,5	51,0	45,9	46,1	47,1	46,5	46,6	48,2
9	46,2	50,7	50,3	45,5	45,0	48,3	47,0	48,7	48,9
10	46,3	49,6	49,7	51,5	48,3	52,0	51,6	49,7	50,0
11	43,4	50,7	51,3	45,7	45,2	45,4	45,9	45,4	45,8
12	43,9	49,6	51,6	45,8	43,6	46,6	45,6	43,6	45,2
13	44,0	44,8	50,9	44,3	45,6	47,3	49,3	48,5	47,6
14	43,8	48,7	50,0	43,8	46,7	49,6	44,1	47,2	48,0
15	44,4	49,3	51,0	42,0	44,9	50,5	46,9	45,0	48,1
16	45,6	46,0	52,0	43,6	46,0	49,8	46,8	46,8	47,9
17	44,9	47,7	52,1	45,3	43,5	48,0	47,4	44,8	49,4
18	43,4	47,9	50,9	46,8	48,2	46,9	47,0	47,5	48,5
19	44,2	48,9	51,0	49,0	50,4	54,2	48,7	49,4	51,0

Fonte: Própria autora

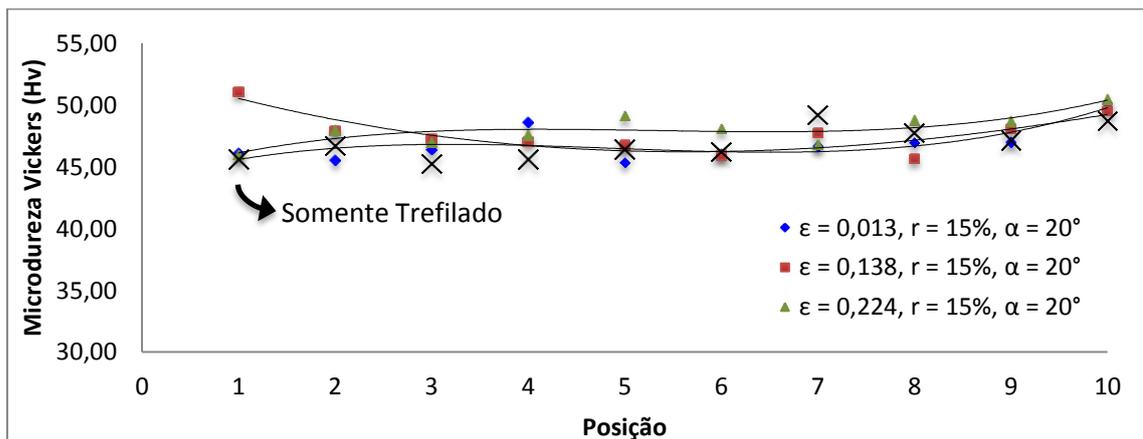
**Figura 25 - Perfis de microdureza das amostras da liga de alumínio trefiladas em um passe com tracionamento subsequente**



(a)



(b)



(c)

Redução de área  $r$  de (a) 3%, (b) 8% e (c) 15%

Fonte: Própria autora

Em geral, conforme esperado, percebe-se que com o aumento da deformação realizada na tração, os valores de dureza aumentaram. A ocorrência de tal fato se deve ao fenômeno de encruamento, fenômeno esse em que se observa a movimentação, multiplicação e interação das discordâncias (imperfeições de linha) dentro da estrutura do material, entre si e com outras barreiras à movimentação, devido a deformação imposta sobre o mesmo (DIETER, 1982). Dessa forma, a movimentação das discordâncias fica dificultada e, com isso, a resistência mecânica e, conseqüentemente, a dureza aumentam. Ressalta-se que em algumas situações, esse fenômeno se apresentou distinto, o que pode ser devido tanto ao fato de que as diferenças nos valores de deformação na tração não foram tão elevados quanto à dispersão típica da microdureza.

Para os semiângulos de  $3^\circ$  e  $8^\circ$ , para as três reduções de área empregadas, a distribuição de microdureza permaneceu relativamente homogênea, ou seja, não foram observadas mudanças significativas nos formatos dos perfis. Para o semiângulo de  $20^\circ$ , a deformação empregada na tração subsequente não foi suficiente para deixar o perfil de microdureza mais homogêneo. Dessa forma, verifica-se que para a liga de alumínio, para as condições de processo investigadas, a distribuição da propriedade não obrigatoriamente se tornou típica das características do último tipo de deformação aplicado. Nesse caso, o esforço tratativo quando puro, leva à ocorrência de deformação ao longo da seção transversal uniforme e, a princípio, as propriedades também.

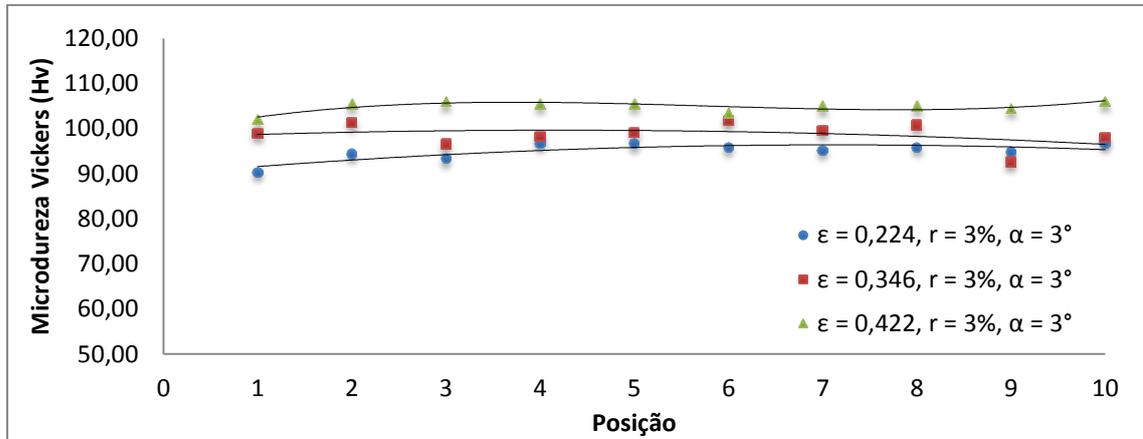
Nas Tabelas 13 a 15 e nas Figuras 26 a 28 são apresentados os valores de dureza médios (exceção o ensaio central) e as distribuições ao longo da seção transversal do cobre eletrolítico trefilado com três semi-ângulos e três reduções e tracionado posteriormente, em três magnitudes de deformação. Assim como para as amostras da liga de alumínio trefiladas e tracionadas, são exibidos nas tabelas os parâmetros de trefilação  $\alpha$  e  $r$  e os diâmetros das amostras após a tração e a deformação calculada a partir desses na tração. Nos gráficos são exibidos a deformação na tração e os parâmetros da trefilação.

**Tabela 13 - Microdureza das amostras de cobre eletrolítico trefiladas em um passe com semi-ângulo de 3°, com tracionamento subsequente**

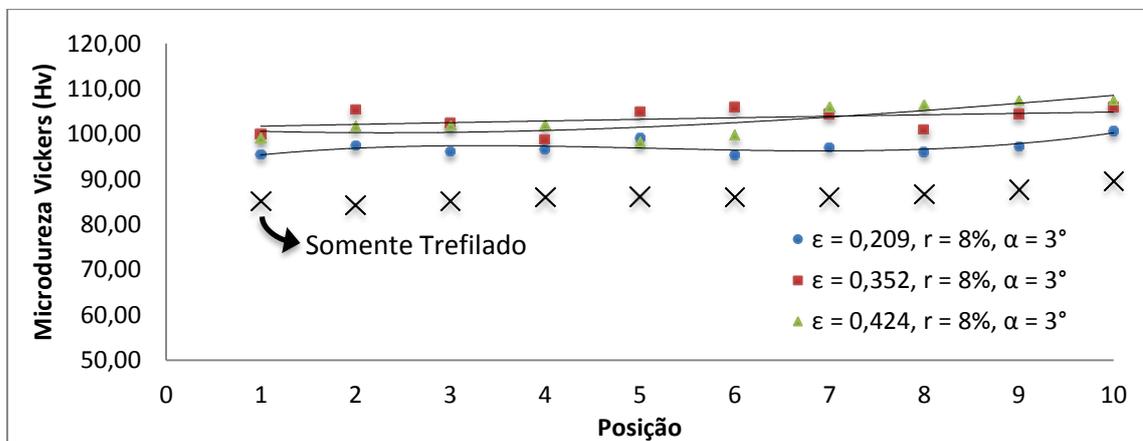
<b>MATERIAL: Cobre eletrolítico</b>									
<b>POSICÃO</b>	<b><math>\alpha = 3^\circ</math></b>								
	<b>r = 3%</b>			<b>r = 8%</b>			<b>r = 15%</b>		
	<b>Amostra 22</b>			<b>Amostra 23</b>			<b>Amostra 24</b>		
	<b>d= 8,940</b>	<b>d= 8,409</b>	<b>d= 8,096</b>	<b>d= 9,005</b>	<b>d= 8,384</b>	<b>d= 8,089</b>	<b>d= 9,356</b>	<b>d= 8,884</b>	<b>d= 8,334</b>
<b><math>\varepsilon= 0,224</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,346</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,422</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,209</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,352</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,424</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,133</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,236</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,364</math></b>	
1	90,3	98,9	102	95,5	100	99,2	103	106	111
2	96,6	103	108	96,0	108	104	98,8	104	106
3	93,2	96,8	107	92,3	103	101	98,1	103	99,1
4	95,6	97,0	106	93,6	96,8	105	97,3	109	105
5	94,5	98,5	107	98,3	106	94,5	97,6	102	102
6	96,3	104	102	95,4	105	99,6	100	105	101
7	94,1	101	104	95,3	105	103	98,3	101	106
8	98,7	104	104	97,8	101	106	96,8	106	104
9	97,8	92,4	102	97,2	107	106	98,2	104	104
10	97,7	101	103	102	107	109	97,6	105	109
11	92,2	99,8	103	98,9	103	99,5	97,8	101	102
12	93,4	96,3	105	100	102	103	97,4	104	105
13	98,0	99,4	105	99,7	101	99,1	95,3	104	108
14	98,8	99,7	104	100	104	102	94,0	105	105
15	95,3	99,7	105	95,5	107	100	94,3	104	111
16	96,3	98,2	106	98,9	104	109	93,5	103	111
17	93,1	97,7	106	94,4	101	107	94,2	111	110
18	91,8	92,8	107	97,4	102	109	95,8	108	111
19	95,9	95,2	109	99,5	105	106	99,1	107	108

Fonte: Própria autora

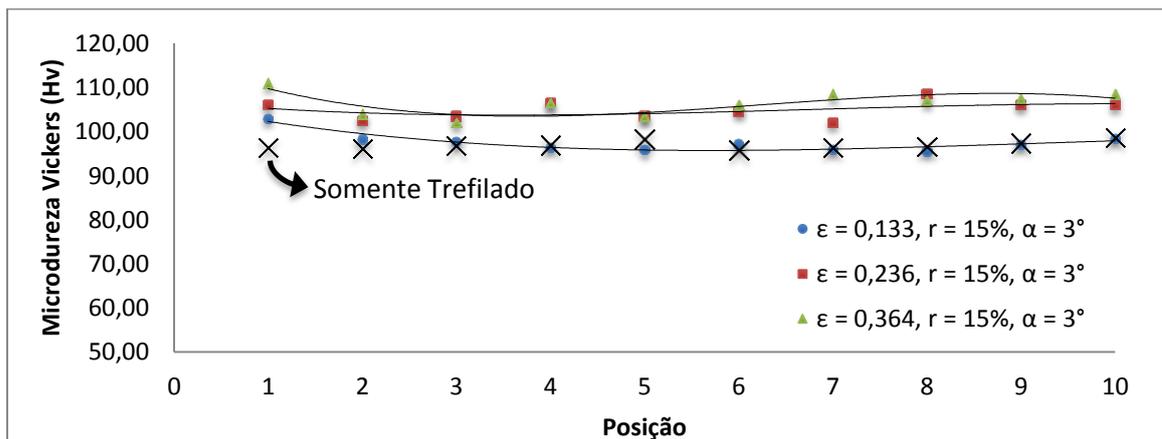
Figura 26 - Perfis de microdureza das amostras de cobre eletrolítico trefiladas em um passe com tracionamento subsequente



(a)



(b)



(c)

Redução de área  $r$  de (a) 3%, (b) 8% e (c) 15%

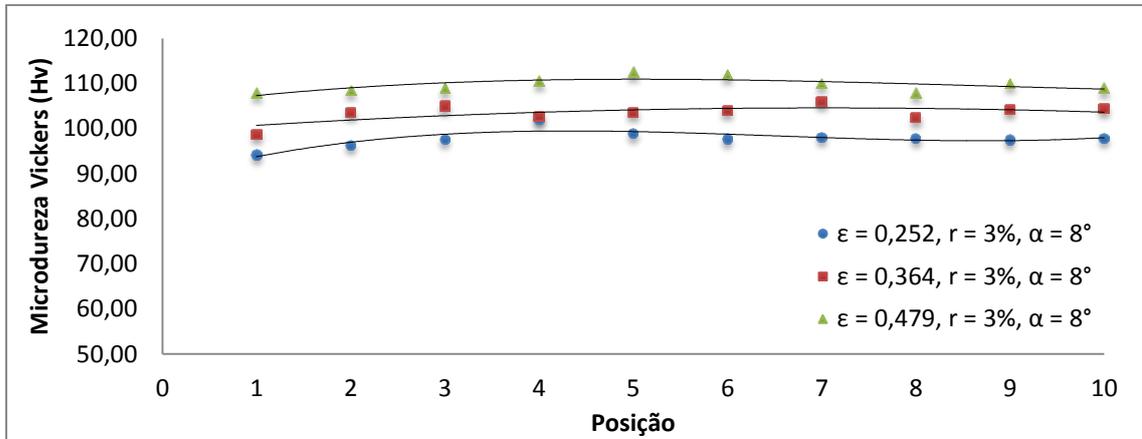
Fonte: Própria autora

**Tabela 14 - Microdureza das amostras de cobre eletrolítico trefiladas em um passe com semi-ângulo de 8°, com tracionamento subsequente**

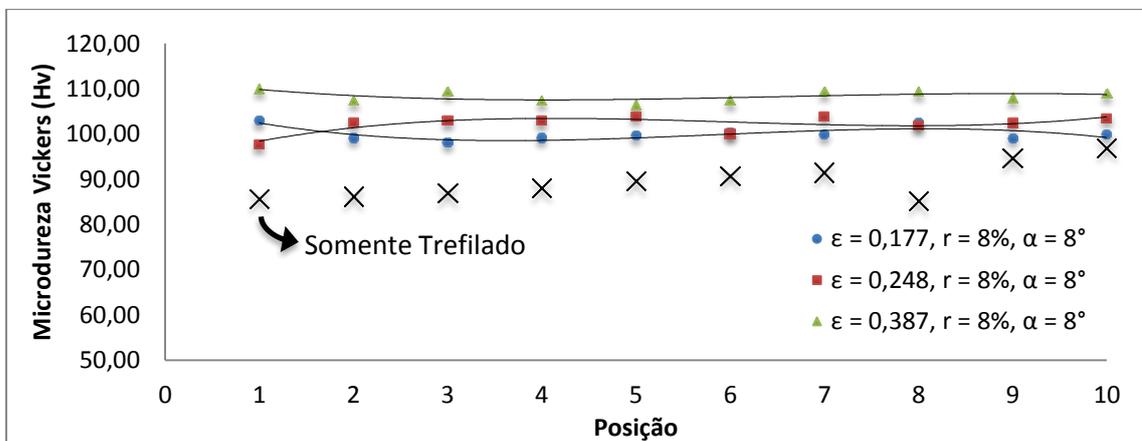
<b>MATERIAL: Cobre eletrolítico</b>									
<b>POSICÃO</b>	<b><math>\alpha = 8^\circ</math></b>								
	<b>r = 3%</b>			<b>r = 8%</b>			<b>r = 15%</b>		
	<b>Amostra 25</b>			<b>Amostra 26</b>			<b>Amostra 27</b>		
	<b>d= 8,813</b>	<b>d= 8,336</b>	<b>d= 7,869</b>	<b>d= 9,151</b>	<b>d= 8,831</b>	<b>d= 8,241</b>	<b>d= 9,372</b>	<b>d= 8,944</b>	<b>d= 8,118</b>
<b><math>\varepsilon= 0,252</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,364</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,479</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,177</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,248</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,387</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,129</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,223</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,417</math></b>	
1	94,2	98,8	108	103	97,7	110	103	109	112
2	96,2	104	109	100	99,3	110	103	106	106
3	97,9	106	108	97,2	104	109	99,1	111	104
4	102	99,4	111	101	103	110	103	103	111
5	99,5	102	115	95,3	104	110	97,8	103	115
6	99,7	104	115	99,7	101	108	99,7	106	110
7	101	107	110	99,7	104	110	100	105	111
8	99,5	96,7	107	103	104	109	98,0	104	112
9	101	99,5	109	99,6	105	108	100	102	109
10	98,9	102	108	104	104	108	101	105	114
11	96,3	103	108	98,4	106	105	104	108	111
12	97,4	104	110	99,0	102	110	103	103	108
13	102	106	110	97,3	103	105	99,2	108	113
14	98,2	105	110	104	104	103	100	106	108
15	95,7	104	109	101	99,1	107	105	104	108
16	95,0	105	110	100	104	109	97,6	102	111
17	96,1	108	109	102	99,7	110	105	104	107
18	94,0	109	111	98,6	100	108	99,0	105	108
19	96,8	107	110	95,9	103	110	93,2	105	113

Fonte: Própria autora

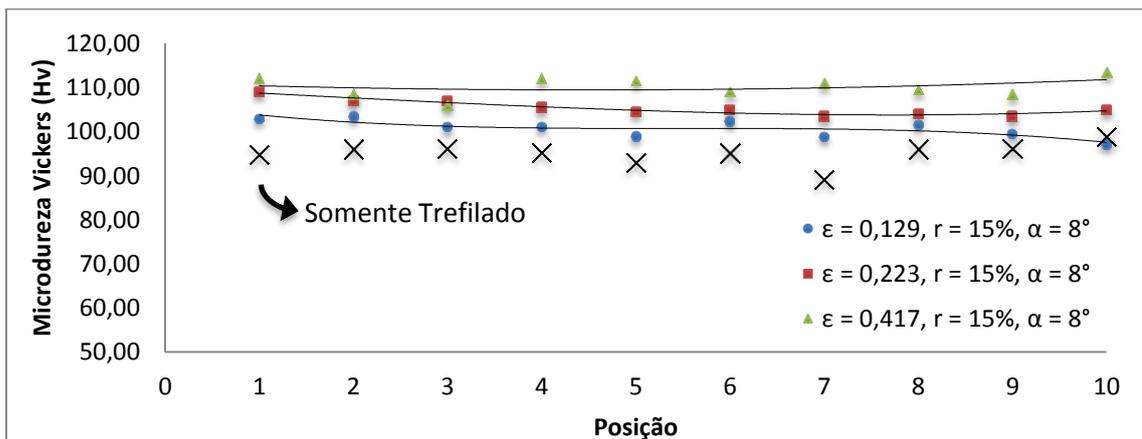
Figura 27 - Perfis de microdureza das amostras de cobre eletrolítico trefiladas em um passe com tracionamento subsequente



(a)



(b)



(c)

Redução de área  $r$  de (a) 3%, (b) 8% e (c) 15%

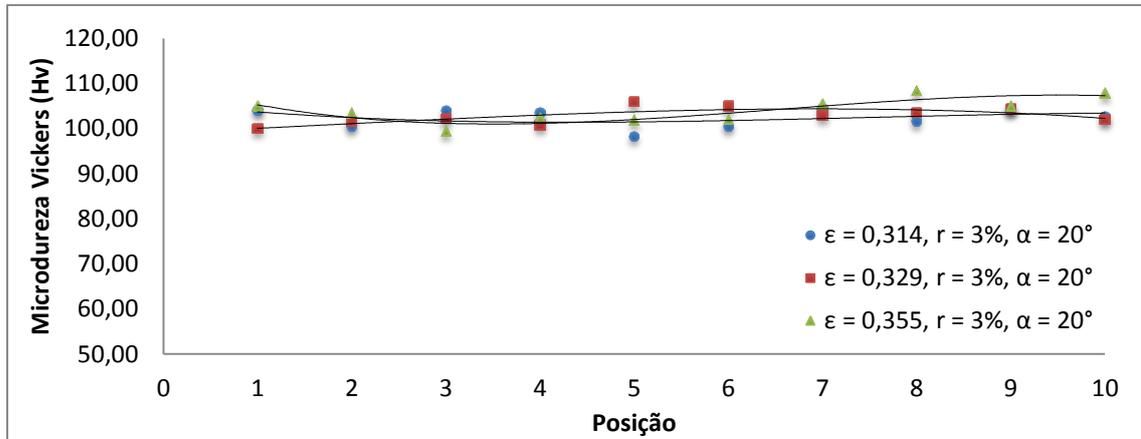
Fonte: Própria autora

**Tabela 15 - Microdureza das amostras de cobre eletrolítico trefiladas em um passe com semi-ângulo de 20°, com tracionamento subsequente**

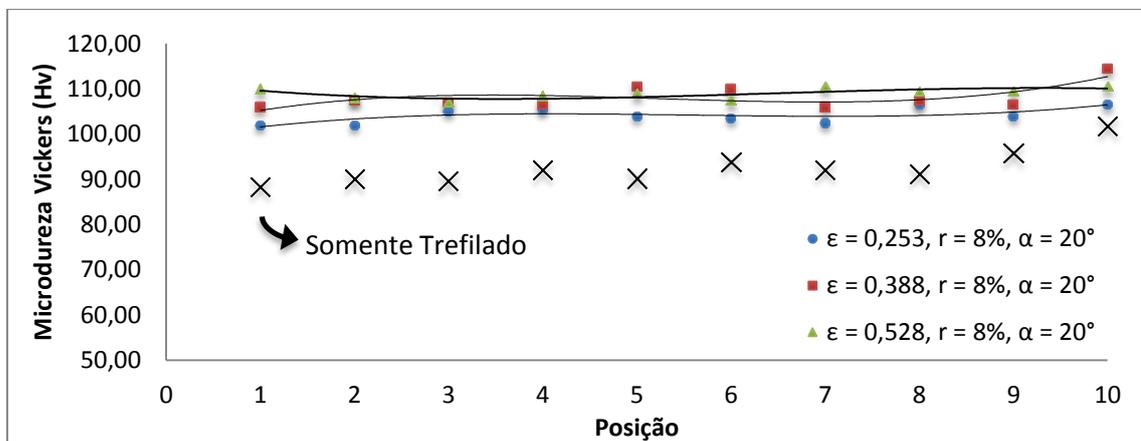
<b>MATERIAL: Cobre eletrolítico</b>									
<b>POSICÃO</b>	<b><math>\alpha = 20^\circ</math></b>								
	<b>r = 3%</b>			<b>r = 8%</b>			<b>r = 15%</b>		
	<b>Amostra 28</b>			<b>Amostra 29</b>			<b>Amostra 30</b>		
	<b>d= 8,543</b>	<b>d= 8,481</b>	<b>d= 8,371</b>	<b>d= 8,809</b>	<b>d= 8,236</b>	<b>d= 7,679</b>	<b>d= 9,127</b>	<b>d= 7,964</b>	<b>d= 7,560</b>
<b><math>\varepsilon= 0,314</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,329</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,355</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,253</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,388</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,528</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,182</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,455</math></b>	<b><math>\varepsilon= 0,559</math></b>	
1	104 Hv	100 Hv	105 Hv	102 Hv	106 Hv	110 Hv	99,2 Hv	106 Hv	110 Hv
2	104 Hv	102 Hv	106 Hv	103 Hv	109 Hv	107 Hv	104 Hv	107 Hv	111 Hv
3	107 Hv	99,3 Hv	97,1 Hv	106 Hv	111 Hv	106 Hv	105 Hv	110 Hv	109 Hv
4	104 Hv	99,6 Hv	102 Hv	104 Hv	110 Hv	111 Hv	106 Hv	107 Hv	110 Hv
5	98,0 Hv	107 Hv	104 Hv	102 Hv	111 Hv	110 Hv	106 Hv	111 Hv	110 Hv
6	101 Hv	105 Hv	102 Hv	102 Hv	113 Hv	105 Hv	106 Hv	111 Hv	112 Hv
7	104 Hv	101 Hv	103 Hv	101 Hv	105 Hv	107 Hv	107 Hv	116 Hv	110 Hv
8	99,3 Hv	103 Hv	109 Hv	104 Hv	109 Hv	110 Hv	110 Hv	118 Hv	109 Hv
9	103 Hv	103 Hv	100 Hv	101 Hv	110 Hv	110 Hv	110 Hv	109 Hv	110 Hv
10	99,5 Hv	103 Hv	107 Hv	107 Hv	118 Hv	114 Hv	107 Hv	113 Hv	111 Hv
11	96,9 Hv	101 Hv	101 Hv	101 Hv	106 Hv	109 Hv	103 Hv	107 Hv	109 Hv
12	101 Hv	105 Hv	102 Hv	104 Hv	103 Hv	108 Hv	106 Hv	107 Hv	107 Hv
13	103 Hv	102 Hv	103 Hv	107 Hv	103 Hv	106 Hv	102 Hv	111 Hv	110 Hv
14	98,5 Hv	105 Hv	99,8 Hv	106 Hv	110 Hv	108 Hv	106 Hv	110 Hv	117 Hv
15	100 Hv	105 Hv	102 Hv	105 Hv	107 Hv	110 Hv	102 Hv	109 Hv	115 Hv
16	105 Hv	105 Hv	108 Hv	104 Hv	107 Hv	114 Hv	103 Hv	115 Hv	111 Hv
17	104 Hv	104 Hv	108 Hv	109 Hv	106 Hv	109 Hv	102 Hv	109 Hv	110 Hv
18	106 Hv	106 Hv	110 Hv	107 Hv	103 Hv	109 Hv	104 Hv	113 Hv	112 Hv
19	106 Hv	101 Hv	109 Hv	106 Hv	111 Hv	107 Hv	103 Hv	116 Hv	118 Hv

Fonte: Própria autora

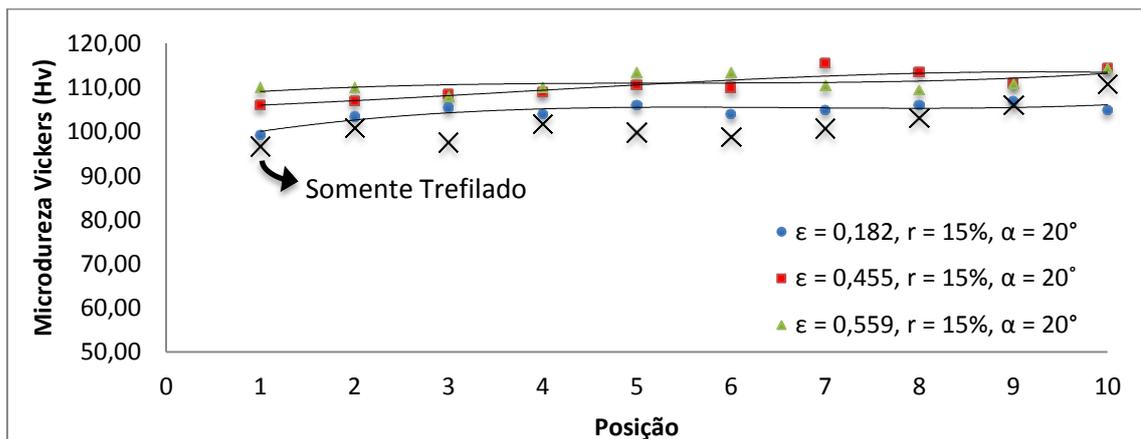
Figura 28 - Perfis de microdureza das amostras de cobre eletrolítico trefiladas em um passe com tracionamento subsequente



(a)



(b)



(c)

Redução de área  $r$  de (a) 3%, (b) 8% e (c) 15%

Fonte: Própria autora

Assim como observado para as amostras da liga de alumínio trefiladas e posteriormente tracionadas, percebe-se que, em geral, ao se aumentar a deformação na tração realizada, os valores de dureza aumentaram para as amostras de cobre eletrolítico, nas condições de processo analisadas. A ocorrência de tal fato se deve também ao fenômeno de encruamento, no qual a movimentação, multiplicação e interação das discordâncias entre si e com outras barreiras à movimentação dentro da estrutura do material, devido a deformação imposta sobre o mesmo, é dificultada e assim a resistência mecânica e conseqüentemente a dureza aumentam.

Para os três semi-ângulos utilizados, 3°, 8° e 20°, assim como para as três reduções de área empregadas, 3%, 8% e 15%, observa-se que a distribuição de microdureza se mostrou relativamente homogênea, ou seja, não foram observadas mudanças significativas nos formatos dos perfis. Dessa forma, verifica-se que, para o cobre eletrolítico, para as condições de processo investigadas, a distribuição das propriedades mecânicas é relativamente uniforme.

Além disso, de maneira geral, a dureza das amostras trefiladas com tracionamento subsequente analisadas, é superior àquela em que os materiais somente foram trefilados, para as mesmas condições/parâmetros de processo. Tal fato é justificado pela magnitude da deformação imposta sobre os materiais, o que influencia diretamente nos valores de dureza medidos.

## 5 CONCLUSÃO

Através desse trabalho foi possível conhecer um dos processos de conformação mecânica bastante utilizado nas indústrias por oferecer os mais diversos produtos de seção transversal reduzida, com bom acabamento superficial e com controle eficaz das propriedades e dimensões.

Aprofundar nos estudos das variáveis envolvidas na trefilação é de fundamental importância para a otimização do ciclo produtivo, pois permitirá desenvolver materiais dentro das especificações de cada empresa. O planejamento e o monitoramento constante da lubrificação, da matéria prima, da fieira (material e ângulo) e do percentual de redução da seção transversal são essenciais uma vez que têm influência nas propriedades mecânicas resultantes no material.

Os resultados obtidos para a totalidade das amostras mostraram que os parâmetros envolvidos no processo de trefilação tem grande influência na distribuição de dureza e na deformação ao longo da seção transversal dos materiais. Em geral, verificou-se maiores valores de dureza nos metais com a elevação do semi-ângulo de trefilação e da redução de área em um passe no processo.

Para os metais analisados somente trefilados, os perfis de microdureza se apresentaram heterogêneos para situações nas quais o semi-ângulo empregado foi mais elevado ( $20^\circ$ ) e relativamente homogêneos para semi-ângulos de trefilação mais baixos ( $3^\circ$  e  $8^\circ$ ). Pode-se perceber que após o tracionamento subsequente nos materiais, os perfis de microdureza se mostraram mais homogêneos para semi-ângulos de trefilação maiores, o que implica em uma distribuição mais uniforme das propriedades mecânicas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRESCIANI FILHO, E.; SILVA, I. B.; BATALHA, G. F.; BUTTON, S. T. **Conformação plástica dos metais**. 6. ed. São Paulo: EPUSP, 2011. 254 p.

BRUSIUS JUNIOR, W. **Análise da lubrificação seca para trefilação e proposta de padronização de lubrificantes para arame de médio carbono**. 2009. 127f. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) – Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CETLIN, P. R.; HELMAN, H. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2005. 264 p.

CETLIN, P.R. Redundant deformation factor evaluation through the stress-strain curves superposition method in round section bar drawing – A Literature Analysis. *Journal of Engineering Materials and Technology*, v. 109, p. 272-275, 1987.

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.

CORRÊA, E. C. .S. **Aspectos do encruamento de metais previamente deformados a frio**. 2004. 233f. Tese (Doutorado) – Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982. 653 p.

GUIMARÃES, V. A. **Conformação plástica**. 2010. – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo.

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, p. 230-233, 2008.

KIMINAMI, C. S.; CASTRO, W. B.; OLIVEIRA, M. F. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013. 235 p.

MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. **Princípios de metalurgia mecânica**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1982. 505 p.

REED-HILL, R.E., **Princípios de Metalurgia Física**, Ed. Guanabara Dois, 2ª. Edição, 1982.

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., MAJTA, J., SKOLYSZEWSKI, A. Analysis of inhomogeneity of mechanical properties in stainless steel rods after drawing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 45, p. 293-298, 1994.