

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

BRUNO DUARTE TEIXEIRA

**ANÁLISE DO ENCRUAMENTO DE BARRAS DA LIGA DE ALUMÍNIO 6101 E DE
AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 TREFILADOS EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE
PROCESSO**

BELO HORIZONTE

2021

BRUNO DUARTE TEIXEIRA

ANÁLISE DO ENCRUAMENTO DE BARRAS DA LIGA DE ALUMÍNIO 6101 E DE
AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 TREFILADOS EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE
PROCESSO

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 de Bacharel em
Engenharia de Materiais

Orientadora: Profa. Dra Elaine Carballo Siqueira Corrêa

BELO HORIZONTE

2021

BRUNO DUARTE TEIXEIRA

ANÁLISE DO ENCRUAMENTO DE BARRAS DA LIGA DE ALUMÍNIO 6101 E DE
AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 TREFILADOS EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE
PROCESSO

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 de Bacharel em
Engenharia de Materiais

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa (Orientadora)

Profa. Dra. Aline Silva Magalhães

Prof. Dr. Wellington Lopes

Enga. Marianne Diniz Pinho

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais, Gilmar e Michelle, por não pouparem esforços em me apoiar durante toda a minha jornada acadêmica e pessoal.

Aos meus irmãos, por se fazerem presentes em todos os momentos e me incentivarem a ser melhor a cada dia.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado no dia-a-dia da universidade e tornaram a jornada um tanto quanto mais leve.

Ao CEFET-MG e a todo o seu corpo docente pelo suporte durante todos os anos de caminhada, permitindo o meu amadurecimento como pessoa e profissional.

Agradeço, em especial, à minha professora orientadora Elaine pela orientação, cuidado, paciência e confiança. Obrigado pelo apoio incondicional em um cenário tão adverso quanto o que vivemos para a conclusão desse trabalho, sem o seu apoio nada disso teria sido possível.

RESUMO

Um dos principais fenômenos decorrentes dos processos de conformação mecânica como, por exemplo, a trefilação, é o encruamento, que pode ser definido como o aumento da resistência mecânica do material metálico durante a deformação plástica devido à diminuição da capacidade de movimentação das discordâncias. Dessa forma, o encruamento é responsável por alterar propriedades físicas dos materiais e impactar diretamente as propriedades mecânicas, seja por meio do aumento de dureza ou resistência mecânica, sendo assim necessário em diversos produtos finais utilizados no dia-a-dia. Desse modo, dada a importância do fenômeno nas propriedades dos produtos finais, o presente trabalho teve por objetivo analisar como diferentes parâmetros da trefilação (semiângulo de fieira e redução de área) e as características estruturais influenciam na capacidade de encruamento de dois materiais. Para isso optou-se por trabalhar com duas ligas metálicas, o aço inoxidável AISI 304 e o alumínio 6101, para verificar o impacto do processamento, da estrutura cristalina e da energia de falha de empilhamento no encruamento dos materiais, sendo a análise realizada por meio do expoente de encruamento da equação de Hollomon e da taxa de encruamento. Para o aço inoxidável AISI 3040 encontrou-se uma correlação direta entre o expoente de encruamento, a redução de área e o semiângulo de fieira, menores semiângulos de fieira e reduções de área levaram a maiores expoentes de encruamento. Enquanto para o alumínio 6101 essa correlação não é tão direta, menores reduções de área levam a maiores expoentes de encruamento, mas não necessariamente diferentes semiângulos de fieira em uma mesma redução de área levam a esse comportamento de maior expoente de encruamento.

Palavras-chave: encruamento, equação de Hollomon, trefilação, taxa de encruamento.

ABSTRACT

One of the main phenomena resulting from forming processes, such as drawing, is the work hardening, related to the increase in the stress required to deform the material, due to the interaction of dislocations with other dislocations and with other barriers to their motion through the lattice. The phenomenon is responsible for changing the physical properties of materials and for directly affecting the mechanical properties, either through the increase in hardness or mechanical strength, thus being necessary in many final products used in everyday life. Thus, given the importance of the phenomenon in the properties of the final products, the present work aimed to analyze the influence of different drawing parameters (die half-angle and area reduction) and the structural characteristics on the work hardening of the studied materials. For this, it was decided to work with two metallic alloys, AISI 304 stainless steel and 6101 aluminum alloy, to verify the impact of processing, crystal structure and stacking failure energy in the hardening of the materials, with the analysis carried out through the hardening exponent of the Hollomon equation and the hardening rate. For AISI 3040 stainless steel, a direct correlation was found between the hardening exponent, the area reduction and the die half angle, smaller die half-angles and area reductions led to higher work hardening exponents. While for aluminum 6101 this correlation is not so direct, smaller area reductions lead to higher work hardening exponents, but not necessarily different die half-angles in the same area reduction lead to this behavior of higher work hardening exponent.

Keywords: work hardening, Hollomon's equation, drawing, work hardening rate.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS.....	13
2.1	Objetivo Geral.....	13
2.2	Objetivos Específicos	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1	Descrição Geral do Processo de Trefilação de Barras	14
3.1.1	Processos de Conformação Mecânica	14
3.1.2	Aspectos Gerais do Processo de Trefilação.....	14
3.1.3	Características Geométricas do Processo de Trefilação	18
3.1.4	Máquinas de Trefilação	20
3.1.5	Lubrificação.....	23
3.2	A Deformação e a Tensão na Trefilação.....	25
3.2.1	Aspectos gerais da deformação plástica no processo de trefilação	25
3.2.2	Influência da Temperatura e da Velocidade de Deformação nos Processos de Conformação Mecânica.....	28
3.3	Encruamento e Análise do Encruamento.....	29
3.3.1	Aspectos Gerais do Encruamento dos Materiais Metálicos	29
3.3.2	Métodos Usuais de Análise do Encruamento dos Materiais Metálicos.....	33
4	MATERIAIS E MÉTODOS	37
4.1	Descrição Geral do Trabalho Desenvolvido	37
4.2	Informações Relativas ao Trabalho Anterior (CORRÊA, 2004)	38
4.3	Análise do Encruamento por Meio do Expoente de Encruamento da Equação de Hollomon	40
4.4	Análise do Encruamento por Meio da Taxa de Encruamento	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1	Análise do Encruamento por Meio do Expoente de Encruamento da Equação de Hollomon	44
5.2	Análise do Encruamento por Meio da Taxa de Encruamento	52
6	CONCLUSÃO	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Representação esquemática do processo de trefilação.....	14
Figura 3.2 – Representação da bancada de trefilação.....	15
Figura 3.3 – Modificações estruturais e das propriedades mecânicas no recozimento de amostras de latão previamente deformadas a frio.....	16
Figura 3.4 – Regiões da fieira.....	18
Figura 3.5 – Ângulos da fieira de trefilação.....	18
Figura 3.6 – Máquina de trefilar sem deslizamento.....	20
Figura 3.7 – Máquina de trefilar com deslizamento.....	21
Figura 3.8 – Representação película lubrificante.....	23
Figura 3.9 – Esforços presentes na trefilação.....	25
Figura 3.10 – Representação da deformação redundante.....	26
Figura 3.11 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica de transmissão de amostras de aço inoxidável AISI 304L, de uma liga de cobre e de alumínio nas quais podem ser observadas discordâncias.....	29
Figura 3.12 – Representação da movimentação de uma discordância aresta por deslizamento de planos atômicos mediante a aplicação de tensão cisalhante.....	30
Figura 3.13 – Propriedades mecânicas com o aumento da deformação plástica.....	31
Figura 3.14 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica de transmissão de amostras de alumínio deformadas plasticamente a frio em diferentes magnitudes.....	32
Figura 3.15 – Exemplo de determinação do expoente de encruamento n da Equação de Hollomon por meio da linearização da curva tensão - deformação real – aço dual phase com microestrutura composta de cerca de 47% de martensita e 53% de ferrite.....	33
Figura 3.16 – Exemplo de utilização da taxa de encruamento para avaliar o comportamento mecânico de dois materiais metálicos, um aço dual phase DP e o aço inoxidável AISI 304...	35
Figura 4.1 – Fluxograma das etapas experimentais do trabalho anterior, que deu origem à presente análise, e das etapas deste trabalho.....	36
Figura 4.2 – Procedimento para determinação do expoente de encruamento.....	40
Figura 4.3 – Exemplo de resultado obtido pelo procedimento de determinação da taxa de encruamento.....	42
Figura 5.1 – Expoente de encruamento do aço inoxidável AISI 304 trefilado inteiro para diferentes α e r	44

Figura 5.2 – Expoente de encruamento do aço inoxidável trefilado na camada central para diferentes α e r	45
Figura 5.3 - Expoente de encruamento do alumínio 6101 trefilado inteiro para diferentes α e r	47
Figura 5.4 - Expoente de encruamento do alumínio 6101 trefilado na camada central para diferentes α e r	48
Figura 5.5 – Taxa de encruamento do aço inoxidável trefilado inteiro para diferentes α e r ...	52
Figura 5.6 – Taxa de encruamento do aço inoxidável trefilado inteiro para diferentes α em um mesmo r	53
Figura 5.7 – Taxa de encruamento do aço inoxidável trefilado na camada central para diferentes α e r	54
Figura 5.8 – Taxa de encruamento do aço inoxidável para diferentes α em um mesmo r , comparativo com o trefilado na camada central.....	55
Figura 5.9 – Taxa de encruamento do alumínio 6101 trefilado inteiro para diferentes α e r ...	57
Figura 5.10 – Taxa de encruamento do alumínio 6101 trefilado inteiro para diferentes α em um mesmo r	58
Figura 5.11 – Taxa de encruamento do alumínio 6101 trefilado na camada central para diferentes α e r	59
Figura 5.12 – Taxa de encruamento do alumínio 6101 para diferentes α em um mesmo r , comparativo com o trefilado na camada central.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Exemplos de valores de coeficiente de resistência e expoente de encruamento para materiais metálicos diversos – temperatura ambiente.....	34
Tabela 4.1 – Composição química.....	38
Tabela 4.2 – Condições de trefilação.....	39
Tabela 5.1 – Expoente de encruamento do aço inoxidável AISI 304 para diferentes condições de trefilação.....	43
Tabela 5.2 – Expoente de encruamento da liga de alumínio 6101 para diferentes condições de trefilação.....	46
Tabela 5.3 – Valores de deformação média $\epsilon_{\text{visiopl}}$ nas barras trefiladas obtidos por meio da técnica de visioplasticidade.....	50

LISTA DE SÍMBOLOS

α	semiângulo de trefilação
r	redução de área
A_i	área inicial da seção transversal da barra
A_f	área final da seção transversal da barra
d_i	diâmetro inicial da barra
d_f	diâmetro final da barra
Δ	parâmetro geométrico
σ_C	tensão compressiva
σ_T	tensão trativa
ε	deformação homogênea
ε_m	deformação média
ϕ	coeficiente de deformação redundante
Y	tensão de escoamento
V_ε	velocidade de deformação
k	coeficiente de resistência
n	expoente de encruamento
R^2	coeficiente de determinação

1 INTRODUÇÃO

A trefilação pode ser definida como um processo de conformação mecânica onde submete-se um material metálico a esforços de tração para que o mesmo passe através de uma fieira, a fim de se obter um produto final trefilado de menor área de seção transversal e maior comprimento, além de outras alterações também nas propriedades mecânicas finais do produto trefilado (BRESCIANI et al., 2011).

Dentre os efeitos do trabalho mecânico a frio pode-se destacar o encruamento, definido como o fenômeno onde o material aumenta a sua resistência mecânica quando submetido a uma elevação contínua da tensão cisalhante com a ocorrência da deformação plástica, baseada nas interações entre campos de deformação de discordâncias (BRESCIANI et al., 2011; DIETER, 1982). Além de ser uma consequência do processamento, é um dos métodos mais utilizados para obtenção de maior resistência mecânica desses materiais, destacando assim a sua importância nos processos de conformação mecânica.

Evidenciada a importância da trefilação e também do encruamento no contexto diário do processamento de materiais, avaliou-se no presente trabalho o efeito da alteração de parâmetros do processo de trefilação (semiângulo de fieira e redução de área) na capacidade de encruamento da barra trefilada para duas ligas metálicas distintas por meio da análise do expoente de encruamento da equação de Hollomon e da taxa de encruamento.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliação dos efeitos da alteração de parâmetros da trefilação de barras no encruamento de duas ligas metálicas distintas, aço inoxidável AISI 304 e alumínio 6101.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a influência do semiângulo de feira e da redução de área no expoente de Hollomon do aço inoxidável AISI 304 e do alumínio 6101.
- Analisar o comportamento da taxa de encruamento do aço AISI 304 e do alumínio 6101 após processamento mecânico à frio anterior, no presente trabalho, a trefilação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Descrição Geral do Processo de Trefilação de Barras

3.1.1 Processos de Conformação Mecânica

O processo de conformação de um corpo metálico pode ser entendido como um processo de modificação da forma do objeto metálico à outra forma definida. Tais processos de conformação podem ser divididos em duas categorias principais: os processos mecânicos e os processos metalúrgicos.

Nos processos mecânicos, aplicam-se tensões externas a fim de promover as modificações de forma, com aplicação de altas temperaturas (em alguns casos), mas nunca levando o material até a liquefação. Por outro lado, nos processos metalúrgicos, a mudança na forma do objeto é obtida através da aplicação de tensões externas, podendo utilizar-se de temperaturas elevadas, mas liquefazendo o material ou aplicando partículas metálicas através da difusão, como exemplo os processos de fundição e sinterização, respectivamente.

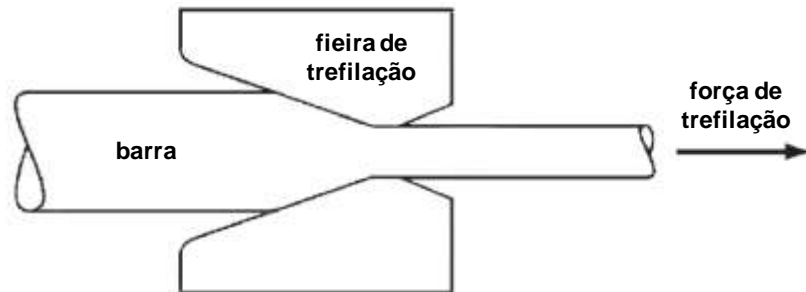
Processos mecânicos onde a tensão aplicada é, geralmente, inferior ao limite de resistência do material, são denominados processos de conformação mecânica. O estudo dessa categoria de processamento é extremamente relevante no contexto atual, uma vez que, praticamente todos os produtos metálicos que são produzidos são submetidos à conformação, em um ou várias etapas do processo produtivo (BRESCIANI et al., 2011). Os processos que envolvem deformação plástica podem ainda ser definidos como operações onde há a aplicação de um esforço externo, capaz de alterar permanentemente a geometria e dimensão do produto, caracterizados principalmente pela manutenção do volume (DIETER, 1982). Dentre os processos de conformação, pode-se destacar a trefilação, objeto de estudo desse trabalho.

3.1.2 Aspectos Gerais do Processo de Trefilação

A trefilação é um processo de conformação mecânica que consiste na submissão do material metálico a esforços de tração, forçando-o a passar através de uma matriz cônica (fieira), resultando em um produto trefilado de menor área de seção transversal e maior comprimento (Figura 3.1), além de alterações também nas suas propriedades mecânicas

finais, resultado típico da deformação plástica a frio (BRESCIANI et al., 2011; CORRÊA, 2004).

Figura 3.1 – Representação esquemática do processo de trefilação



Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2008.

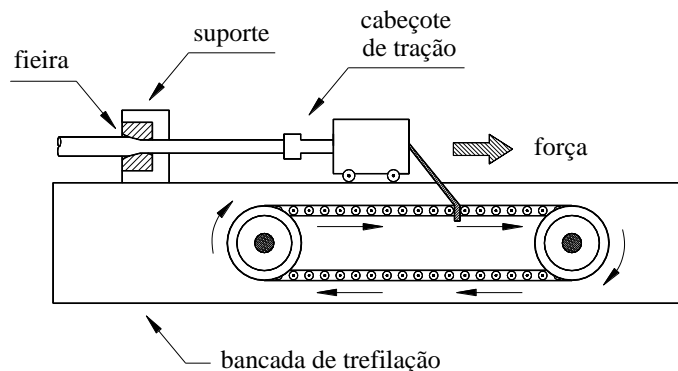
A operação de trefilação pode consistir ainda em um grupo de fiação alocadas em série, dependendo das características finais desejadas para o material, como é o caso de barras, tubos e fios, comumente produzidos deste modo (CALLISTER, 2008). Em comparação a outros processos de conformação como a laminação e o forjamento, por exemplo, a trefilação pode ser considerada mais vantajosa pelo seu menor custo, processamento contínuo, melhor controle dimensional da peça, e ainda, sua aplicabilidade em seções transversais pequenas (WRIGHT, 2011).

Inicia-se o processo com a limpeza do material metálico, uma vez que, proveniente de outros processos de fabricação anteriores, há a possibilidade de que uma camada de óxido esteja presente sobre a superfície. Esses óxidos, caso não sejam retirados, podem levar a uma redução da vida útil da fiação, além de prejudicarem a qualidade do material trefilado. Essa retirada pode ocorrer através de meio químico (decapagem), ou por retirada mecânica (rebarbação), sendo o melhor deles escolhido de acordo com a disponibilidade financeira do projeto e também da qualidade final desejada do fio. A rebarbação consiste na usinagem do fio, com produção de cavaco, e conseqüentemente maior custo agregado ao processo, porém resultando em um produto de maior qualidade superficial. Por outro lado, na decapagem, o fio é imerso em soluções ácidas, seguidas de lavagens consecutivas (água fria e água quente, respectivamente), em que se neutraliza, com a utilização de aditivos, a ação ácida da solução (BRESCIANI et al., 2011).

Após a retirada dessa camada de óxido, a peça é então apontada e lubrificada. A trefilação de barras é realizada em uma bancada, onde as peças são inseridas na fiação e presas ao cabeçote, para então movimentarem-se à uma velocidade entre 150 e 1500mm/s, pela ação

de um mecanismo hidráulico ou de transmissão por corrente (Figura 3.2) (CORRÊA, 2004). A dureza projetada para o material pode ser atingida através de modificações de alguns parâmetros do processo, como exemplo a redução do passe de trefilação e da velocidade. Ademais, tratamentos térmicos também são recomendados nesses casos afim de obter-se as propriedades desejadas, dependendo sempre da análise do material trefilado (DIETER, 1982).

Figura 3.2 – Representação da bancada de trefilação



Fonte: CORRÊA, 2004.

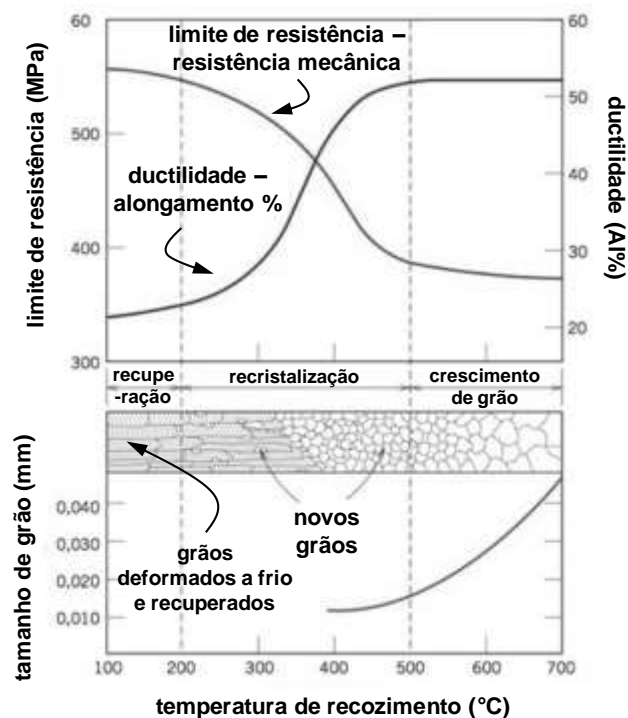
Comumente, na trefilação, o tratamento térmico de recozimento é realizado sobre os produtos com o intuito de reduzir o encruamento causado pela conformação mecânica e conduzir o metal encruado à sua condição inicial. O tratamento pode ser aplicado ao fim de todo o processo ou ainda entre os passes de trefilação. Vale destacar os três principais tipos de recozimento que são aplicados na trefilação, sendo eles:

- Recozimento de recristalização: remoção das deformações prévias na microestrutura do material, eliminando assim o encruamento;
- Recozimento para alívio de tensões: objetiva aliviar as tensões que surgem no material durante a solidificação, mas sem significativa alteração da microestrutura do material;
- Recozimento pleno: mudança na microestrutura do material, com a ocorrência da recristalização, além da mudança de fase (SCHAEFFER, 2009).

Esses ciclos térmicos podem envolver um ou mais dos seguintes fenômenos termicamente ativados: recuperação, recristalização e crescimento de grãos (Figura 3.3). A Figura 3.3 traz ainda curvas com tendências de propriedades mecânicas e características típicas de cada um dos fenômenos mencionados (BRESCIANI et al., 2011).

Além do recozimento, outro tratamento térmico comumente utilizado na trefilação é a austêmpera modificada, realizada anteriormente ao processo, de modo a favorecer a deformação pela alteração da microestrutura, fazendo com que o encruamento ocorra mais facilmente (SCHAEFFER, 2009).

Figura 3.3 – Modificações estruturais e das propriedades mecânicas no recozimento de amostras de latão previamente deformadas a frio.



Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2008.

Ao final do processo de trefilação surge um novo fator necessário de atenção, o acabamento superficial do produto trefilado, uma vez que há uma gama de defeitos possíveis que podem surgir na superfície do arame durante processo, tais como arranhões, trincas transversais e balanças. Além dos defeitos superficiais, podem surgir ainda defeitos em escala micro, que podem levar a fissuras e até ruptura do produto quando submetido a esforços, reduzindo assim a vida útil do material, paralelamente à queda de produtividade e qualidade (SHINOHARA; YOSHIDA, 2005).

Alguns defeitos, porém, não são provenientes do processo, mas sim da matriz da operação, dentre eles pode-se destacar as marcas nos fios, como: 1) anéis de trefilação: cone de trabalho desgastado, que surgem da trefilação de fios com metais de baixa dureza, percebido como marcas circulares e transversais; 2) marcas de trefilação: cone de trabalho

desgastado, que surgem da trefilação com metais duros, percebido por marcas longitudinais; 3) trincas: podem ser provocadas por inúmeros fatores, tais como impurezas no material do fio e do lubrificante, redução excessiva, dentre outros (BRESCIANI et al., 2011).

3.1.3 Características Geométricas do Processo de Trefilação

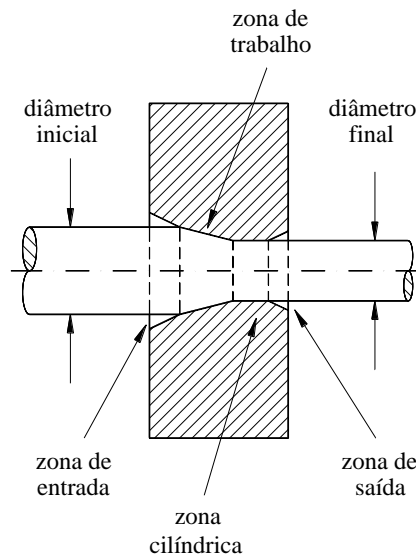
A fieira, ferramenta utilizada na trefilação dos materiais metálicos, possui uma grande influência sobre o processo, a iniciar pelo seu formato cônico responsável pelo deslizamento do material ao entrar em contato com a matriz, de modo que se minimiza a taxa de abrasão presente sobre o material nessa etapa. O formato cônico ainda facilita o processo de lubrificação, que sofre influência pela área de entrada da matriz por onde passa o material, e também pela área de contato entre material e fieira (WRIGHT, 2011). A fieira é externamente composta por uma carcaça de aço, enquanto em seu interior emprega-se um material com elevada dureza, sendo usualmente diamante sintético ou um metal duro. Fieiras compostas internamente por metais duros são utilizadas para conformação de arames com diâmetro superior a 2mm, tubos e barras de seção transversal circular. Por outro lado, os que utilizam diamante sintético em seu interior são aplicados para conformação de arames com diâmetro inferior a 2mm (BRESCIANI et al., 2011).

O interior da fieira apresenta quatro regiões distintas: zona de entrada, zona de trabalho, zona cilíndrica e zona de saída, representadas na Figura 3.4. Na figura ainda é possível observar as representações dos diâmetros inicial e final do material metálico (CORRÊA, 2004). A zona de entrada permite a entrada do material na fieira, guiando-o, além de permitir também a entrada do lubrificante, levando assim à redução do atrito existente entre fieira e o material. Na zona de trabalho tem-se a ocorrência da deformação plástica, há nessa zona a imposição de fluxo convergindo sobre o material, de modo a forçar a sua passagem com um ângulo α (semiângulo de trefilação) (BRESCIANI et al., 2011; WRIGHT, 2011). A diminuição desse ângulo implica, diretamente, no aumento do atrito e, conseqüentemente, no aumento da tensão no processo de trefilação.

Um aumento excessivo do semiângulo de trefilação pode ocasionar deformação superficial indesejada no material, enquanto haverá pouca deformação na região central do produto. Por esse motivo, o semiângulo é um parâmetro de extrema importância para o processo de trefilação, sendo considerado por muitos autores o mais importante deles (DIETER, 1982).

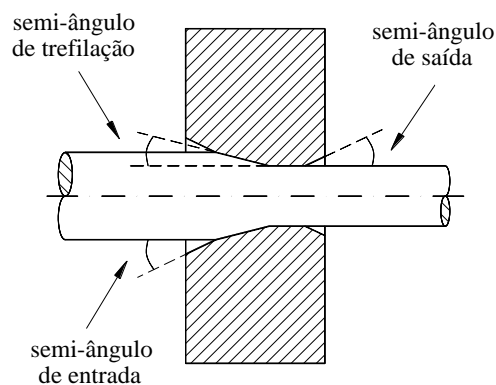
A zona cilíndrica, por sua vez, proporciona o acabamento superficial do material, sendo a zona responsável por assegurar a geometria e as dimensões do produto trefilado. Por último, na zona de saída da fieira ocorre a saída do produto trefilado, de forma livre, a fim de que não ocorram danos em sua superfície e tampouco na superfície da matriz, é nesse estágio que pode ser observada certa recuperação elástica do material. A Figura 3.5 traz a representação da fieira de trefilação, porém nesse momento com a representação dos aspectos geométricos relevantes ao processo, semiângulos de trefilação, de entrada e de saída (CORRÊA, 2004).

Figura 3.4 – Regiões da fieira



Fonte: CORRÊA, 2004.

Figura 3.5 – Ângulos da fieira de trefilação



Fonte: CORRÊA, 2004.

A redução da área (r), objetivo principal do processo de trefilação, juntamente ao semiângulo de trefilação, é um dos fatores mais importantes de todo o processo, sendo o responsável por conferir as dimensões do produto, além de afetar diretamente a deformação e também as propriedades mecânicas finais do produto trefilado. O cálculo da redução de área na trefilação de barras pode ser realizado em função das áreas inicial e final (A_i e A_f , respectivamente), ou ainda em função do diâmetro inicial e final (d_i e d_f), conforme apresentado na Equação 3.1 (CORRÊA, 2004; DIETER, 1982).

$$r = \frac{A_i - A_f}{A_i} \text{ ou } r = 1 - \frac{d_f^2}{d_i^2} \quad (3.1)$$

Como destacado anteriormente, o semiângulo da fieira α influencia diretamente nas características da operação e nas propriedades mecânicas finais do produto trefilado, assim como a redução de área. Esses parâmetros podem ser associados então pelo parâmetro geométrico Δ , utilizado para estudos quanto às características da deformação na operação, e calculado segundo a Equação 3.2 (CADDELL; ATKINS, 1968).

$$\Delta = \frac{d_i + d_f}{d_i - d_f} \text{ sen } \alpha \quad (3.2)$$

É possível ainda encontrar em outras literaturas a relação entre os aspectos geométricos α e r , associados através do parâmetro Δ , representando assim a razão entre o comprimento do arco circular e o comprimento de contato entre material e fieira, conforme a equação 3.3 (ASM, 1998; CADDELL; ATKINS, 1968; CORRÊA, 2004).

$$\Delta = \frac{d_i + d_f}{d_i - d_f} \alpha \text{ ou } \Delta = \frac{\alpha}{r} (1 + (1 - r)^{1/2})^2 \quad (3.3)$$

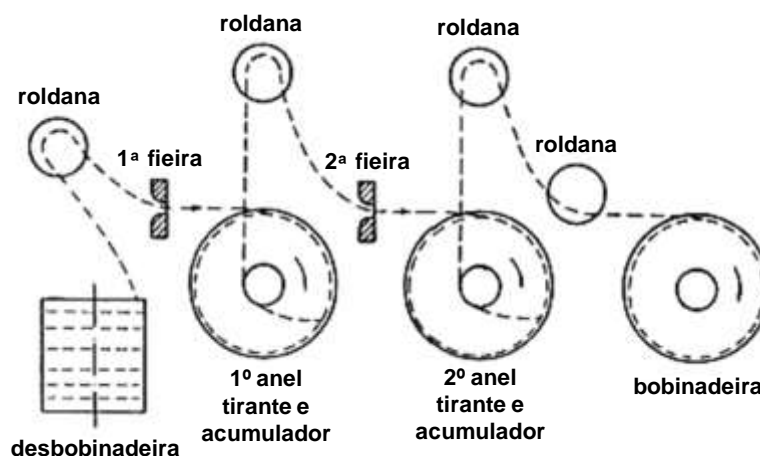
Ambas as definições de Δ , representadas nas Equações 3.2 e 3.3, levam a resultados próximos, uma vez que são em parte similares. Ao analisar a equação 3.3, é possível perceber que para valores elevados de Δ tem-se baixas reduções de área r , e elevados semiângulos de trefilação, sendo o oposto também verdadeiro (menores Δ ; maior r ; menor α) (ASM, 1998; CORRÊA, 2004).

3.1.4 Máquinas de Trefilação

As máquinas de trefilar podem ser classificadas de diversas maneiras, dentre elas de acordo com o modo como o esforço de trefilação é exercido, classificando-as em máquinas com deslizamento e máquinas sem deslizamento. As máquinas de trefilar sem deslizamento possuem um sistema responsável pela tração do fio, formado por um anel tirante responsável

pelo acúmulo de material trefilado, para em seguida permitir a movimentação desse material para a próxima fieira, sendo bastante similar para as fieiras subsequentes. A representação esquemática de uma máquina de trefilar sem deslizamento é apresentada na Figura 3.6. Durante o processo tem-se o aumento do comprimento do fio como consequência da passagem do mesmo pelas fieiras. Desse modo, as velocidades dos anéis tirantes tem de ser diferentes e com valores crescentes, a fim de certificar a continuidade do processo e evitar a soltura ou congestionamento do fio (BRESCIANI et al., 2011; KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

Figura 3.6 – Máquina de trefilar sem deslizamento



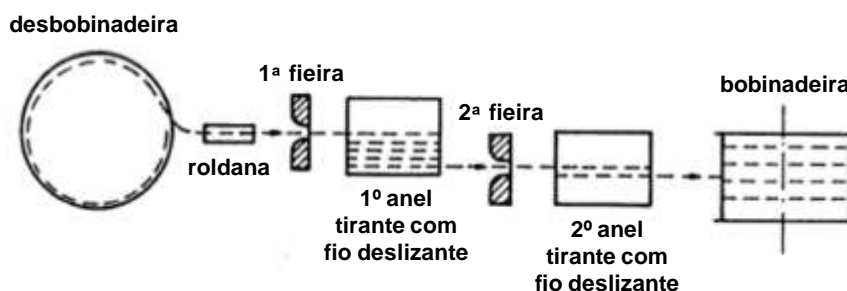
Fonte: BRESCIANI et al., 2011.

Por outro lado, nas máquinas de trefilar com deslizamento (Figura 3.7), o processo tem seu início com a saída do fio da desbobinadeira, passando por uma roldana e seguindo então em direção à primeira fieira. Após a saída da fieira, o fio é tracionado por um anel tirante que rearranja o fio em formato helicoidal no seu envolto, de modo que o fio esteja alinhado com a próxima fieira, seguindo dessa maneira para as demais fieiras e anéis tirantes, até o fim do processo. Esse tipo de máquina de trefilar é usualmente utilizado quando deseja-se trefilar materiais com diâmetros reduzidos, e deve-se atentar também para o controle de velocidade (variável por camadas) e ainda para a colocação do fio (BRESCIANI et al., 2011; KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

As máquinas de trefilar podem ser classificadas também pelo sistema de lubrificação que adotam durante o processo, podendo ser separadas como máquinas com sistema de imersão e máquinas com sistema de aspensão. A primeira, diz respeito a um sistema onde se

tem a imersão da fieira e dos anéis tirantes no líquido lubrificante e refrigerante, enquanto nas máquinas com sistema de aspersão, há o jateamento do lubrificante sobre a fieira (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

Figura 3.7 – Máquina de trefilar com deslizamento



Fonte: BRESCIANI et al., 2011.

Há ainda a classificação das máquinas de trefilação de acordo com o diâmetro do produto trefilado, divididas em:

- Máquinas para barras redondas: equipamento grande que permite redução de seção superior à 70%, utilizadas para barras redondas com diâmetro maior que 5mm;
- Máquinas para fios grossos: velocidades de trabalho maiores do que as empregadas em máquinas para barras redondas, e podem ter forno de recozimento contínuo acoplado, utilizado para diâmetros entre 2,0-5,0mm;
- Máquinas para fios médios: diâmetros entre 0,5-2,0mm
- Máquinas para fios finos: são sempre máquinas de trefilar com deslizamento, utilizada para diâmetros entre 0,15-0,50mm;
- Máquinas para fios capilares: fios com diâmetro inferior à 0,15mm, possuem sistema de lubrificação que atende as necessidades de pequena redução e atrito entre matriz e fio. O desgaste dos anéis nesse tipo de máquina é maior, por causa do fio capilar que está sendo trefilado, por isso comumente utiliza-se revestimento cerâmico no anel (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013; BRESCIANI, et al., 2011).

Considerando as diversas demandas do mercado, em instalações fabris para trefilação podem ainda ser destacados outros elementos e equipamentos auxiliares dependentes do produto a ser processado, suas dimensões, propriedades do fio trefilado e também do material

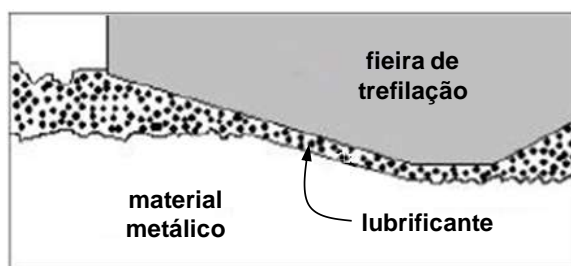
utilizado no processo, tais como: máquinas de soldagem topo-a-topo, máquinas de afinar a ponta do fio, máquinas de alimentação contínua, dentre outros (BRESCIANI et al., 2011).

3.1.5 Lubrificação

Surge no processo de trefilação um dos fenômenos mais importantes e críticos para o processo como um todo, o atrito. Esse fenômeno é capaz de prejudicar a qualidade superficial do arame trefilado durante a conformação, uma vez que o atrito existente entre o material metálico e a fiação é demasiado elevado (BYON et al., 2010). Presente em todos os processos de conformação de materiais metálicos, o atrito é normalmente considerado danoso. Alguns aspectos são diretamente dependentes do atrito, tais como a qualidade superficial do produto, a elevação da temperatura do material durante o processo (podendo atingir níveis que comprometam suas características mecânicas), aumento no desgaste da fiação, alteração dos estados de tensão responsáveis pela deformação, além de tensões residuais na estrutura e aumento do consumo energético do processo, que quando demasiada na trefilação, pode levar à ocorrência de tração durante o processo (CETLIN; HELMAN, 2005; PALMEIRA, 2005).

A fim de evitar a ocorrência de defeitos provenientes do atrito, tais como o desgaste da matriz e do arame, é usual a utilização de materiais com baixa resistência ao cisalhamento, denominados lubrificantes (CETLIN; HELMAN, 2005). Os lubrificantes devem separar as superfícies de atrito através da formação de uma película contínua entre as superfícies de contato, que possua forte aderência às regiões (Figura 3.8). Esses materiais não podem desintegrar-se ou separar em camadas durante o processo, devem ainda reduzir o desgaste do canal de trefilação, além de apresentar baixo custo quando comparado ao processo como um todo (TRUKHANOVICH; LEDNEVA, 2009). Além de evitar os danos citados no texto, tem-se ainda, devido ao aumento de temperatura proveniente do calor gerado pelo atrito das superfícies, a função refrigerante dos lubrificantes, que são capazes de controlar o calor gerado no processo (BRESCIANI et al., 2011).

Figura 3.8 – Representação película lubrificante



Fonte: Adaptado de BRUSIUS JÚNIOR, 2009.

Alguns autores definem os lubrificantes como substâncias (fluidas ou sólidas), que são colocadas entre superfícies com o intuito de reduzir o desgaste e o atrito entre elas, através do impedimento do contato direto entre as partes envolvidas (fieira e material). Devido à grande quantidade de variáveis do processo, a escolha do lubrificante mais adequado para cada aplicação é de grande complexidade para qualquer processo de conformação mecânica. Assim, para que a escolha seja assertiva e eficiente, deve-se considerar principalmente o tipo de material a ser trefilado, a ferramenta e também a velocidade e temperatura de conformação, assegurando a formação da película lubrificante que reduzirá o atrito e promoverá a refrigeração do produto trefilado (BRUSIUS JÚNIOR, 2009; PALMEIRA, 2005).

A lubrificação de um sistema é considerada efetiva e eficiente especialmente em função da espessura da camada de lubrificante que é formada entre o arame e a fieira. Desse modo, reafirma-se a importância do controle dos parâmetros como velocidade e temperatura do processo, através dos quais é possível determinar a viscosidade do lubrificante e conseqüentemente, a rugosidade superficial do material trefilado e ainda o arraste do lubrificante durante o processo (PALMEIRA, 2005).

Os lubrificantes podem ser classificados de acordo com o seu estado físico, ou seja, lubrificantes líquidos ou sólidos. Os lubrificantes líquidos são utilizados, em geral, para trefilação de arames finos a altas velocidades, podem ter origem animal ou vegetal, e são amplamente utilizados quando esses produtos estão recobertos com camadas de zinco, cobre e bronze. São utilizados quando há necessidade de baixa geração de resíduo de lubrificante na superfície trefilada. Por outro lado, os lubrificantes sólidos são à base de talco, sabões, cal, grafite, mica, entre outros. Além da classificação apresentada para os lubrificantes, pode-se ainda classificar os tipos de lubrificação, sendo os existentes:

- Lubrificação limite, onde a quantidade de lubrificante inserido no processo, na região de cone de trabalho é mínima, caracterizada ainda pela aplicação de baixas velocidades;
- Lubrificação mista, preenchimento dos vales do material com uma quantidade maior de lubrificante inserido na região cone de trabalho, velocidades relativamente elevadas;
- Lubrificação hidrodinâmica: formação da camada contínua entre as superfícies, separando-as completamente (BRUSIUS JÚNIOR, 2009);

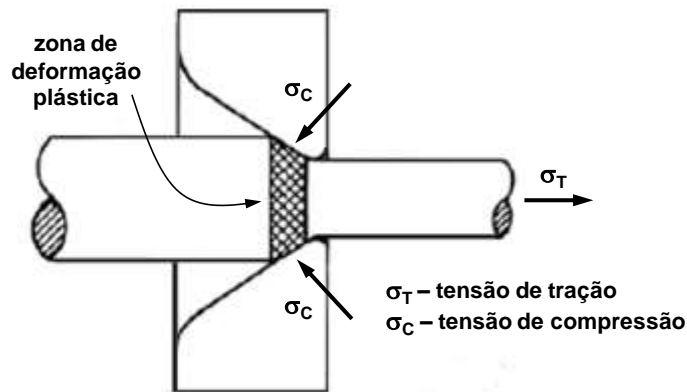
A redução no coeficiente de atrito é explicada pelo aumento da separação das superfícies da fiação e do material, enquanto o aumento do mesmo, ao atingir o regime hidrodinâmico, faz referência à quantidade de lubrificação existente entre as superfícies (BRUSIUS JÚNIOR, 2009). Nesse contexto, considerando todas as variáveis do processo de trefilação, e também a possibilidade do surgimento de imperfeições na peça, conforme citado anteriormente, sabe-se que a estratégia de lubrificação deve ser definida durante a concepção do produto, em projeto. Deve-se levar em consideração principalmente a geometria final especificada para o produto, os materiais envolvidos no processo, e também as tensões provenientes da operação de conformação, a fim de assegurar a regularidade do processo e a obtenção do produto trefilado final com as características desejadas (DUBOIS et al., 2001).

3.2 A Deformação e a Tensão na Trefilação

3.2.1 Aspectos gerais da deformação plástica no processo de trefilação

A partir dos esforços trativos presentes do processo de trefilação tem-se a deformação plástica do material, esses esforços são responsáveis por movimentar o material na direção axial, além também dos esforços compressivos empregados pelas paredes da fiação sobre o material, ocasionando numa deformação também na direção radial. Pode-se dizer ainda que o escoamento, em sua maioria, é causado pelos esforços de compressão advindos da reação entre matriz e metal (DIETER, 1982). A figura 3.9 representa os esforços aos quais está submetido o material durante a trefilação, resultando no escoamento decorrente das tensões compressivas (σ_C) e trativas (σ_T) (BRESCIANI et al., 2011).

Figura 3.9 – Esforços presentes na trefilação



Fonte: Adaptado de BRESCIANI et al., 2011.

Estudar a deformação no processo de trefilação é de suma importância, uma vez que ela afeta diretamente a eficiência da operação, já que influencia nas tensões envolvidas e também nas propriedades do material trefilado. A deformação existente no processo de trefilação pode ser decomposta em deformação homogênea e deformação redundante, que quando em conjunto formam a deformação média do processo (CETLIN; HELMAN, 2005).

Na deformação homogênea, verificam-se somente as alterações dimensionais do material durante o processo de trefilação, considerando as modificações observadas pela área da seção transversal inicial e final. Essa deformação desconsidera fatores externos ao processo, sem compreender os efeitos do atrito, do semiângulo de trefilação, ou sequer a forma como o material sofre deformação no interior da matriz (CETLIN; HELMAN, 2005; CORRÊA, 2004). Calcula-se a deformação homogênea através das equações 3.4 e 3.5, apresentadas a seguir:

$$\varepsilon = \ln \frac{A_i}{A_f} \quad (3.4)$$

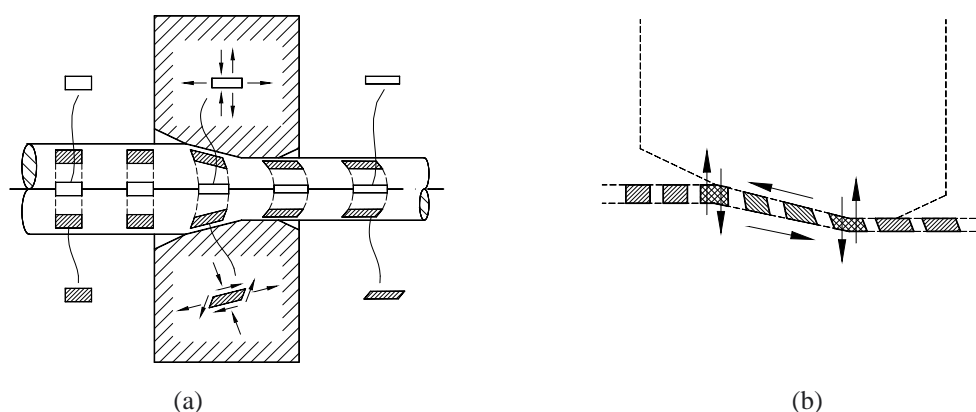
$$\varepsilon = \ln \left(\frac{1}{1-r} \right) \quad (3.5)$$

Sendo, ε a deformação homogênea, A_i a área inicial da seção transversal do material e A_f a área final da seção transversal do material (CORRÊA, 2004).

Quanto à outra parcela da deformação, a deformação redundante (Figura 3.10), tem-se a atuação de forças cisalhantes no interior do material metálico, tanto na entrada quanto na saída da fieira, que diminuem em direção ao centro do produto, e que não contribuem para as alterações dimensionais da barra trefilada. Isso se deve porque na região superficial do

produto, ao ser direcionado à feira, tem-se uma velocidade inicial com componente perpendicular ao eixo da peça. Componente esta que, ao analisar, ao centro da barra, segue seu movimento paralelo ao eixo de trefilação (CETLIN; HELMAN, 2005; CORRÊA, 2004). Como resultado da deformação redundante tem-se em termos de deformação média, o desenvolvimento de perfis heterogêneos de deformação em toda a seção transversal do material, de acordo principalmente com a combinação de semiângulo e redução de área. A relação entre deformação redundante e semiângulo de trefilação é estabelecida que, em geral, quanto maior for o semiângulo, mais alta será a grandeza da deformação redundante, considerando uma mesma redução de área (CETLIN; HELMAN, 2005; CORRÊA, 2004; LIN; HSU; KEH, 2008).

Figura 3.10 – Representação da deformação redundante



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

Fonte: CORRÊA, 2004.

Para o encruamento, percebe-se que um semiângulo de feira maior resulta em um produto final com limite de escoamento também maior, quando comparado com um material que sofreu a mesma quantidade de deformação homogênea. Considerando, por comparação, materiais trefilados e tracionados, sabe-se que o efeito da deformação redundante em barras trefiladas leva a uma maior dureza do que em barras tracionadas. Além disso, devido à distribuição de deformação na seção transversal do produto trefilado ser não uniforme, percebe-se ainda uma distribuição heterogênea das propriedades mecânicas dos produtos (SADOK; LUKSZA; MAJTA, 1994; KAZEMINEZHAD, 2008).

Pela união da deformação redundante, advinda do processo de cisalhamento interno do material, à deformação homogênea, referente à alteração dimensional da barra, tem-se a

deformação média na trefilação. Essa deformação média e a deformação homogênea se relacionam segundo o coeficiente de deformação redundante, apresentado na equação 3.6:

$$\varepsilon_m = \phi \varepsilon \quad (3.6)$$

Onde ε_m é a deformação média, ϕ é o coeficiente de deformação redundante e ε é a deformação homogênea (ou externa) na trefilação (KAZEMINEZHAD, 2008).

3.2.2 Influência da Temperatura e da Velocidade de Deformação nos Processos de Conformação Mecânica

A temperatura de trabalho para a conformação de metais varia dependendo do metal e da liga aplicada no processamento, do tipo de processamento e da resposta que se espera do material durante e após a operação (CETLIN; HELMAN, 2005). Os processos de conformação mecânica podem ser divididos em processos com trabalho mecânico a frio (temperatura de trabalho menor que a temperatura de recristalização do metal) ou processos com trabalho mecânico a quente (temperatura de trabalho maior que a temperatura de recristalização do metal) (BRESCIANI et al., 2011). Importante salientar que a recristalização é o processo onde ocorre a formação de novos grãos em detrimento da estrutura inicial, compreendendo processos de nucleação e, posteriormente, dá lugar ao crescimento de grão (REED-HILL, 1982).

Alguns autores, porém, classificam os processos de conformação mecânica em função da temperatura de fusão, considerando:

- Trabalho a frio: deformação conduzida em temperatura 0,3 vezes menor que a temperatura de fusão da liga;
- Trabalho a morno: temperaturas entre 0,3 e 0,6 vezes a temperatura de fusão da liga;
- Trabalho a quente: processo com temperaturas iguais a 0,6 vezes ou mais, da temperatura de fusão da liga (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013);

A partir disso, pode-se classificar o processo de trefilação como uma operação de conformação mecânica a frio, uma vez que a temperatura de trabalho do processo não chega a atingir a temperatura de recristalização do metal. Como resultado disso, tem-se então a ocorrência de encruamento, levando a alterações nas propriedades do material, como

resistência mecânica e ductilidade (facilmente contornadas, quando necessário, através de tratamento térmico de recozimento) (CETLIN; HELMAN, 2005).

No que tange à velocidade, sabe-se que ao deformar um material metálico, parte da energia que é cedida ao sistema é transformada em calor. Desse modo, quanto maior for a velocidade com que a deformação é aplicada sobre o produto, maior será a temperatura do material trefilado ao fim do processo, uma vez que haverá menos tempo para que a dissipação do calor ocorra. Essa velocidade influencia diretamente na tensão que é necessária para que a deformação do metal ocorra, podendo ser expressa através da equação 3.7:

$$Y = Y_0(V_\varepsilon)^m \quad (3.7)$$

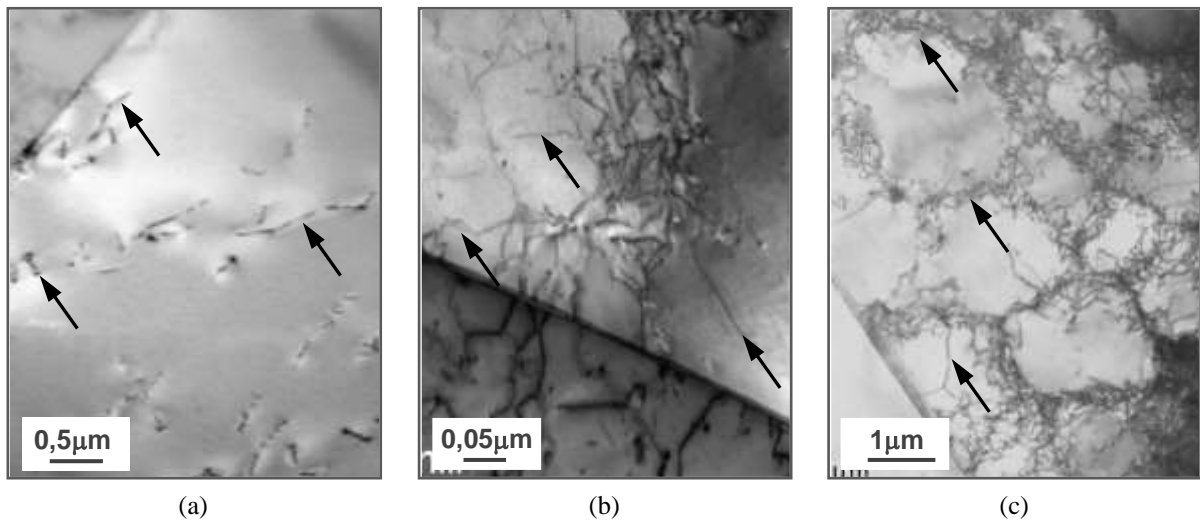
Sendo, Y a tensão de escoamento do material, V_ε a velocidade de deformação, Y_0 e m constantes.

3.3 Encruamento e Análise do Encruamento

3.3.1 Aspectos Gerais do Encruamento dos Materiais Metálicos

A origem do fenômeno de encruamento nos metais está relacionada ao principal mecanismo de deformação plástica desses materiais: a movimentação de discordâncias por deslizamento de planos atômicos. A discordância é uma imperfeição bidimensional na estrutura cristalina que pode ser definida como uma região de distúrbio localizado na rede, separando regiões deslizadas e não deslizadas do cristal, existente em qualquer condição (com e sem algum tipo de processamento) no material metálico (DIETER, 1982). Na Figura 3.11 são exibidas imagens obtidas por microscopia eletrônica de transmissão de discordâncias presentes em três materiais metálicos: aço inoxidável AISI 316L, liga de cobre e alumínio, exemplificadas por setas (WANG et al., 2017; WU et al., 2014; EL-MADHOUN; MOHAMED; BASSIM, 2003).

Figura 3.11 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica de transmissão de amostras de aço inoxidável AISI 304L, de uma liga de cobre e de alumínio nas quais podem ser observadas discordâncias

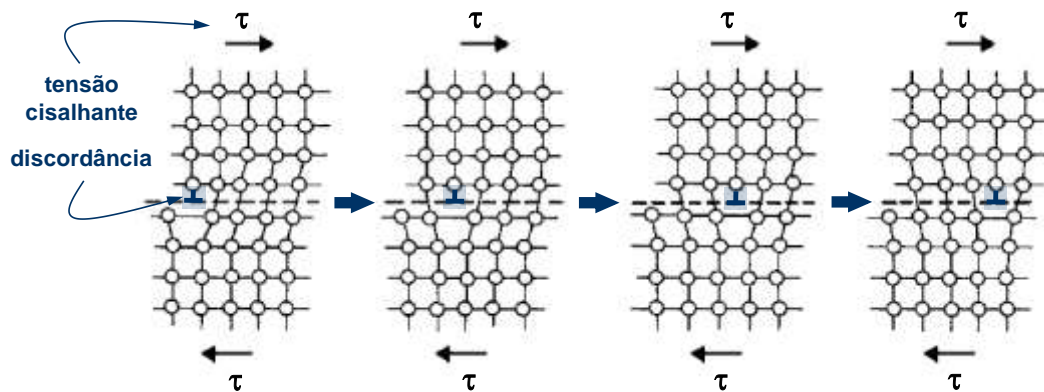


(a) aço inoxidável AISI 304L, (b) liga de cobre e (c) alumínio.

Fonte: Adaptado de WANG et al., 2017; WU et al., 2014; EL-MADHOUN; MOHAMED; BASSIM, 2003.

Ao se movimentar, a discordância permite que o deslizamento ocorra sobre a área na qual este movimento se realiza. Com a ausência de impedimentos, uma discordância pode movimentar-se facilmente sobre a aplicação de forças relativamente reduzidas, justificando a facilidade com que os cristais reais se deformam quando em comparação com o comportamento esperado para cristais perfeitos, ou seja, sem discordâncias e outras imperfeições na estrutura. Uma representação esquemática da movimentação de uma discordância aresta por meio do mecanismo de deslizamento de planos atômicos na estrutura mediante a aplicação de tensão cisalhante é mostrada na Figura 3.12 (MEYERS; CHAWLA, 2009). Além da importância para o deslizamento dos cristais, pode-se ainda destacar a relevância das discordâncias para outros fenômenos mecânicos nos materiais metálicos, como encruamento, escoamento descontínuo e fadiga (DIETER, 1982; REED-HILL, 1982).

Figura 3.12 – Representação da movimentação de uma discordância aresta por deslizamento de planos atômicos mediante a aplicação de tensão cisalhante

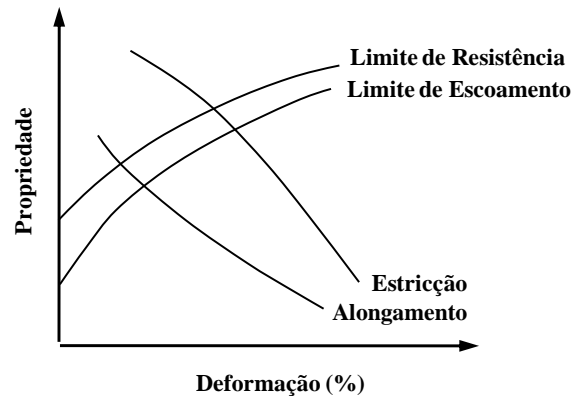


Fonte: Adaptado de MEYERS; CHAWLA, 2009.

Nesse contexto, o encruamento, efeito proveniente do trabalho mecânico a frio, pode ser definido como uma elevação contínua da tensão cisalhante com a ocorrência da deformação plástica, decorrente da menor capacidade de movimentação das discordâncias presentes na rede cristalina do metal, que interagem entre si e também com outras barreiras microestruturais (partículas precipitadas ou átomos de soluto, como exemplo) durante a sua movimentação (BRESCIANI et al., 2011; DIETER, 1982). Além de ser uma consequência do processamento dos metais, é um dos métodos mais utilizados para obtenção de maior dureza ou resistência mecânica desses materiais. Um metal possui a capacidade de sofrer deformação através do trabalho mecânico a frio, porém tal capacidade possui como limitante a ocorrência de fratura. Desse modo, a fim de contornar a fratura e alcançar maiores níveis de deformação plástica no trabalho mecânico à frio, utiliza-se de ciclos de deformações aliados a tratamentos térmicos, que envolvem o fenômeno de recristalização, devolvendo o material a condições similares às iniciais, levando a um decréscimo de dureza e elevação de ductilidade (CETLIN; HELMAN, 2005; MEYERS; CHAWLA, 1982).

Em adição à observação usual da ocorrência de encruamento em processos de conformação mecânica a frio comerciais, pode-se verificar o fenômeno por meio de ensaios mecânicos como, por exemplo, o ensaio de tração. Na Figura 3.13 é mostrada uma representação esquemática do efeito do encruamento nas propriedades mecânicas resistência mecânica (limites de escoamento e de resistência) e ductilidade (alongamento e estricção) (BRESCIANI et al., 2011).

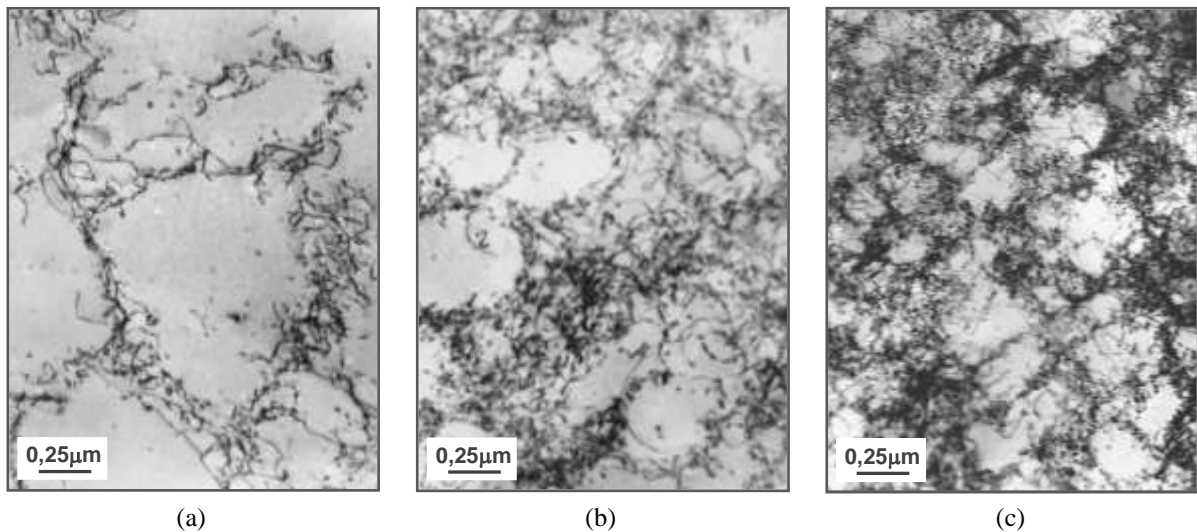
Figura 3.13 – Propriedades mecânicas com o aumento da deformação plástica



Fonte: BRESCIANI et al., 2011.

A diminuição na mobilidade das discordâncias como consequência da interação entre elas e com outras imperfeições cristalinas está relacionada ao fato de que com a deformação plástica, a densidade desses defeitos bidimensionais é elevada. Segundo Dieter (1982), os materiais metálicos em geral exibem cerca de 10^6 a 10^8 discordâncias/cm² no estado não deformado e 10^{12} discordâncias/cm² após deformação plástica. De acordo com Meyers; Chawla (2009), a densidade de discordâncias é elevada de aproximadamente 10^7 discordâncias/cm² para 10^{10} discordâncias/cm² ou mais com a deformação plástica a frio. Mesmo que os valores variem de acordo com a bibliografia e, até mesmo, com a técnica empregada para determinar os dados, nota-se que a quantidade de discordâncias aumenta com o processamento. Na Figura 3.14 são mostradas imagens obtidas por microscopia eletrônica de transmissão (MET) como exemplo de situação na qual um material metálico tem sua densidade de discordâncias elevada com a ocorrência de deformação plástica. Nesse caso pode-se observar, além do aumento da quantidade de discordâncias, a formação de emaranhados e estrutura celular em amostras de alumínio submetidas à deformação de 5%, 30% e 50% (ZLATEVA; MARTINOVA, 2008).

Figura 3.14 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica de transmissão de amostras de alumínio deformadas plasticamente a frio em diferentes magnitudes



(a) deformação = 5%, (b) deformação = 30% e (c) deformação = 50%.

Fonte: Adaptado de ZLATEVA; MARTINOVA, 2008.

Dentre os vários fatores capazes de influenciar o encruamento podem ser destacados a composição química do metal, a orientação cristalográfica, a estrutura cristalina e a temperatura na qual o processo de deformação é realizado, dentre outros (BRESCIANI et al., 2011). Outro fator capaz de influenciar no deslizamento das discordâncias é o tamanho de grão, uma vez que tais deslizamentos atuam nas fronteiras dos contornos de grão, e consequentemente a dureza será maior nessa região quando comparada ao interior do grão. Assim, em grãos menores, maior será o efeito do deslizamento dentro dele, justificando assim o maior encruamento quando comparados a grãos maiores (DIETER, 1982).

3.3.2 Métodos Usuais de Análise do Encruamento dos Materiais Metálicos

Grande parte das abordagens empregadas para a análise do encruamento dos materiais metálicos envolve o uso de curvas tensão – deformação reais, elaboradas a partir de dados obtidos em ensaios mecânicos, como compressão, cisalhamento e, principalmente, tração.

Nesse contexto, um dos métodos mais comumente empregados no estudo do encruamento dos metais é conduzido por meio da avaliação do chamado expoente de encruamento. Trata-se de um dos componentes da relação potencial simples utilizada para descrever a curva de escoamento do material na região de deformação plástica uniforme, muitas vezes chamada de Equação de Hollomon (DIETER, 1982), conforme equação 3.8:

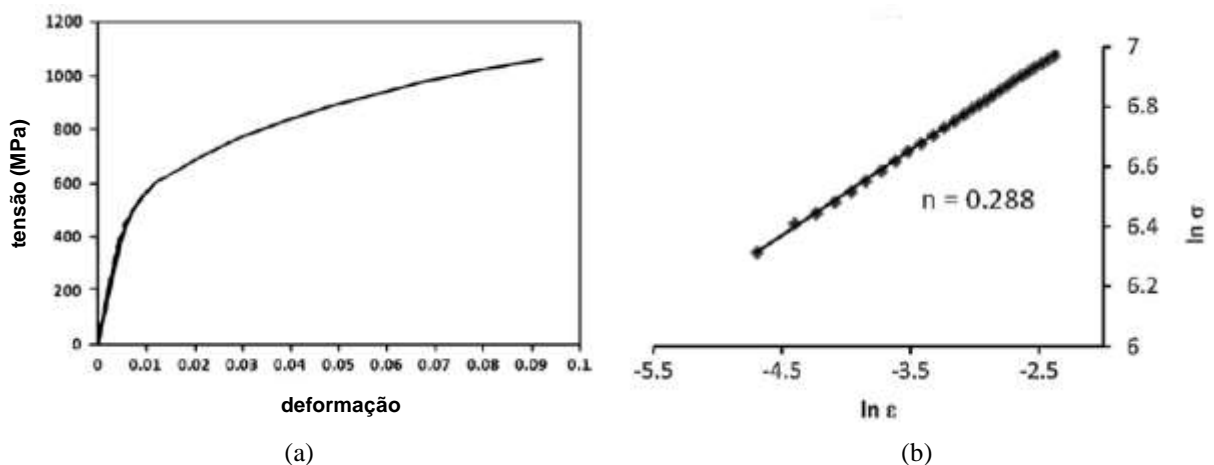
$$\sigma = k\varepsilon^n \quad (3.8)$$

Onde σ é a tensão real, ε é a deformação real, k é o coeficiente de resistência e n é o expoente de encruamento.

A determinação dos parâmetros k e n da relação mencionada é realizada por meio da linearização da curva tensão – deformação real (gráfico duplo logarítmico), considerando os dados até a carga máxima do ensaio. O resultado da operação, caso o modelo de equação em questão seja capaz de descrever o comportamento mecânico do material metálico, é uma linha reta. A inclinação dessa reta é o expoente de encruamento n e o valor de k equivale à tensão verdadeira quando a deformação ε for = 1,0.

Na Figura 3.15 são apresentados como exemplos resultados associados à técnica descrita para um aço *dual phase DP* obtido a partir de aquecimento intercrítico a 820°C com encharque de 20 minutos e resfriamento brusco em água, tratamento que levou a uma microestrutura composta de cerca de 47% de martensita e 53% de ferrita (MOVAHED et al., 2009). Nota-se na Figura 3.15 a curva tensão – deformação real (até o início da estrição / carga máxima), os dados linearizados a partir dessa curva (log tensão – log deformação) e o resultado do expoente de encruamento n , determinado pela inclinação da reta - valor de n calculado igual a 0,288.

Figura 3.15 – Exemplo de determinação do expoente de encruamento n da Equação de Hollomon por meio da linearização da curva tensão - deformação real – aço *dual phase* com microestrutura composta de cerca de 47% de martensita e 53% de ferrita



(a) curva tensão – deformação real e (b) linearização da curva tensão – deformação real com valor de n

Fonte: Adaptado de MOVAHED et al., 2009.

O valor de k fornece, de maneira geral, uma indicação do nível de resistência mecânica do material. O valor de n , por outro lado, mede a capacidade de encruamento, ou seja, quanto maior for o expoente de encruamento, mais íngreme será a curva tensão – deformação real (SOUZA, 1982), significando que para um determinado intervalo “reduzido” de deformação, a alteração no nível de tensão seria “considerável”. De maneira geral, os metais apresentam valor de n entre 0,10 e 0,50 (DIETER, 1982). Na Tabela 3.1 são mostrados valores de expoente de encruamento n e coeficiente de resistência k para materiais metálicos diversos (SOUZA, 1982).

Tabela 3.1 – Exemplos de valores de coeficiente de resistência e expoente de encruamento para materiais metálicos diversos – temperatura ambiente

Material	Coefficiente de resistência k (kgf/mm ²)	Expoente de encruamento n
aço carbono 0,05%C recozido	53,9	0,261
aço SAE 4130 recozido	118,6	0,118
aço SAE 4130 recozido e laminado	108,1	0,118
aço SAE 4340 recozido	65,1	0,150
aço inoxidável AISI 430	100,1	0,229
cobre	32,5	0,540
latão 70/30	91,0	0,490
alumínio 24 S	39,1	0,211

Fonte: Adaptado de SOUZA, 1982.

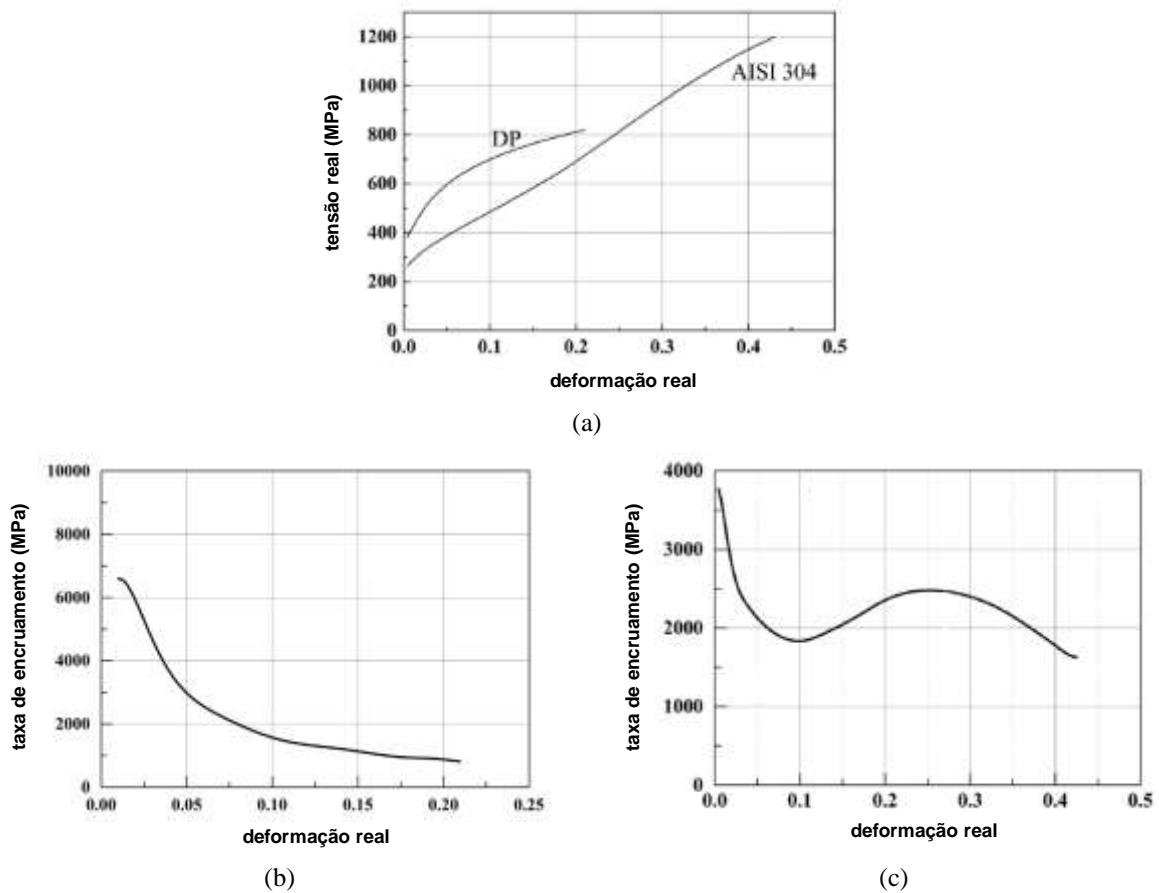
Um segundo método empregado para análise do encruamento dos materiais a partir dos resultados de curvas tensão – deformação reais é por meio da avaliação da taxa de encruamento do material metálico ao longo do ensaio mecânico. A taxa de encruamento demonstra a habilidade que um material tem de encruar, ou seja, de elevar sua resistência mecânica com a realização da deformação, sendo definida de acordo com a equação 3.9.

$$\text{taxa de encruamento} = d\sigma / d\varepsilon \quad (3.9)$$

Na Figura 3.16 são mostrados resultados referentes ao emprego da taxa de encruamento para avaliar o encruamento / comportamento mecânico de dois materiais metálicos, um aço *dual phase* DP e o aço inoxidável AISI 304, na qual podem ser observadas as curvas tensão – deformação reais obtidas em ensaios de tração desses materiais e curvas taxa de encruamento – deformação real para cada situação (SOARES; GONZALEZ; SANTOS, 2017). Nota-se que a partir desse parâmetro pode ser avaliado qual das ligas tem maior capacidade de encruar,

estimar a magnitude desse encruamento, pode-se verificar momentos (níveis de deformação) nos quais o material parece exibir uma mudança de comportamento em relação ao encruamento e, posteriormente, associar os fenômenos observados às características estruturais e mecanismos de deformação.

Figura 3.16 – Exemplo de utilização da taxa de encruamento para avaliar o comportamento mecânico de dois materiais metálicos, um aço *dual phase* DP e o aço inoxidável AISI 304



(a) curvas tensão – deformação reais para os dois aços e curvas taxa de encruamento – deformação real para (b) aço *dual phase* e (c) aço inoxidável AISI 304

Fonte: Adaptado de SOARES; GONZALEZ; SANTOS, 2017.

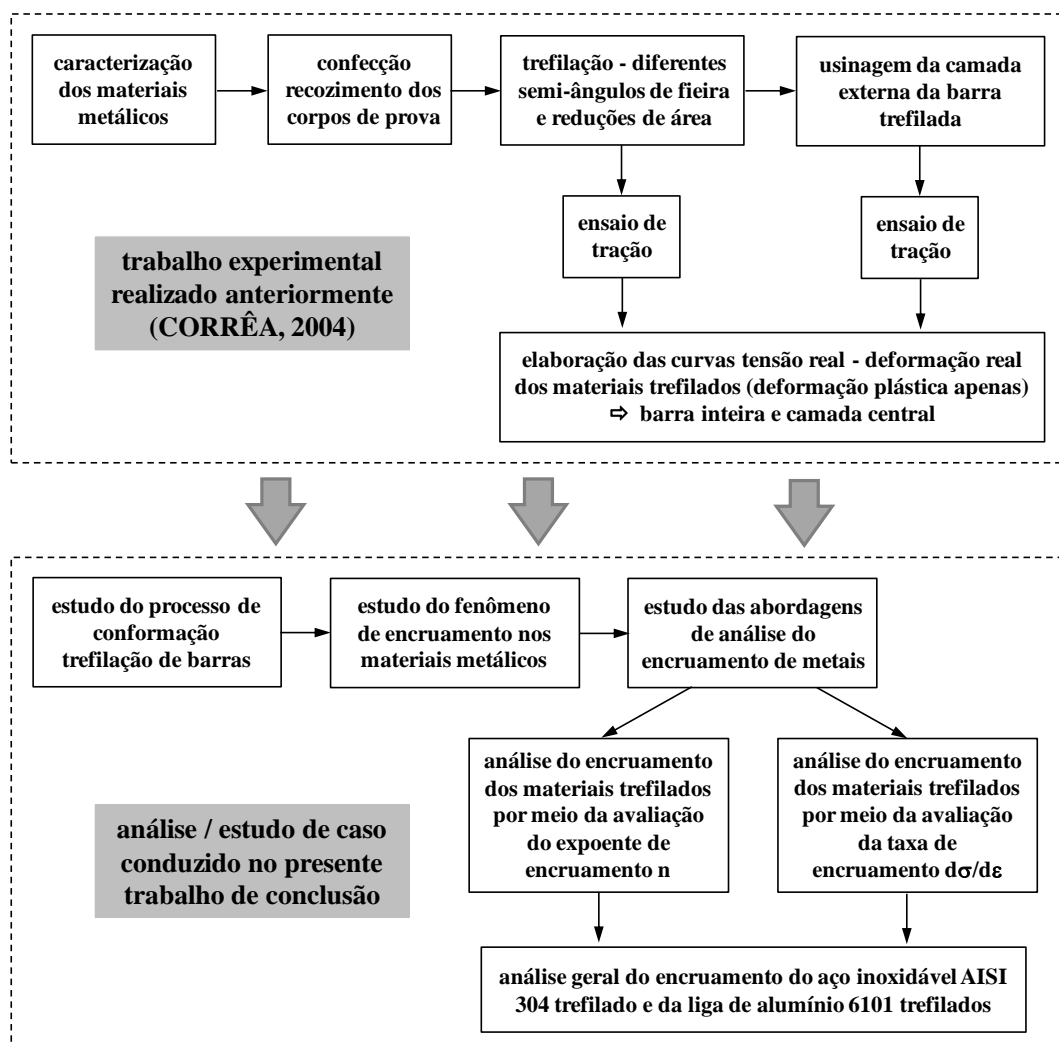
Por fim, ressalta-se que ainda há outras técnicas empregando as curvas tensão – deformação reais obtidas principalmente em ensaios de tração para o estudo do encruamento dos materiais metálicos, como o emprego do expoente de encruamento instantâneo e as análises de Crussard-Jaoul original e modificada. No entanto, esses métodos não serão considerados no presente trabalho.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Descrição Geral do Trabalho Desenvolvido

Neste trabalho, foram analisados os efeitos dos parâmetros de trefilação, da ocorrência da deformação redundante no processo de conformação e das características estruturais do material metálico na capacidade de encruamento de barras de aço inoxidável AISI 304 e da liga de alumínio 6101 durante a deformação por tração subsequente. O procedimento geral da análise é representado na Figura 4.1, na qual podem ser observadas etapas experimentais desenvolvidas anteriormente pela orientadora desse trabalho (CORRÊA, 2004), em sua tese de doutorado, e as etapas realizadas no presente Trabalho de Conclusão de Curso.

Figura 4.1 – Fluxograma das etapas experimentais do trabalho anterior, que deu origem à presente análise, e das etapas deste trabalho



Fonte: Próprio autor.

Esse trabalho especificamente envolveu inicialmente o estudo teórico do processo de trefilação, do encruamento dos materiais metálicos e de algumas abordagens empregadas para analisar esse fenômeno. Em seguida, foi realizada uma avaliação “prática” do encruamento, na verdade da capacidade de encruamento, de duas ligas metálicas previamente trefiladas em um passe, a partir de resultados obtidos em testes de tração: curvas tensão real – deformação real, considerando apenas a região de deformação plástica uniforme.

A análise dos efeitos dos parâmetros de trefilação no encruamento foi realizada considerando resultados referentes a três semi-ângulos de fiação de trefilação e três reduções de área. A avaliação dos efeitos da deformação redundante nos resultados foi conduzida comparando o comportamento das barras trefiladas inteiras com o comportamento dos materiais após a retirada por usinagem das camadas mais externas, restando somente a região central, correspondendo a 30% do núcleo da barra trefilada, possivelmente associada a uma deformação mais homogênea. Por fim, a análise dos efeitos das características estruturais foi realizada por meio da investigação em dois materiais com características estruturais distintas, aço inoxidável AISI 304 e da liga de alumínio 6101.

Na seção a seguir são apresentadas informações obtidas no trabalho anterior (CORRÊA, 2004) fundamentais para a avaliação e compreensão dos resultados. Em seguida, são descritas as duas técnicas empregadas para a avaliação da capacidade de encruamento das barras trefiladas.

4.2 Informações Relativas ao Trabalho Anterior (CORRÊA, 2004)

Devido às eventuais distintas características de encruamento associadas às diferenças estruturais, dois materiais foram selecionados para análise: aço inoxidável AISI 304 e liga de alumínio 6101, com suas composições químicas respectivas (% em peso) mostradas na tabela 4.1 (CORRÊA, 2004).

O aço inoxidável AISI 304 apresenta estrutura cristalina de faces centradas CFC e baixa energia de falha de empilhamento. Dessa forma, considerando o mecanismo de deformação de deslizamento de planos atômicos, espera-se que as discordâncias nesse material tenham mais dificuldade em realizar o chamado deslizamento cruzado. Como consequência, é esperado um encruamento mais acentuado no metal e ainda a ocorrência de transformação martensítica decorrente da deformação plástica (CORRÊA, 2004; LECROISEY et. al.; 1972; MANGONON et al., 1970).

Por outro lado, o alumínio é um dos metais mais leves ($\rho = 2,70\text{g/cm}^3$), que apresenta ductilidade, tenacidade, maleabilidade, além de ser um bom condutor de calor e eletricidade (YOSHIDA, 1974). Assim como o aço inoxidável AISI 304, apresenta estrutura cúbica de faces centradas, porém com alta energia de falha de empilhamento, conferindo maior facilidade de ocorrência de deslizamento cruzado das discordâncias e, conseqüentemente, a princípio, menor capacidade de encruamento (CORRÊA, 2004).

Tabela 4.1 – Composição química

Aço Inoxidável AISI 304	Liga de Alumínio
18,940% Cr	0,373% Mg
9,760% Ni	0,270% Si
1,870% Mn	0,123% Fe
0,323% Si	0,011% Cu
0,067% C	0,032% Mn
0,024% S	0,03% Zn

Fonte: Adaptado de CORRÊA, 2004.

Os parâmetros do processo de trefilação, semi-ângulo de fieira α e redução de área % r , cujos resultados de ensaio de tração posterior foram analisados, são apresentados na Tabela 4.2 (CORRÊA, 2004). Como mencionado no capítulo anterior, esses dois parâmetros geométricos são considerados como os mais importantes da operação, tanto em termos do comportamento do material durante o processo de trefilação como em termos de suas propriedades e comportamento mecânico posterior. A trefilação foi realizada no trabalho anterior em um passe, empregando uma velocidade de 10 mm/min e como lubrificante bissulfeto de molibdênio (CORRÊA, 2004).

Após a trefilação, ensaios de tração foram conduzidos à temperatura ambiente, com uma velocidade de 4 mm/min. A partir dos dados de força e alongamento dos corpos de prova, foram determinadas as curvas tensão convencional – deformação convencional e, em seguida as curvas tensão real – deformação real, empregando expressões que associam esses dados e medições experimentais após o início da estrição. Para o presente trabalho, os dados dessas curvas utilizados foram apenas relacionados à deformação plástica e até o início da estrição. Como comentado, os ensaios de tração foram realizados nas barras trefiladas inteiras (sem usinagem) e nas barras trefiladas correspondendo a apenas 30% da região central (após usinagem).

Tabela 4.2 – Condições de trefilação

Condição de Trefilação	Semi-ângulo (°)	Redução de Área (%)
1	20	8
2	20	15
3	3	8
4	3	15
5	20	3
6	3	3
7	8	3
8	8	8
9	8	15

Fonte: Adaptado de CORRÊA, 2004.

4.3 Análise do Encruamento por Meio do Expoente de Encruamento da Equação de Hollomon

O expoente de encruamento, a variável “n” da Equação de Hollomon (equação 3.8), é considerado um bom indicador para o encruamento do material, uma vez que o seu valor, apesar de não ser diretamente a taxa de encruamento, indica também a habilidade do material endurecer como um todo, ao longo de toda a deformação. Ou seja, quanto maior a taxa de encruamento em geral, maior deverá ser o expoente de encruamento e, assim, maior tende a ser o endurecimento do material à medida que este é deformado plasticamente.

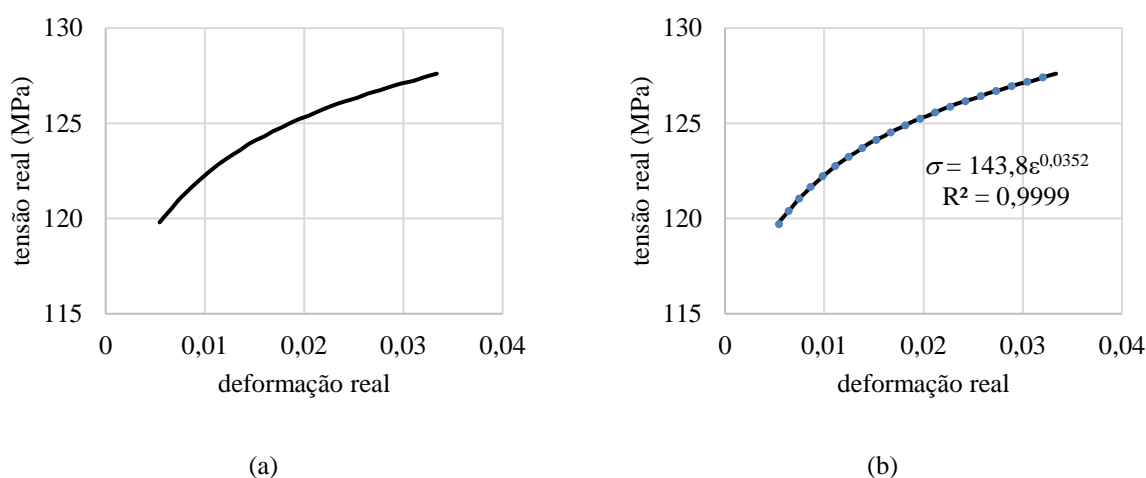
A determinação do expoente de encruamento pode ser realizada de diferentes formas. A primeira delas envolve a linearização da curva tensão-deformação reais, onde considera-se o intervalo entre o início do escoamento plástico e a carga máxima no ensaio de tração. O valor do expoente de encruamento é dado então pelo coeficiente angular da reta obtida a partir de $\log \sigma$ versus $\log \epsilon$.

Outro modo para se quantificar o encruamento do material é pela análise da deformação verdadeira até o início da estricção, deformação uniforme real. Segundo Dieter (1982), ocorre na carga máxima o início da deformação localizada, onde a diminuição da área da seção transversal leva a uma redução da tensão. Essa redução se torna superior ao aumento da capacidade do material de suportar a carga, devido ao encruamento (MAGALHÃES et. al.; 2016; SOUZA, 1982).

No presente trabalho, o expoente de encruamento foi determinado pela linearização da curva tensão real - deformação real, considerando os dados de deformação plástica apenas e até o início da estricção. Nesse caso, além de trabalhar com um único valor de n , para um melhor ajuste dos dados, optou-se fazer a avaliação começando do nível de deformação de 0,005. Como poderá ser observado nos resultados, em geral, para os dois materiais e condições de trefilação prévia avaliadas, ao considerar como dado inicial da curva de escoamento a deformação de cerca de 0,005, o coeficiente de correlação R^2 ficou mais próximo da unidade (o que seria o ideal).

Na Figura 4.2 é mostrado um exemplo do procedimento que foi realizado para a determinação dos valores do expoente de encruamento com essa técnica. A Figura 4.2 traz, para o alumínio 6101 trefilado inteiro com semiângulo de fieira igual a 3° e redução de área de 8%: (a) curva tensão - deformação, (b) linearização da curva e equação de ajuste e coeficiente de correlação (R^2) de acordo com a equação de Hollomon.

Figura 4.2 – Procedimento para determinação do expoente de encruamento



(a) curva tensão – deformação real para o alumínio 6101 trefilado inteiro com semiângulo de fieira (3°) e redução de área (8%) para posterior (b) linearização ajuste pela equação de Hollomon

Fonte: Próprio Autor

4.4 Análise do Encruamento por Meio da Taxa de Encruamento

A análise do encruamento de um material pode ser realizada também através da avaliação da taxa de encruamento do material ao longo do ensaio mecânico, método empregado para análise do encruamento dos materiais a partir dos resultados de curvas tensão – deformação reais. A taxa de encruamento demonstra a habilidade que um material possui de

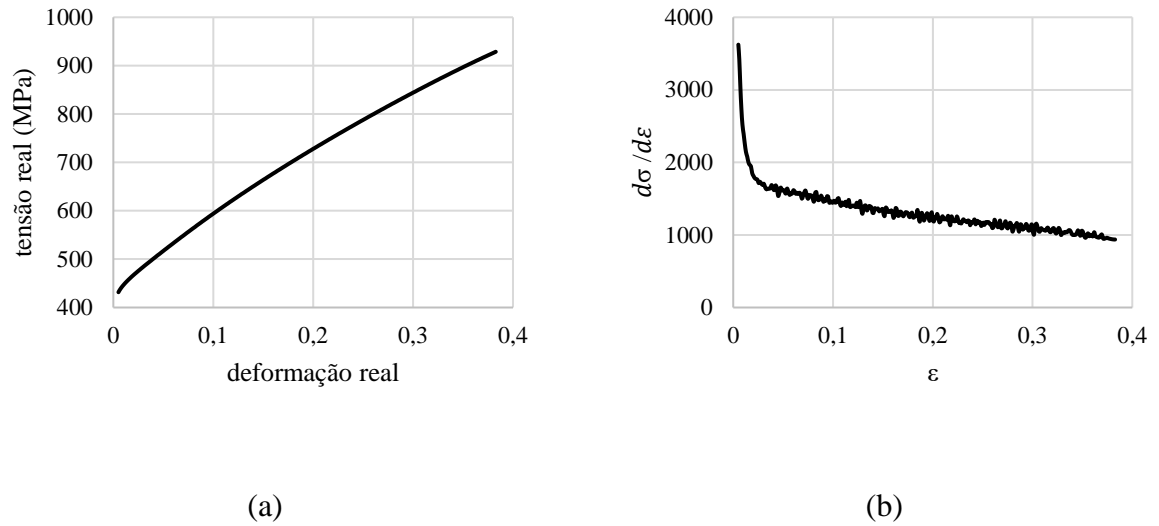
encruar, elevando sua resistência mecânica com a realização da deformação, definida na equação 3.9.

A partir desse parâmetro é possível avaliar a capacidade de encruamento dos materiais analisados, além de estimar a magnitude do fenômeno e, posteriormente, associar os fenômenos observados (mudança de comportamento em relação ao encruamento, por exemplo) às características estruturais do material e também aos mecanismos de deformação utilizados (SOARES; GONZALEZ; SANTOS, 2017). Diferentemente do expoente de encruamento, especialmente quando é considerado um valor apenas, a taxa de encruamento mostra o comportamento quanto à capacidade de elevar a resistência mecânica a todo momento da deformação, possibilitando muitas vezes observar uma mudança acentuada nesse comportamento ao longo do processo.

Para a análise no presente trabalho, a taxa de encruamento foi obtida empregando o software Origin 2021b (licença de estudante), porém sem a utilização do procedimento de suavização (*smoothing*) das curvas, uma vez que as curvas provenientes do estudo estavam demasiado constantes, ou seja, apresentaram baixa oscilação. Esse procedimento de suavização pode ser importante em alguns casos porque os dados são determinados a partir de derivação numérica, o que geraria um comportando “inconstante” nas curvas elaboradas.

A Figura 4.3 traz um exemplo do procedimento realizado para a determinação da taxa de encruamento, através da utilização do software Origin 2021b. A Figura 4.3 traz, para o aço inoxidável AISI 304 trefilado inteiro com semiângulo da feira igual a 20° e redução de área de 3% (a) curva tensão – deformação real, (b) curva taxa de encruamento – deformação.

Figura 4.3 – Exemplo de resultado obtido pelo procedimento de determinação da taxa de encruamento



(a) curva tensão – deformação real para o aço inoxidável AISI 304 trefilado inteiro com semiângulo de fieira (20°) e redução de área (3%) e (b) curva taxa de encruamento por deformação

Fonte: Próprio Autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise do Encruamento por Meio do Expoente de Encruamento da Equação de Hollomon

Na Tabela 5.1 são apresentados os resultados para o aço inoxidável AISI 304 obtidos por meio da análise das curvas tensão-deformação e subsequente linearização para obtenção do expoente de encruamento (n) respectivo a cada uma das condições de trefilação de barras em um único passe. As tabelas trazem para cada condição de processamento, em diferentes semiângulos de fieira (α) e redução de área (r), os resultados obtidos para o expoente de encruamento e o respectivo coeficiente de determinação (R^2), além de apresentar também os resultados encontrados para os materiais trefilados na camada central.

Tabela 5.1 – Expoente de encruamento do aço inoxidável AISI 304 para diferentes condições de trefilação

	α	r	n	R^2
Trefilado inteiro	3	0,03	0,2976	0,9298
		0,08	0,2320	0,9130
		0,15	0,1269	0,8905
	8	0,03	0,2710	0,9362
		0,08	0,1766	0,9098
		0,15	0,1236	0,9058
	20	0,03	0,2263	0,9232
		0,08	0,1014	0,9092
		0,15	0,0604	0,9708
Trefilado Camada Central	3	0,08	0,2491	0,9246
		0,15	0,1670	0,9096
	20	0,08	0,2074	0,9256
		0,15	0,1466	0,9221

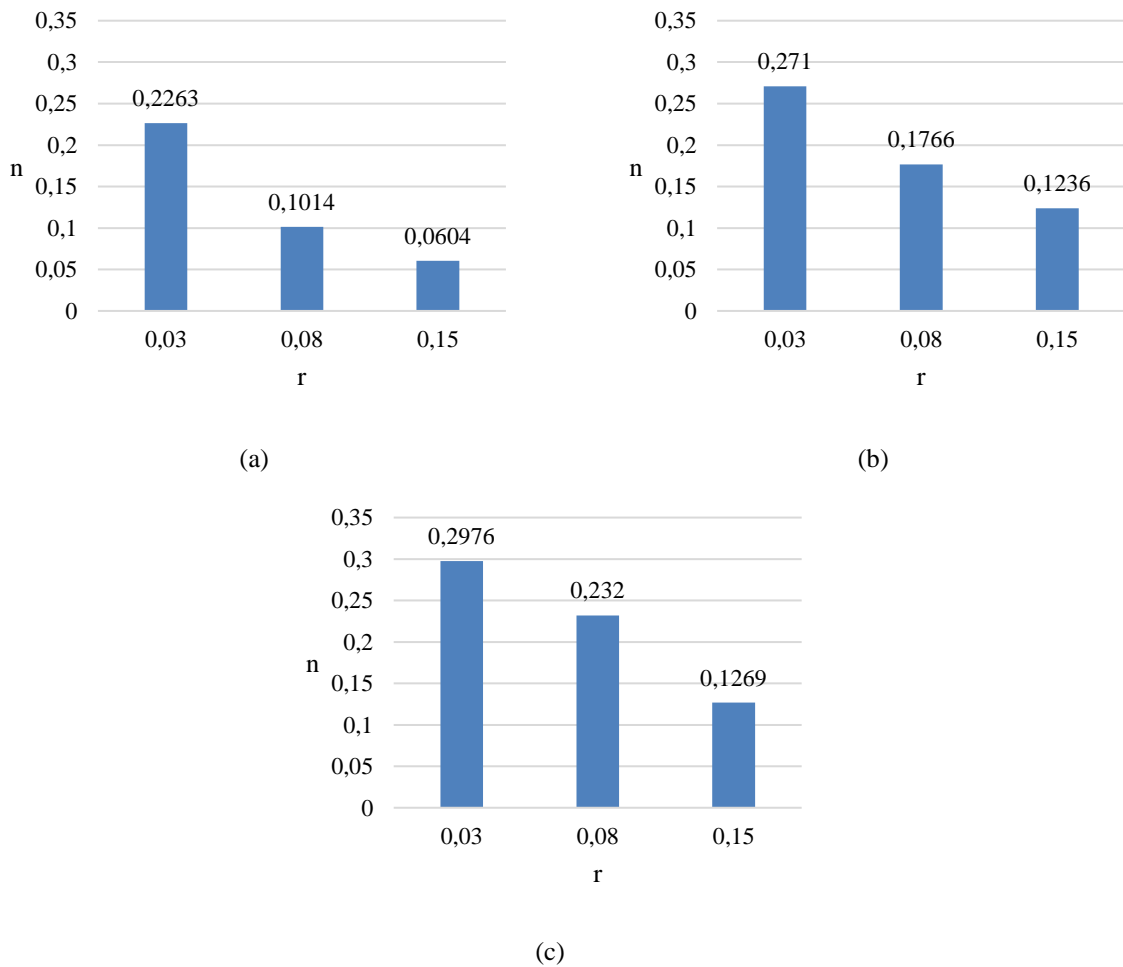
Fonte: Próprio Autor

Os dados obtidos para o aço inoxidável AISI 304, considerando a barra trefilada e tracionada inteira, foram compilados na Figura 5.1 de modo a facilitar a comparação entre eles, por meio da utilização de escala gráfica capaz de permitir a análise entre os resultados obtidos para o expoente de encruamento em diferentes semiângulos de fieira e também reduções de área.

Em relação ao aço inoxidável AISI 304 trefilado inteiro nota-se, na Figura 5.1, que para os três semiângulos de fieira analisados no presente trabalho, 20°, 8° e 3°, o expoente de

encruamento teve seus valores reduzidos com a elevação da redução de área no passe de trefilação. Nota-se ainda que para o semiângulo de 3° , em geral, os valores do expoente de encruamento foram maiores do que para o semiângulo de 8° , que por sua vez foram maiores que os do semiângulo de 20° . Ou seja, para uma mesma redução de área, a diminuição no semiângulo de fiação levou a uma elevação no expoente de encruamento.

Figura 5.1 – Expoente de encruamento do aço inoxidável AISI 304 trefilado inteiro para diferentes α e r



expoentes de encruamento do aço inoxidável AISI 304 trefilado inteiro para: (a) $\alpha = 20^\circ$ (b) $\alpha = 8^\circ$ e (c) $\alpha = 3^\circ$ em diferentes reduções de área

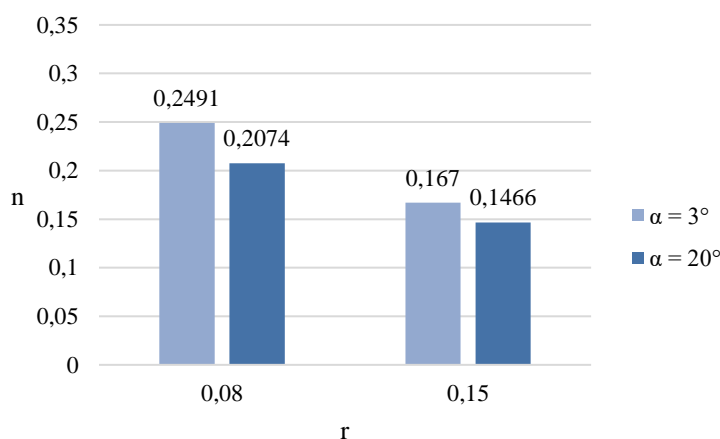
Fonte: Próprio Autor

Com base nos resultados, considerando que no processo de trefilação a ação da deformação homogênea se dá conjuntamente com a deformação redundante (CETLIN; HELMAN, 2005), e supondo que para o maior semiângulo (20°) essa deformação redundante seria um pouco mais acentuada em comparação aos demais semiângulos, conclui-se que quando o material foi submetido a um processo de deformação plástica anterior com uma

deformação redundante, à princípio, menos acentuada, gerando um menor nível de deformação média na trefilação (CORRÊA, 2004), ele teria uma maior capacidade de encruamento subsequente e, por consequência, maior capacidade de deformação. Em relação a essa suposta maior capacidade de deformação posterior, soma-se o fato de que a quantidade de deformação média anterior com a realização da trefilação com ângulos menores seria inferior, levando a um encruamento menos acentuado.

Na Figura 5.2, que considera apenas a camada central do material trefilado, verifica-se que, similarmente ao que foi apresentado para o aço inoxidável AISI 304 trefilado inteiro, a redução no semiângulo de fieira, passagem de 20° para 3°, levou a um aumento no expoente de encruamento. É possível concluir ainda que, a elevação na redução de área levou a uma diminuição no expoente de encruamento, de maneira semelhante ao que aconteceu com o semiângulo para a camada central.

Figura 5.2 – Expoente de encruamento do aço inoxidável trefilado na camada central para diferentes α e r



Fonte: Próprio Autor

Em relação ao coeficiente de determinação (R^2), ressalta-se que a análise iniciando em um nível de deformação plástica uniforme de 0,005 foi relativamente efetiva, considerando que os valores apresentados foram superiores a 0,9 (com exceção da condição trefilado inteiro com $\alpha = 3^\circ$ e $r = 15\%$). Iniciando o estudo em valores de deformação plástica uniforme menores, o coeficiente de determinação seria muito inferior quando comparado ao parâmetro de análise selecionado. Os coeficientes encontrados na análise não são tão próximos de 1 em todos os cenários, o que mostra que muitas vezes o ajuste de uma curva tensão real - deformação real por meio da equação de Hollomon (DIETER, 1982) nem sempre é a mais

efetiva, apesar de ser o modelo matemático mais utilizado, uma vez que foi desenvolvida para materiais com características diversas que passaram por processamentos térmicos e mecânicos subsequentes distintos.

Na Tabela 5.2 são mostrados os resultados de expoente de encruamento (n) para a liga de alumínio 6101 obtidos por meio da linearização das curvas tensão-deformação. Para o alumínio trefilado em um passe nas diferentes condições, similarmente ao que foi observado para o aço inoxidável AISI 304, nota-se que para um mesmo semiângulo de fieira, seja ele 20° , 8° ou 3° , ocorre uma redução do expoente de encruamento com a elevação da redução de área no passe, conforme mostrado na Figura 5.3. Considerando os efeitos do semiângulo de fieira, verifica-se que, com exceção da condição na qual o processo ocorreu com $\alpha = 8^\circ$ e $r = 3\%$, os valores de n aumentam com a redução de α . No entanto, diferentemente do aço inoxidável AISI 304, percebe-se que essa tendência de comportamento não é tão acentuada.

Tabela 5.2 – Expoente de encruamento da liga de alumínio 6101 para diferentes condições de trefilação

	α	r	n	R^2
Trefilado inteiro	3	0,03	0,0733	0,9993
		0,08	0,0352	0,9999
		0,15	0,0323	0,9997
	8	0,03	0,0617	0,9927
		0,08	0,0321	0,9871
		0,15	0,0278	0,9993
	20	0,03	0,0646	0,9820
		0,08	0,0298	0,9778
		0,15	0,0235	0,9998
Trefilado Camada Central	3	0,08	0,0438	0,9941
		0,15	0,0452	0,9972
	20	0,08	0,0493	0,9985
		0,15	0,0613	0,9958

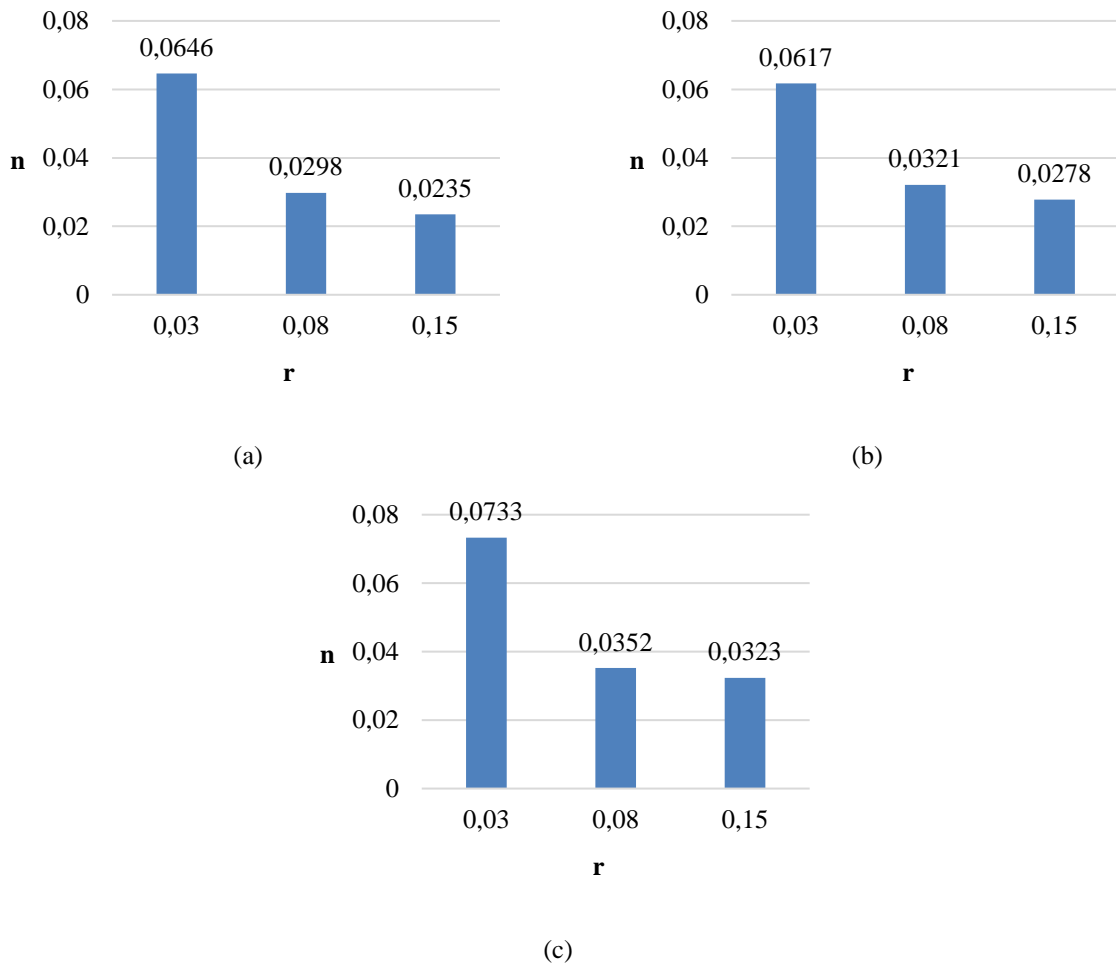
Fonte: Próprio autor

Para o alumínio trefilado na camada central, Figura 5.4, nota-se que uma elevação no semiângulo de fieira leva a uma redução do expoente de encruamento. Já em relação à redução de área, nota-se que uma elevação na redução de área no passe leva também a uma elevação no expoente de encruamento, oposto ao notado para o aço inoxidável AISI 304.

Considerando ainda a liga de alumínio 6101, em relação ao coeficiente R^2 , nota-se, claramente, que o ajuste da equação de Hollomon (iniciando a análise em 0,005 de

deformação plástica uniforme até o início da estrição) é muito melhor para esse cenário, uma vez que os valores de R^2 são muito mais próximos de 1, quando comparados aos do aço inoxidável AISI 304. Esses resultados se relacionam, possivelmente, aos mecanismos de deformação dos dois materiais metálicos analisados. Onde tem-se o alumínio, material metálico que apresentará valores de expoente de encruamento n , em geral, inferiores àqueles determinados para o aço inoxidável AISI 304.

Figura 5.3 - Expoente de encruamento do alumínio 6101 trefilado inteiro para diferentes α e r



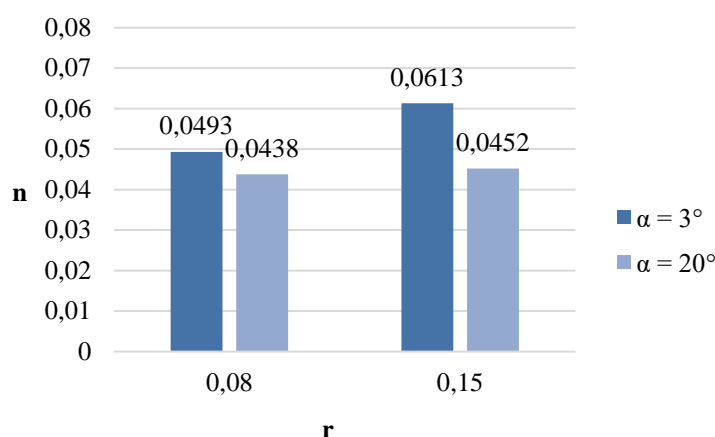
expoentes de encruamento da liga de alumínio 6101 trefilada inteira para: (a) $\alpha = 20^\circ$ (b) $\alpha = 8^\circ$ e (c) $\alpha = 3^\circ$ em diferentes reduções de área

Fonte: Próprio Autor

Segundo Padilha (2000), para o caso dos materiais metálicos com estrutura cristalina cúbica de faces centradas CFC, quanto maior for a energia de falha de empilhamento, mais próximas estarão as discordâncias parciais. Esse fenômeno facilita o escorregamento com desvio (deslizamento cruzado) durante a deformação plástica, elevando dessa forma a mobilidade das discordâncias mesmo ao encontrar alguma barreira à sua movimentação e

ainda facilitando que essas se anulem quando na presença de imperfeições lineares similares de sinais opostos. Assim, um metal CFC de alta energia de falha de empilhamento deverá apresentar menor densidade de discordâncias e um caminho livre médio maior para movimentação dessas quando comparado a um metal CFC de baixa energia de falha de empilhamento.

Figura 5.4 - Expoente de encruamento do alumínio 6101 trefilado na camada central para diferentes α e r



Fonte: Próprio Autor

Considerando as características estruturais da liga de alumínio analisada no presente trabalho, trata-se de um material que possui estrutura cristalina cúbica de face centrada com alta energia de falha de empilhamento e, portanto, espera-se que esse metal seja muito susceptível ao mecanismo de deslizamento cruzado. Com isso, espera-se a ocorrência de encruamento menos acentuado, uma vez que a movimentação de discordâncias por deslizamento de planos atômicos seria o principal mecanismo de deformação e essas, ao encontrar uma barreira à movimentação, poderiam mudar de plano. Dessa forma, não seria demandado um aumento tão acentuado no nível de esforços aplicados. Os valores de expoente de encruamento apresentados na Tabela 5.2 e nas Figuras 5.3 e 5.4, relativamente baixos, estão de acordo com essa análise.

Por outro lado, os expoentes de encruamento maiores para o aço inoxidável AISI 304 estão associados ao fato de que se trata de um material metálico com estrutura cristalina cúbica de faces centradas CFC com baixa energia de falha de empilhamento. De acordo com Padilha (2000), metais com baixa energia de falha de empilhamento apresentam maior densidade de discordâncias, maior energia armazenada durante o processo de deformação e

menor mobilidade dessas discordâncias. Nesse caso, devido ao fato de que as falhas de empilhamento geradas apresentam uma largura elevada, as discordâncias parciais ficam mais “distantes”. Assim, mesmo com a realização de esforços, ou seja, com ativação mecânica, não é possível unir essas discordâncias dissociadas e promover o deslizamento cruzado, levando a uma mudança de plano de deslizamento. Dessa forma, ao encontrar uma barreira, uma discordância tem dificuldade de mudar de plano e, com isso, outras discordâncias que não estavam se movimentando ou até essa mesma discordância “arrastando” a barreira, demandariam um esforço mecânico maior, aumentando a resistência mecânica, levando a um encruamento mais acentuado e a uma maior taxa de encruamento.

Em adição ao fenômeno mencionado anteriormente, no aço inoxidável AISI 304 tem-se outro mecanismo que opera sobre o processo de deformação, a transformação martensítica por deformação plástica (MANGONON; THOMAS, 1970). Justamente devido à dificuldade da ocorrência de deslizamento cruzado que o material começa a apresentar transformação martensítica por deformação plástica, ou seja, mudança de fase em regiões localizadas para martensita épsilon ξ (estrutura hexagonal compacta) e alfa linha α' (estrutura cúbica de corpo centrado), que também contribuem com a elevação de resistência mecânica. Em suma, tem-se para o aço inoxidável AISI 304 dois fatores que justificam os expoentes de encruamento mais elevados, a dificuldade de realizar deslizamento cruzado e a ocorrência de transformação martensítica por deformação plástica.

De certa forma, a existência de dois fatores influenciando o expoente de encruamento do aço inoxidável AISI 304 pode justificar a dificuldade de ajuste da equação de Hollomon para esse material, visualizada pelos coeficientes de correlação próximos de 0,9, porém ainda “distantes” de 1, diferentemente do alumínio. No alumínio, os fenômenos que ocorrem internamente como mecanismos de deformação são os mesmos, sendo eles a movimentação de discordâncias por deslizamento de planos atômicos, o aumento da densidade dessas discordâncias, aumento da interação entre elas e com outras barreiras, ou seja, o encruamento “clássico”.

Por outro lado, para o aço inoxidável AISI 304, tem-se além da movimentação de discordâncias por deslizamento de planos atômicos que levariam a um aumento na densidade das discordâncias que interagiriam entre si e com outras barreiras, tem-se também a transformação martensítica por deformação plástica. Então, tem-se o efeito de dois

mecanismos simultaneamente, sugerindo que o modelo da equação de Hollomon não seria adequado para mais de um fenômeno ocorrendo durante a deformação.

Considerando as características da deformação na operação de trefilação e suas consequências na capacidade de encruamento dos dois materiais metálicos investigados nesse trabalho, ressalta-se que as barras sofreram tanto a deformação redundante quanto a homogênea, cujo somatório corresponderia à deformação efetiva em cada ponto ou região da seção transversal do metal. Pode-se verificar que quanto maior o semiângulo de fieira, maior é a deformação redundante, portanto, para cada ponto ao longo da seção transversal da barra maior também seria a deformação efetiva.

Com relação à deformação média $\epsilon_{\text{visiopl}}$ no processo, analisada anteriormente por Corrêa (2004) pelo método de visioplasticidade, que consiste na obtenção do campo de vetores de velocidade do metal conformado seguida da determinação das distribuições da taxa de deformação, da deformação efetiva e da tensão efetiva, e resultados mostrados na tabela 5.3, nota-se que em ambos os materiais para uma mesma redução de área, em geral, quanto maior o semiângulo, maior é a deformação média.

Tabela 5.3 – Valores de deformação média $\epsilon_{\text{visiopl}}$ nas barras trefiladas obtidos por meio da técnica de visioplasticidade.

Condição de Trefilação	Aço Inoxidável AISI 304	Liga de Alumínio 6101
	$\epsilon_{\text{visiopl}}$	$\epsilon_{\text{visiopl}}$
$\alpha = 20^\circ, r = 8\%$	0,158	0,139
$\alpha = 20^\circ, r = 15\%$	0,270	0,274
$\alpha = 8^\circ, r = 8\%$	0,097	0,114
$\alpha = 8^\circ, r = 15\%$	0,214	0,209
$\alpha = 3^\circ, r = 8\%$	0,084	0,086
$\alpha = 3^\circ, r = 15\%$	0,186	0,188

Fonte: Adaptado de CORRÊA, 2004.

Desse modo, para materiais cujo semiângulo de fieira foi maior para uma mesma redução de área, a deformação média aplicada no passe de trefilação do processo anterior foi maior. E assim, na deformação à tração subsequente, aliada à deformação média mais elevada anterior, tem-se que a capacidade de encruar do material é reduzida. Por fim, menciona-se ainda a possível influência do caminho de deformação nos resultados (CORRÊA, 2004), uma vez que, ao passar da trefilação para a tração está sendo feita uma alteração na trajetória de deformação, sendo atuante na trefilação a deformação redundante e a deformação homogênea e na tração a deformação homogênea. Essa diferença pode resultar em características de

encruamento diversas, quando há uma maior influência da deformação redundante, a capacidade subsequente de encruar fica menor, expressa pelo expoente de encruamento n .

5.2 Análise do Encruamento por Meio da Taxa de Encruamento

Com as curvas tensão real x deformação real elaboradas a partir do ensaio de tração, foram obtidos os expoentes de encruamento para os materiais, analisados anteriormente, e ainda a taxa de encruamento referente a cada uma das condições de processamento.

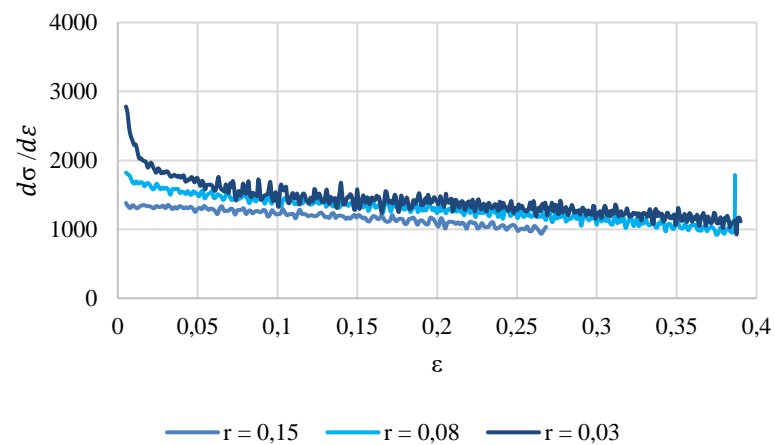
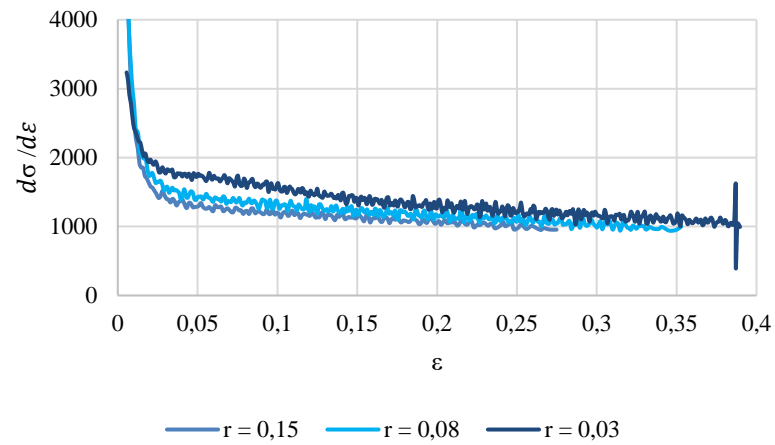
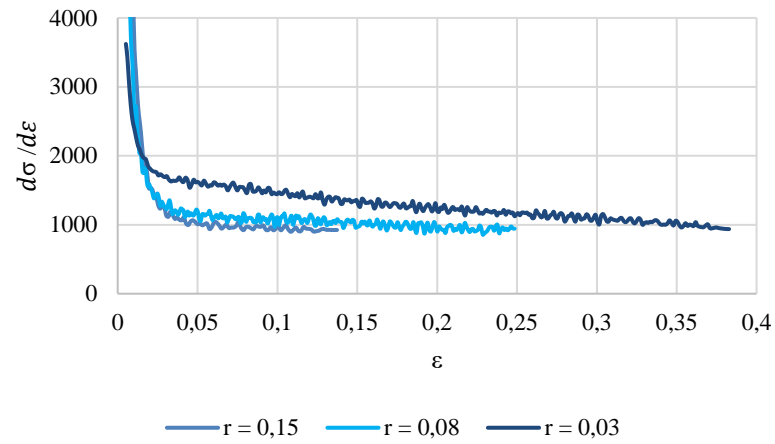
Com relação à taxa de encruamento do aço inoxidável AISI 304, Na Figura 5.5 pode ser observada a análise da taxa de encruamento em diferentes reduções de área para cada um dos semiângulos de fiação empregados no trabalho.

Para o semiângulo de fiação igual a 20° , Figura 5.5 (a), percebe-se um descolamento da taxa de encruamento para a redução de área de 3% ao longo de todo o ensaio após a deformação próxima de 0,02. Percebe-se que a taxa de encruamento para a redução de área de 3% é maior, seguida por 8% e 15%, sendo que a maior diferença entre as taxas é apresentada entre as reduções de 8% e 3%. A menor redução de área apresenta uma maior taxa de encruamento quando comparada com as demais, o que vai de acordo com os resultados encontrados para o expoente de encruamento, também maior para a menor redução de área.

Por outro lado, ao analisar o semiângulo de fiação de 8° , percebe-se a mesma tendência de descolamento da taxa de encruamento para a redução de área de 3% para deformações iniciais. Porém após a deformação de 0,15, aproximadamente, tem-se uma diferença um pouco menor entre as taxas de encruamento. Por fim, para o semiângulo de 3° , verifica-se uma maior diferença entre as taxas de encruamento nas deformações iniciais, que logo é reduzida ao atingir deformações próximas de 0,07. Neste último cenário nota-se uma presença mais marcante de serrilhado na curva de taxa de encruamento por deformação, ou seja, uma menor estabilidade, o que poderia justificar a necessidade da utilização de algum método matemático de suavização da curva ou *smoothing*, ferramenta essa não utilizada devido à indisponibilidade de número de pontos que atendessem a todos os cenários e curvas do presente trabalho.

Para todos os três semiângulos de fiação, para o aço inoxidável AISI 304, pode-se perceber que a maior taxa de encruamento ocorre onde se tem o maior expoente de encruamento, ou seja, na menor redução de área.

Figura 5.5 – Taxa de encruamento do aço inoxidável trefilado inteiro para diferentes α e r

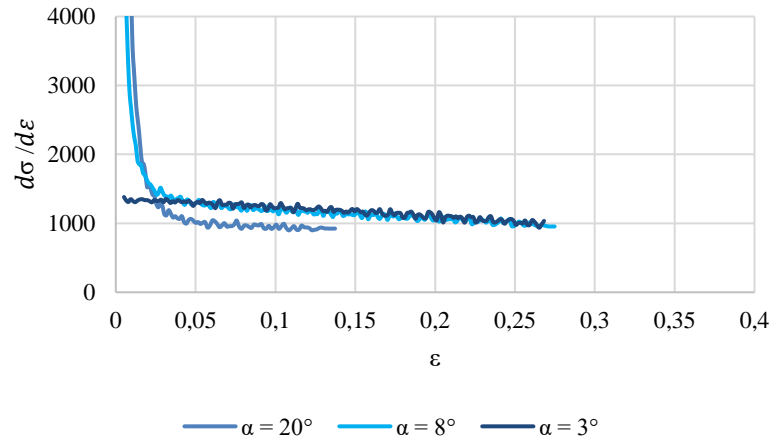


(a) taxa de encruamento do aço inoxidável AISI 304 trefilado inteiro com $\alpha = 20^\circ$, (b) $\alpha = 8^\circ$ e (c) $\alpha = 3^\circ$

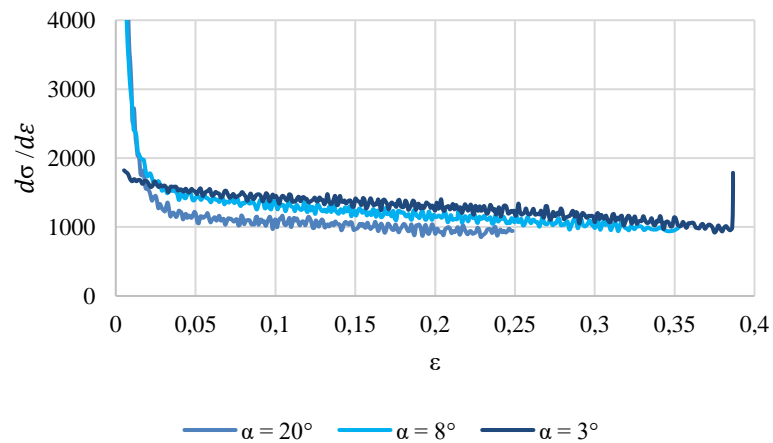
Fonte: Próprio Autor

Outra análise realizada foi variando o semiângulo de fieira em uma mesma redução de área, representada na Figura 5.6.

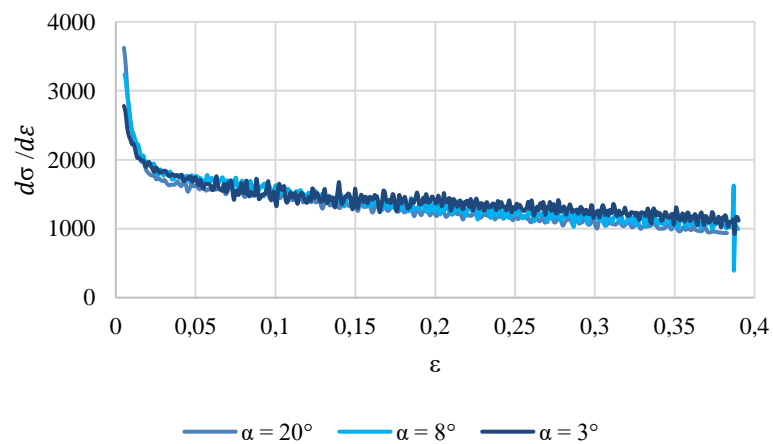
Figura 5.6 – Taxa de encruamento do aço inoxidável trefilado inteiro para diferentes α em um mesmo r



(a)



(b)



(c)

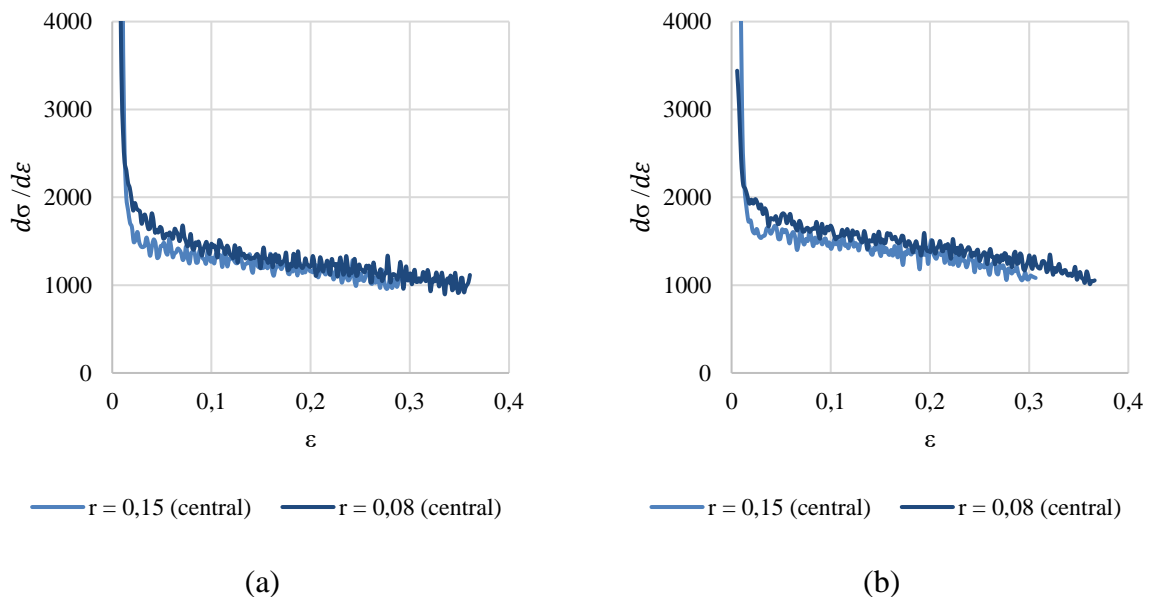
(a) taxa de encruamento do aço inoxidável AISI 304 trefilado inteiro com $r = 0,15$, (b) $r = 0,08$ e (c) $r = 0,03$

Fonte: Próprio Autor

A análise realizada na Figura 5.5 permite verificar a influência da redução de área sobre a taxa de encruamento, enquanto a apresentada na Figura 5.6, a influência do semiângulo de fieira. Em uma redução de área de 15% e 8%, percebe-se uma proximidade entre as taxas de encruamento para semiângulos de fieira menores (8° e 3°), já em deformações iniciais, próximas de 0,02, apesar de ainda maiores para o semiângulo de 3° . Nesse cenário, maior ainda é a diferença apresentada pela taxa de encruamento em 20° , muito menor quando comparada às demais.

Esse comportamento não é percebido, porém, na redução de área de 3%, onde as curvas se sobrepõem ao longo de quase toda a deformação analisada, evidenciando o menor impacto das características da deformação anterior sobre o material, e assim, na taxa de encruamento. No que se refere à análise do aço inoxidável trefilado na camada central, verifica-se a mesma tendência dos demais resultados anteriores. A taxa de encruamento é mais elevada para a menor redução de área estudada, na análise do trefilado na camada central, igual a 8% (Figura 5.7).

Figura 5.7 – Taxa de encruamento do aço inoxidável trefilado na camada central para diferentes α e r



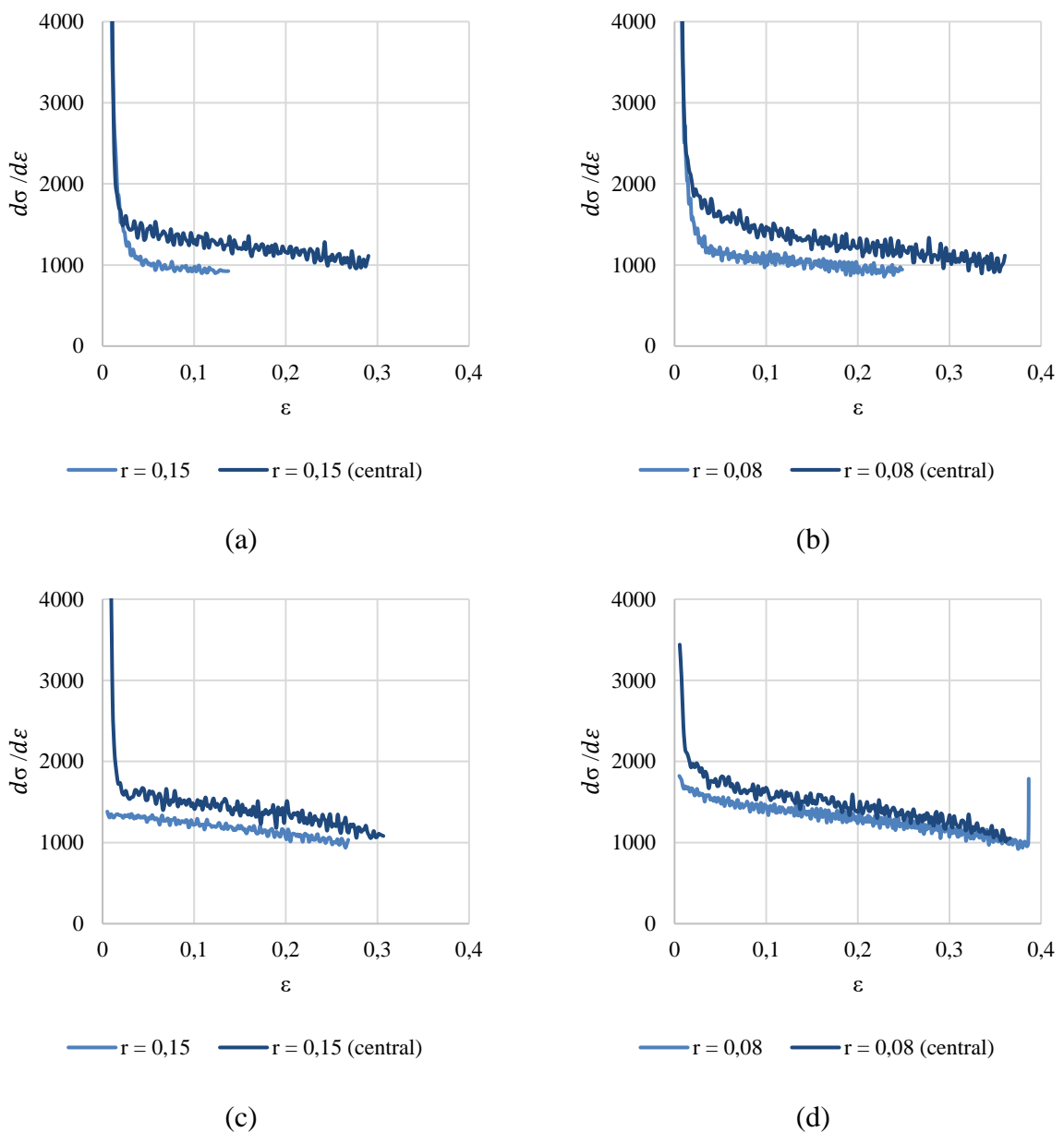
(a) taxa de encruamento do aço inoxidável AISI 304 trefilado na camada central com $\alpha = 20^\circ$ e (b) $\alpha = 3^\circ$

Fonte: Próprio Autor

Referente à taxa de encruamento estudou-se ainda a diferença existente na taxa do material trefilado inteiro em comparação ao trefilado na camada central, com uma redução de área igual. Para os quatro cenários estudados e apresentados na Figura 5.8 pode-se perceber que a taxa de encruamento é maior para as reduções de área estudadas nos materiais trefilados

na camada central. Esses resultados eram, de certa forma, esperados, uma vez que para os materiais trefilados na camada central tem-se expoentes de encruamento maiores quando comparado aos trefilados inteiros, que consideram toda a deformação do processo e, assim, possuem menor capacidade subsequente de encruar. Espera-se também que quanto maior o módulo do expoente n , maior a taxa de encruamento do material e, conseqüentemente, maior a sensibilidade de endurecimento à medida que se varia a deformação.

Figura 5.8 – Taxa de encruamento do aço inoxidável para diferentes α em um mesmo r , comparativo com o trefilado na camada central



(a) taxa de encruamento do aço inoxidável AISI 304 trefilado inteiro e na camada central com $\alpha = 20^\circ$ e $r = 0,15$
 (b) $\alpha = 20^\circ$ e $r = 0,08$, (c) $\alpha = 3^\circ$ e $r = 0,15$ e (d) $\alpha = 3^\circ$ e $r = 0,08$.

Fonte: Próprio Autor

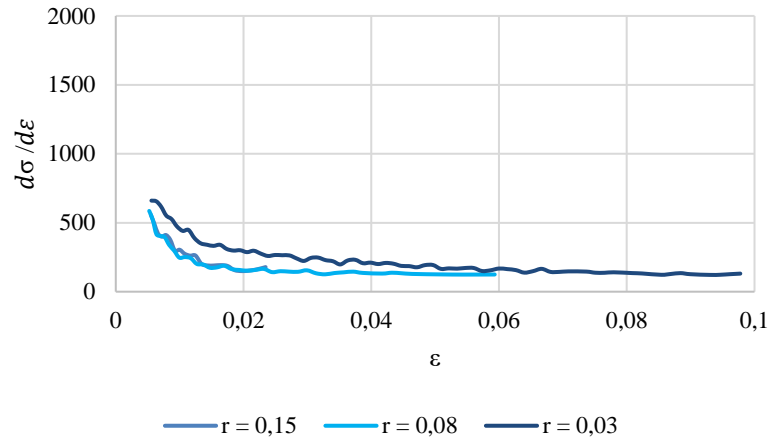
Para a liga de alumínio 6101, resultados similares em termos comportamento aos do aço inoxidável AISI 304 no que se refere a taxa de encruamento (apesar de menor em medida de grandeza) foram observados. Pode-se perceber na Figura 5.9 que para um mesmo semiângulo de fieira a taxa de encruamento é maior tanto quanto menor é a redução de área. Para 20° tem-se uma taxa maior em 3% de redução enquanto as taxas referentes a 15% e 8% se confundem em deformações iniciais. Nota-se ainda que próximo de $\varepsilon = 0,06$ ocorre a aproximação das taxas de encruamento para $r = 0,08$ e $r = 0,03$.

Em $\alpha = 8^\circ$ verifica-se, novamente, o descolamento da taxa de encruamento onde a redução de área é igual a 0,03, porém ao contrário do que ocorre em $\alpha = 20^\circ$, a aproximação das taxas ocorre em uma deformação anterior a 0,06. No último cenário descrito ($\alpha = 3^\circ$), as taxas não chegam a se encontrar, uma vez que a capacidade de encruar do alumínio em reduções de área elevadas (0,15 e 0,08) cessa em deformações próximas de 0,03, enquanto a maior taxa de encruamento ($r = 0,03$) se mantém maior que as demais em toda a curva.

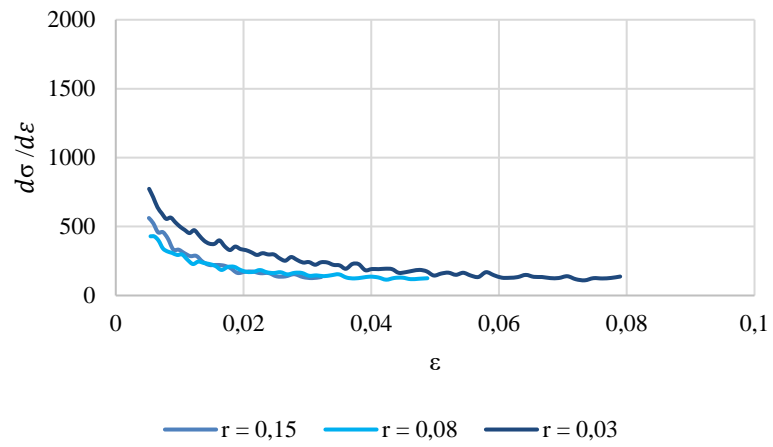
Os resultados apresentados para o alumínio também vão de encontro ao que foi apresentado sobre o seu expoente de encruamento, tem-se um maior expoente de encruamento em reduções de área menores, porém em valores absolutos inferiores aos do aço inoxidável AISI 304, pelo fato do alumínio se tratar de um metal CFC de alta energia de empilhamento. Porém, ainda sem correlação direta para os expoentes de encruamento e taxas de encruamento quando variados os semiângulos.

Analisando o impacto da variação do semiângulo de fieira na liga de alumínio 6101 trefilada inteira, Figura 5.10, percebe-se uma maior taxa de encruamento para a redução de área de 0,03 e também, em todos os cenários, para o semiângulo de 3°. Desse modo, para esse material a combinação dos menores parâmetros analisados, semiângulo de fieira e redução de área, tem-se uma maior capacidade de encruamento do material.

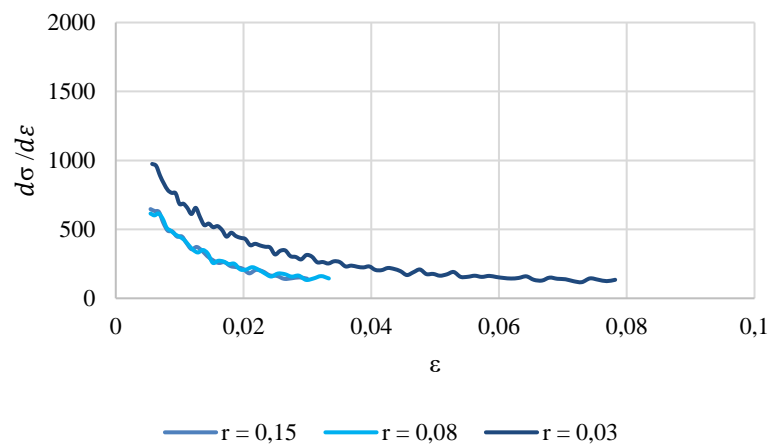
Figura 5.9 – Taxa de encruamento do alumínio 6101 trefilado inteiro para diferentes α e r



(a)



(b)

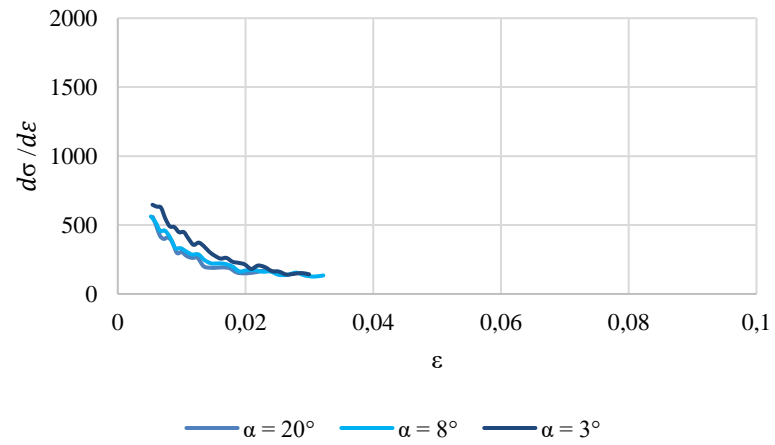


(c)

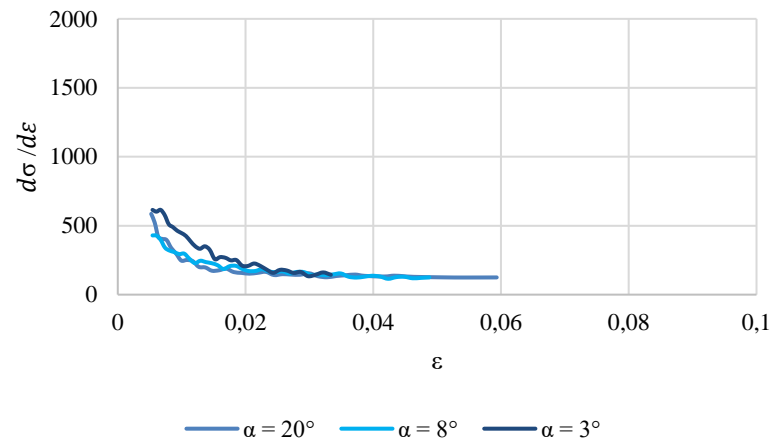
(a) taxa de encruamento do alumínio 6101 trefilado inteiro com $\alpha = 20^\circ$, (b) $\alpha = 8^\circ$ e (c) $\alpha = 3^\circ$

Fonte: Próprio Autor

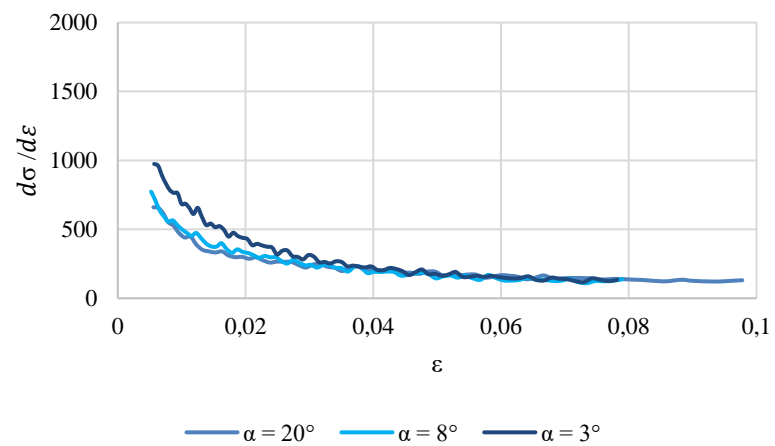
Figura 5.10 – Taxa de encruamento do alumínio 6101 trefilado inteiro para diferentes α em um mesmo r



(a)



(b)



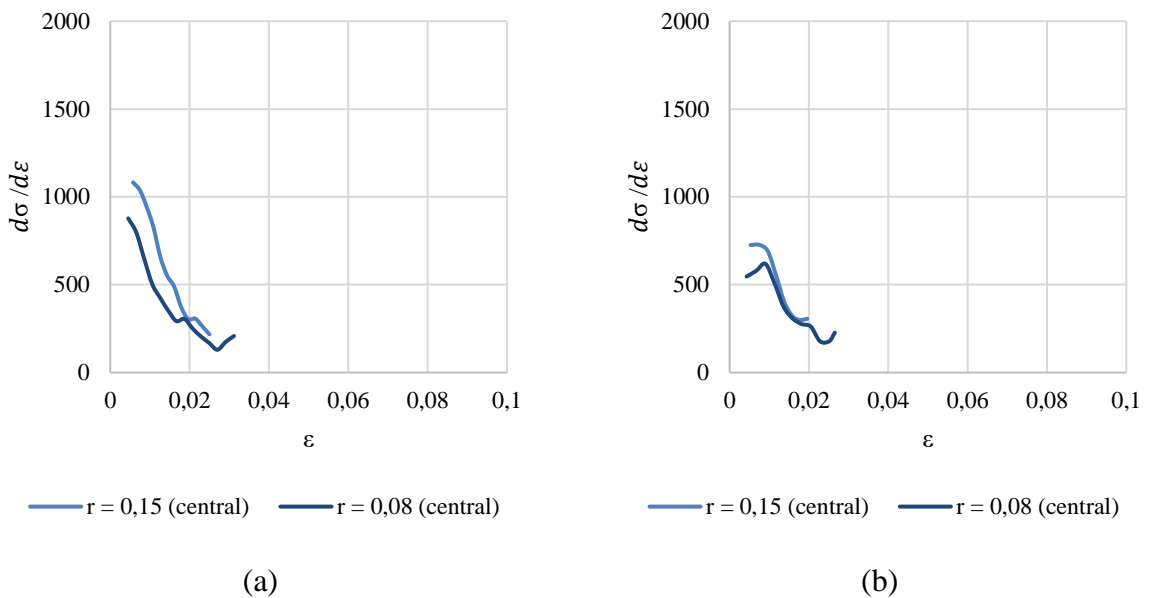
(c)

(a) taxa de encruamento do alumínio 6101 trefilado inteiro com $r = 0,15$, (b) $r = 0,08$ e (c) $r = 0,03$

Fonte: Próprio Autor

No alumínio, diferentemente do que foi encontrado para o aço inoxidável AISI 304, tem-se pela primeira vez uma taxa de encruamento mais elevada para uma maior redução de área (0,15), considerando o material trefilado na camada central (figura 5.11). Esse resultado pode ser justificado, talvez, pelo baixo volume de dados utilizados na sua montagem. A utilização de uma deformação inicial em 0,005 na curva tensão real - deformação real e posterior linearização e taxa de encruamento pode não ter sido representativa.

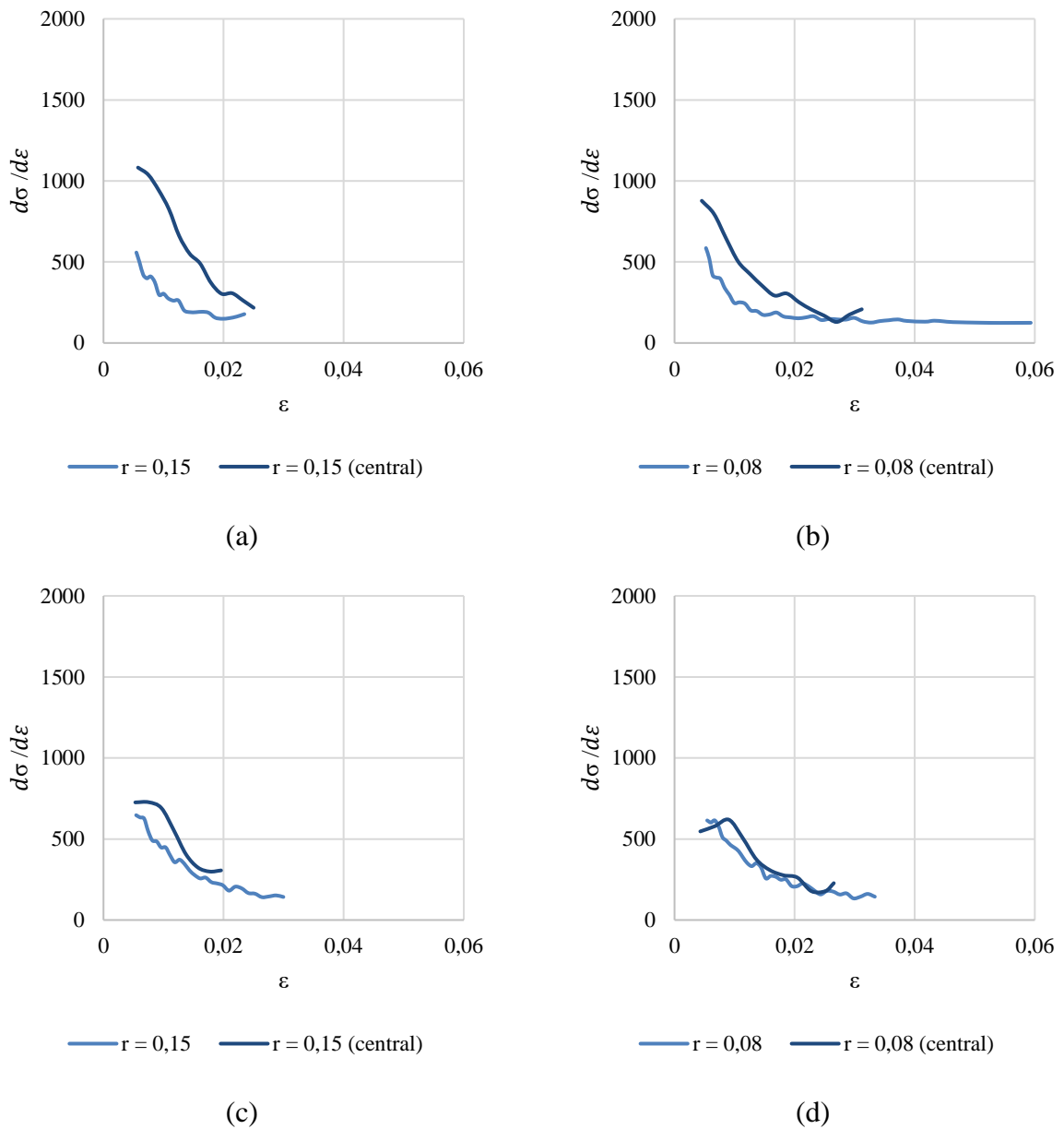
Figura 5.11 – Taxa de encruamento do alumínio 6101 trefilado na camada central para diferentes α e r



Fonte: Próprio Autor

Para a análise da taxa de encruamento do alumínio 6101 trefilado inteiro e do trefilado na camada central, em uma mesma redução de área, tem-se para os cenários da Figura 5.12 uma maior taxa de encruamento considerando a redução de área do material trefilado na camada central. Isso está de acordo com os maiores valores n , ou seja, o material considerando apenas a camada central possui uma maior capacidade de encruar e, conseqüentemente, mais elevada taxa de encruamento devido à usinagem e redução de área, que retira os efeitos de deformação prévia. Esses resultados se replicam para ambos os semiângulos analisados, 20° e 3° , com a particularidade de que em (b) tem-se um alongamento da taxa de encruamento em função da deformação, o que não ocorre nas demais condições.

Figura 5.12 – Taxa de encruamento do alumínio 6101 para diferentes α em um mesmo r , comparativo com o trefilado na camada central



(a) taxa de encruamento do alumínio 6101 trefilado inteiro e na camada central com $\alpha = 20^\circ$ e $r = 0,15$ (b) $\alpha = 20^\circ$ e $r = 0,08$, (c) $\alpha = 3^\circ$ e $r = 0,15$ e (d) $\alpha = 3^\circ$ e $r = 0,08$.

Fonte: Próprio Autor

Os resultados encontrados para a taxa de encruamento para os materiais analisados são condizentes com o desenvolvimento apresentado para os respectivos expoentes de encruamento n , em medida de grandeza, comportamento e também pela respectiva estrutura cristalina respectiva, mostrando que o estudo realizado por meio da taxa de encruamento e também da equação de Hollomon atendeu às expectativas de análise.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram estudados os efeitos dos principais parâmetros da trefilação na capacidade de encruamento do aço inoxidável AISI 304 e da liga de alumínio 6101 por meio da análise do expoente de encruamento da equação de Hollomon e da taxa de encruamento. Os resultados obtidos por meio das técnicas de análise descritas no presente trabalho, aplicadas sobre os resultados de um trabalho anterior (CORRÊA, 2004), permitiram concluir:

- A partir da curva tensão real – deformação real obtida no ensaio de tração foi possível encontrar através de linearização e ajuste com a equação de Hollomon o expoente de encruamento dos materiais estudados. O aço inoxidável AISI 304, que possui estrutura cristalina cúbica de face centrada e baixa energia de falha de empilhamento, apresentou maior expoente de encruamento, maior capacidade de encruar e conseqüentemente maiores taxas de encruamento. Por outro lado, a liga de alumínio 6101, também de estrutura CFC, porém com alta energia de falha de empilhamento, apresentou menor expoente de encruamento, menor capacidade de encruar e também menores taxas de encruamento.
- Para o aço inoxidável AISI 304 tem-se uma correlação direta entre o expoente de encruamento, a redução de área e o ângulo de fieira. Quanto menor o semiângulo de fieira e a redução de área aplicados no processo de trefilação, maior a capacidade de encruar subsequente do aço AISI 304, ou seja, maior o seu expoente de encruamento, sendo válido tanto para o material trefilado inteiro quanto para o trefilado apenas na camada central. Por outro lado, para a liga de alumínio 6101 a correlação não se mostra tão direta, uma vez que uma menor redução de área leva sim a um maior expoente de encruamento, porém diferentes semiângulos de fieira e uma mesma redução de área não apresentam correlação linear direta. No que se refere ao alumínio trefilado na camada central, tem-se um aumento de n com a elevação da redução de área e uma redução de n com o aumento do semiângulo de fieira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM HANDBOOK. **Forming and Forging**. 9 ed. Ohio: American Society for Metals –ASM International, v. 14, 1998. 978p.

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

BRUSIUS JUNIOR, W. **Análise da lubrificação seca para trefilação e proposta de padronização de lubrificantes para arame médio Carbono**. 2009. 33 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

BYON, S. M.; LEE, S. J.; LEE, D.W.; LEE, Y.H.; LEE, Y. Effect of coating material and lubricant on forming force and surface defects in wire drawing process. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, p.104-110, 10 set. 2010.

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.; HELMAN, H. **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**. 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. 653p.

DUBOIS, A.; LAZZAROTTO, L.; DUBAR, L.; OUDIN, J. A multi-step lubricant evaluation strategy for wire drawing–extrusion–cold heading sequence. **Wear**, p.1-11, 31 jul. 2001

EL-MADHOUN, Y.; MOHAMED, A.; BASSIM, M. N. Cyclic stress-strain response and dislocation structures in polycrystalline aluminum. **Materials Science and Engineering A**, v. 359, p. 220-227, 2003.

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.

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

LECROISEY, F., PINEAU, A. Martensitic Transformations Induced by Plastic Deformation in the Fe-Ni-Cr-C System. **Metallurgical Transactions**, v. 3, p. 387-396, February 1972.

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.

MAGALHÃES, A.S.; MARTINS, S.C.S.; AGUILAR, M.T.P.; LOPES, W.; CORRÊA, E. C. S. Efeito da temperatura intercrítica no expoente de encruamento de aços bifásicos. In: **CONGRESSO ANUAL DA ABM**, 71. 2016, Rio de Janeiro, 2016.

MANGONON, P.L., THOMAS, G. The Martensite Phases in 304 Stainless Steel. **Metallurgical Transactions**, v. 1, p. 1577-1586, 1970.

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

MEYERS, M.; CHAWLA, K. **Mechanical behavior of materials**. 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 856p.

MOVAHED, P.; KOLAHGAR, S.; MARASHI, S. P. H.; POURANVARI, M.; PARVIN, N. The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties and work hardening behavior of ferrite-martensite dual steel sheets. **Materials Science and Engineering A**, v. 518, p. 1-6, 2009.

PADILHA, A.F.; **Materiais de engenharia – microestrutura e propriedades**. Hemus, p. 186-189, 2000.

PALMEIRA, A. A. **Processos de fabricação IV**: capítulo 5: processos de trefilação. Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2005.

REED-HILL, R.E., **Princípios de Metalurgia Física**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982. 776p.

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.

SOARES, G. C.; GONZALEZ, B. M.; SANTOS, L. A. Strain hardening behavior and microstructural evolution during plastic deformation of dual phase, non-oriented electrical and AISI 304 stainless steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 684, p. 577-585, 2017.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 5 ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1982, 286p.

SCHAEFFER, L. **Conformação mecânica**. Porto Alegre: Imprensa Livre Editora, 2009. 167p.

SHINOHARA, T.; YOSHIDA, K. Deformation analysis of surface flaws in stainless steel wire drawing. **Journal of Materials Processing Technology**, p.579-584, 2005.

TRUKHANOVICH, A. A.; LEDNEVA, A. A. Lubricants for dry wire drawing. **Steel In Translation**, v. 39, n. 6, p.510-511, 2009.

WANG, H.; HONGYANG, J.; ZHAO, L.; HANA, Y.; LVA, X.; XU, L. Dislocation structure evolution in 304L stainless steel and weld joint during cyclic plastic deformation. **Materials Science and Engineering A**, v. 690, p. 16-31, 2017.

WRIGHT, R. N. **Wire technology: process engineering and metallurgy**. Burlington: Elsevier, 2011. 337p.

WU, R.; PETTERSSON, N.; MARTINSSON, A.; SANDSTRÖM, R. Cell structure in cold worked and creep deformed phosphorus alloyed copper. **Materials Characterization**, v. 90, p. 21-30, 2014.

YOSHIDA, A. **Metais, ligas e ciclo térmico**. São Paulo: Edições Fortaleza, 1974. 240p.

ZLATEVA, G.; MARTINOVA, A. **Microstructure of metals and alloys: an atlas of transmission electron microscopy images**. Boca Raton: CRC Press, 2008. 192p.