



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA**

Thiago Ferreira da Silva

**EFEITO DOS PARÂMETROS DE TREFILAÇÃO NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DO AÇO
SAE 1015 TREFILADO.**

Fortaleza - CE

Dezembro de 2011

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA**

**EFEITO DOS PARÂMETROS DE TREFILAÇÃO NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DO AÇO
SAE 1015 TREFILADO.**

Thiago Ferreira da Silva

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Hélio Cordeiro de Miranda

Fortaleza – CE

Dezembro de 2011



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

P A R E C E R

A Banca Examinadora composta pelos professores Hélio Cordeiro de Miranda, Elineudo Pinho de Moura e Cleiton de Carvalho Silva, designada para avaliar o Trabalho Final de Curso intitulado “**EFEITO DOS PARÂMETROS DE TREFILAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DO AÇO SAE 1015 TREFILADO**”, desenvolvido e defendido por Thiago Ferreira da Silva, matrícula n.º 0276502, aluno do Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica, atribuiu nota final igual a _____ (*nota por extenso*) ao referido trabalho.

Fortaleza, ____ de _____ de 20____

Prof. Dr. Hélio Cordeiro de Miranda
Orientador e Presidente da Banca Examinadora

Prof. Dr. Elineudo Pinho de Moura
Membro da Banca Examinadora

Prof. Dr. Cleiton de Carvalho Silva
Membro da Banca Examinadora

A Deus
A meus pais
A minha avó

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

À minha mãe Adriana, que não está entre nós, mas foi fundamental para minha chegada até aqui.

À minha família, pelo apoio nos momentos mais importantes, principalmente à minha avó Marlene pelo amor, educação e incentivo aos estudos, e à minha irmã Talita Christine pelo amor e incentivo.

Ao professor e orientador Dr. Hélio Cordeiro de Miranda, pela amizade, apoio e orientação ao trabalho.

À equipe de professores do Laboratório de Soldagem/ENGESOLDA, Prof. Dr. Jesualdo Pereira Farias, Prof. Dr. Cleiton de Carvalho Silva e Prof. Dr. Marcelo Ferreira Mota, pelo grande aprendizado.

Ao meu ex-gerente Bruno Magalhães, pelo incentivo e apoio nesse trabalho.

A todos os bolsistas e amigos do Laboratório de Engenharia de Soldagem/ENGESOLDA.

Aos servidores Junior e Lucivaldo, por sempre nos ajudar quando requeridos.

Aos colegas da turma de graduação e grandes amigos: Assis, Abraão, Edval, Higor, Gilberto, Victor, João, Frank, Diego, Thiago, Marcela, Josy, Rafaela, Paulo e Hélio, pelos bons momentos ao longo destes últimos anos.

Aos professores Hamilton, Lindberg Gonçalves, Ricardo Emilio, Elineudo, Helio Cordeiro, Marcelo José, Marcelo Motta, Walney, Alex Maia, Cleiton Carvalho, Igor, e aos demais professores por compartilharem um pouco dos seus conhecimentos adquiridos.

Silva, F. T., 2011, “ **EFEITO DOS PARÂMETROS DE TREFILAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DO AÇO SAE 1015 TREFILADO.**”

RESUMO

Os vergalhões CA-60 produzidos pelo processo de conformação mecânica a frio a partir do fio máquina, conhecido como trefilação, são os principais produtos empregados no setor da construção civil, fabricação de pregos e arames em si. Hoje as indústrias estão procurando cada vez mais altas produções a um menor custo e, para isso, se fazem necessários estudos na área a fim de obter um produto com uma qualidade cada vez melhor e que atenda às normas e exigências do mercado. Por esse motivo, este trabalho tem como objetivo avaliar e entender as variáveis que influenciam nas propriedades mecânicas e microestruturais no processo de trefilação. Serão analisados quatro tipos de ângulos diferentes na fieira, três tipos de lubrificantes e o percentual de redução de área. Para isso, foram realizados cinco testes que visam explorar esses parâmetros, verificando sua influência na trefilação. Por meio dos resultados obtidos, verificou-se que o percentual de redução de área é o parâmetro que mais influencia no aumento das propriedades mecânicas e os resultados de microdureza aumentaram cerca de 100% para todos os testes. Já em relação ao tamanho de grão, devido às deformações aplicadas o mesmo deixou de ser equiaxial e passou a ser alongado e alinhado, além de ter o tamanho reduzido de ASTM 10 para ASTM 12. O ângulo de fieira foi um parâmetro no qual não se observou influência nos resultados de tração, microdureza e microestrutura. Com um menor número de passes de reduções, foi possível obter valores de Limite de escoamento e Limite de Resistência, semelhantes e satisfatórios. No final, o teste 4 com três passes, onde utilizou-se reduções de 40, 22 e 18% entre passes e ângulos de fieira 18, 16 e 12° apresentou-se como o melhor teste ser aplicado, devido a obtenção de propriedades mecânicas satisfatórias e equivalentes aos testes com quatro passes e os ângulos maiores que proporcionam uma melhor lubrificação na fieira.

Trefilação, Microestrutura, Propriedades Mecânicas, Tamanho de Grão.

ABSTRACT

The CA-60 steels produced by the of cold mechanical forming process from the wire rods, known as wire drawing, are the main products used in the construction industry, manufacture of nails and wires itself. Today, industries are increasingly looking for high yields at a lower cost and, therefore, studies are needed in the area to obtain a product with an ever improving quality and meet the standards and market requirements. Therefore, this study aims to evaluate and understand the variables that influence the mechanical properties and microstructure of the wire drawing process. We will analyze four different types of angles in the spinneret, three types of lubricants and the percentage reduction of area. For this, we performed five tests to explore these parameters, checking its influence in wire drawing. Through the results obtained, it was found that the percentage reduction of area is the parameter that most influences the increase of mechanical properties and the results of microhardness increased by about 100% for all tests. In relation to the grain size, deformation due to applied, it is no longer equiaxial and became elongated and aligned, and be reduced in size to ASTM 10 ASTM 12. The angle of wire gage was a parameter in which there was no influence on the results of microhardness and microstructure. With a smaller number of passes of reductions was possible to obtain values of Yield and yield, similar and satisfactory. In the end, the test 4 with three roll pass, where we used reductions of 40, 22 e 18% between passing and angles of wire gage 18, 16 e 12° appeared as the best test to applied, because obtaining mechanical properties satisfactory and equivalent to four roll pass tests with angles greater than and provide better lubrication in the wire gage.

Wire Drawing, Microestruturure, Mechanical Properties, Grain Size.

Key Words:

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVO	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1	PROCESSO DE TREFILAÇÃO	4
3.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS NA TREFILAÇÃO	6
3.3	PREPARAÇÃO SUPERFICIAL	8
3.3.1	<i>Decapagem Mecânica</i>	9
3.4	MATRIZ (FIEIRA)	10
3.4.1	<i>Preparação da Feira</i>	11
3.5	LUBRIFICAÇÃO	12
3.6	ENCRUAMENTO	14
3.7	DEFORMAÇÃO DURANTE A TREFILAÇÃO	16
3.8	ANÁLISE DO PROCESSO DE TREFILAÇÃO DE BARRAS	16
3.8.1	<i>Deformação Homogênea</i>	17
3.8.2	<i>Método dos Discos</i>	18
3.8.3	<i>Trabalho Redundante</i>	19
3.9	ÂNGULO DE FIEIRA	20
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	22
4.1	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	23
4.2	METODOLOGIA.....	26
4.3	CARACTERIZAÇÃO METALÚRGICA	28
4.3.1	<i>Preparação das amostras</i>	28
4.3.2	<i>Preparação dos corpos de prova para microscopia ótica e microdureza</i>	28
4.3.3	<i>Ensaio de resistência à tração</i>	28
4.3.4	<i>Ensaio de Microdureza</i>	28
4.3.5	<i>Análise microestrutural – Tamanho de grão ASTM</i>	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
5.1	PROPRIEDADES MECÂNICAS	29
5.1.1	<i>Ensaio de tração</i>	29
5.1.2	<i>Microdureza</i>	37
5.2	MICROESTRUTURA E TAMANHO DE GRÃO.....	42
5.3	LUBRIFICANTES.....	49
6	CONCLUSÕES	50
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustração do processo de trefilação, destacando a redução de seção do aço e uma orientação preferencial dos grãos, segundo a direção paralela ao esforço de tração (SHACKELFORD, 1996).	4
Figura 2. Variação das propriedades mecânicas com a Trefilação. (BUTTON, 2001)	6
Figura 3. Efeito do encruamento na resistência à tração de aços-carbono.....	8
Figura 4. Tipos de carepas no fio máquina (Cetlin, 2002).	8
Figura 5. Decarepador mecânico utilizando 5 roldanas (Foto fornecida pela MMAia).	9
Figura 6. Fieira e parte do núcleo. Adaptada de Cetlin, 2002.....	11
Figura 7.(a) Máquina retificadora de fieira. (b) Máquina para polimento e calibração final. Adaptada de bemfica.	12
Figura 8. Lubrificação no processo de trefilação. Adaptada de Dove, 1979.	13
Figura 9. Comparação entre o aspecto do diagrama tensão-deformação de um aço recozido e outro encruado.	15
Figura 10. Deformação nos elementos da barra sendo trefilada.....	16
Figura 11. Detalhe da geometria e as tensões envolvidas no processo de trefilação de acordo com o método dos discos (Cetlin, 2005)	18
Figura 12. Esquematização da deformação redundante (Cetlin, 2005).	19
Figura 13. (a) Valores do semiângulo ótimo segundo calculado pela equação 5 e (b) variação na tensão de trefilação de acordo com o semiângulo utilizado, Helman e Cetlin (1983).	21
Figura 14. Microestrutura do produto laminado. Aumento de 500X. Ataque Nital 2%.	23
Figura 15. Máquina de Trefilação com 4 passes. (Foto fornecida pela MMAia)	24
Figura 16. Influência da redução de área no LE e LR dos testes 2 e 4.....	30
Figura 17. Influência da redução de área no LE e LR dos testes 3 e 5.....	31
Figura 18. Influência do ângulo de fieira no LE e LR dos testes 2 e 3.	32
Figura 19. Influência do ângulo de fieira no LE e LR dos testes 4 e 5.	33
Figura 20. Limite de escoamento para todos os testes x sequência de passes.	34

Figura 21. Limite de resistência para todos os testes x sequência de passes.....	35
Figura 22. Influência do ângulo de fieira na microdureza vickers dos testes 2 e 3.	38
Figura 23. Influência do ângulo de fieira na microdureza vickers dos testes 2 e 3.	39
Figura 24. Influência da redução de área na microdureza vickers dos testes 2 e 4.	40
Figura 25. Influência da redução de área na microdureza vickers dos testes 3 e 5.	40
Figura 26. Microdureza Vickers para todos os testes x sequência de passes.....	41
Figura 27. Microestrutura da região longitudinal do fio-máquina com diâmetro de 5,5mm. Tamanho de Grão ASTM 10. Ataque Nital 2%. (500X).....	42
Figura 28. Microestrutura da região longitudinal do T3P1 com diâmetro de 4,65mm e redução de 28,5%. Tamanho de Grão ASTM 10. Ataque Nital 2%. (500X)	43
Figura 29. Microestrutura da região longitudinal do T3P2 com diâmetro de 4,15mm e redução total de 43%. Tamanho de Grão ASTM 10. Ataque Nital 2%. (500X).....	44
Figura 30. Microestrutura da região longitudinal do T3P3 com diâmetro de 3,76mm e redução total de 53%. Tamanho de Grão ASTM 11. Ataque Nital 2%. (500X).....	44
Figura 31. Microestrutura da região longitudinal do T3P4 com diâmetro de 3,4mm e redução total de 62%. Tamanho de Grão ASTM 12. Ataque Nital 2%. (500X)	45
Figura 32. (a) Microestrutura da Região Transversal do fio-máquina com diâmetro de 5,5mm. (200x) e (b) Microestrutura da região transversal do ultimo passe do teste 3. (200X) redução total de 62%. Ataque Nital 2%.....	46
Figura 33. Microestrutura da região longitudinal do T4P1 com diâmetro de 4,25mm e redução de 40%. Tamanho de Grão ASTM 10. Ataque Nital 2%. (500X)	46
Figura 34. Microestrutura da região longitudinal do T4P3 com diâmetro de 3,4mm e redução de 62%. Tamanho de Grão ASTM 12. Ataque Nital 2%. (500X).....	47
Figura 35. Microestrutura da região longitudinal do T4P3 com diâmetro de 3,4mm e redução de 62%. Tamanho de Grão ASTM 12. Ataque Nital 2%. (200X).....	47

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	6
Equação 2.....	17
Equação 3.....	17
Equação 4.....	18
Equação 5.....	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Alguns dados de comparação entre barras de aço da série SAE 10XX laminados a quente com barras trefiladas a frio. Adaptada de (NAKAGIRI, YAMANO, <i>et al.</i> , 2001).	7
Tabela 2. Variação da resistência à tração, dureza, alongamento e resistência ao choque, com a passagem de um aço recozido para encruado. (Colpaert, 1974).....	15
Tabela 3. Alguns valores indicados para ângulos de matriz (2α) em graus.	21
Tabela 4. Composição química do fio máquina - aço SAE 1015.	23
Tabela 5. Parâmetros de processo utilizados nos experimentos – Testes 1 ao 5.....	25
Tabela 6. Resultados do limite de resistência e escoamento do material ao longo do processo de trefilação e desvio padrão	29
Tabela 7. Resultados dos ensaios de microdureza para todos os testes de trefilação com desvio padrão.....	36
Tabela 8. Resultados dos ensaios de microdureza vickers para todos os testes de trefilação com desvio padrão.....	37

1 INTRODUÇÃO

Hoje as indústrias procuram produções cada vez mais altas a um menor custo possível e, para isso, se fazem necessários estudos na área de processo produtivo para otimização, sempre buscando um produto com qualidade que atendam às normas nacionais e internacionais.

Os vergalhões CA-60 produzidos pelo processo de conformação mecânica a frio a partir do fio máquina, conhecido como trefilação, são os principais produtos empregados no setor da construção civil, fabricação de pregos e arames em si. Utiliza-se de aços carbono, e esse processo visa a uma melhoria de resistência mecânica em relação aos processos de conformação a quente, e o aspecto superficial do produto, já que não gera carepa. As vantagens de se utilizar aços de baixo carbono são custo relativamente baixo e a possibilidade de obtenção de uma resistência mecânica maior com o grau de encruamento do material.

Para tanto, faz-se necessário dar atenção especial ao detalhe técnico do processo, no caso o de trefilação, como o percentual de redução por passe, ângulo de fieira e tipo de lubrificante utilizado na influência direta na produtividade e na qualidade do produto. O foco do trabalho é a produção de arames trefilados a partir do fio máquina de aço SAE 1015 para o emprego na fabricação de pregos e vergalhão CA-60 que é utilizado na construção civil.

Atualmente, o processo da Metal Mecânica Maia (M.Maia) utiliza somente o ângulo de 12° nas fieiras para todos os passes e o percentual de redução de área nunca foi utilizado como controle de parâmetro; o processo sempre se baseou na “experiência” de terceiros, sem um detalhamento técnico mais preciso e o que isso poderia influenciar nas propriedades mecânicas finais do material produzido. Mesmo com essa falta de informação, pode-se até produzir, porém não há um indicativo se essa maneira é realmente a ideal para o processo. Já que a literatura indica relações entre ângulo de fieira e o percentual de redução, além do tipo de lubrificante adequado, viu-se, então, a necessidade de realizar o estudo para tentar por em prática a teoria proposta.

Finalmente, serão comparadas as mudanças obtidas pela aplicação dos novos testes realizados com o processo feito atualmente para tentar obter um parâmetro ideal e propor melhorias ao processo de trefilação. O nosso estudo visa à produção do arame trefilado de 3,4mm de diâmetro em três e quatro passes.

2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo avaliar e entender as variáveis que influenciam nas propriedades mecânicas e microestruturais no processo de trefilação. O objetivo específico é verificar a melhor configuração de parâmetros para padronização e obtenção de um produto com qualidade.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processo de Trefilação

A trefilação consiste em tracionar um material através de uma matriz de dimensão conhecida e controlada (BUTTON, 2001). Consiste em submeter os rolos de fio-máquina a uma deformação a frio, através de um procedimento de “estiramento” do aço, como se refere a NBR 7480 (NBR 7480, 1996). Dessa forma, os fios de aço são forçados a passar através de vários anéis ou fieiras, cujo diâmetro de entrada (em cada fieira) é maior que o diâmetro de saída. O resultado é uma deformação microestrutural, com alongamento dos grãos paralelamente ao esforço de tração, conforme se vê na Figura 1.

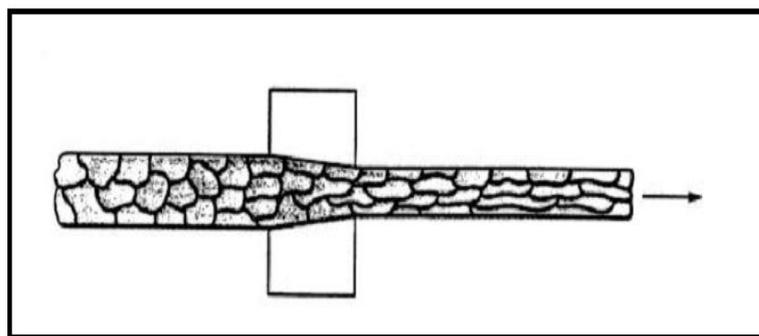


Figura 1. Ilustração do processo de trefilação, destacando a redução de seção do aço e uma orientação preferencial dos grãos, segundo a direção paralela ao esforço de tração (SHACKELFORD, 1996).

Na fabricação de arames de aço, utiliza-se o fio-máquina como matéria-prima, e o seu diâmetro pode variar de acordo com a especificação do produto final a ser obtido, principalmente devido aos equipamentos que a indústria possui. A bitola mais comumente utilizada é a de 5,5 milímetros de diâmetro.

O fio-máquina, antes de ser trefilado, será decapado mecanicamente para retirada da carepa; antes de entrar no primeiro passe, ele passa por uma corda ou escova que visa remover mais ainda a carepa. Cada máquina possui uma sequência de redução de área que é conhecida como passes de trefilação. Em cada passe, o material sofrerá uma redução de área, até que, no último passe, lhe será conferido o diâmetro final.

Não se recomenda uma redução de área entre um passe e outro maior do que 30%. Segundo (WRIGHT, 2002), o percentual máximo de redução recomendado pela America Wire Gage é de 20,7%, porém, na prática, se utiliza 30 a 35%, dependendo da condição do processo. O autor cita, ainda, em seu trabalho que, na trefilação de arames muito finos, costumam-se utilizar frequentemente diminuições nos percentuais de redução, desde que a força de trefilação esteja em equilíbrio com possíveis problemas de quebras, que têm como origem, por exemplo, inclusões existentes, defeitos.

Em cada passe, têm-se um lubrificante e uma matriz conhecida como fieira, que é usualmente constituída de uma carcaça metálica com núcleo de metal duro. Esse núcleo de dimensão controlada é que dará a forma do produto naquele passe. No momento em que a fieira não consegue mais manter o dimensionamento inicial, devido ao desgaste natural do processo, ela deve ser substituída por outra de mesma característica dimensional anterior.

A pressão exercida pelo processo de trefilação na fieira é muito importante. Seu efeito pode acarretar na redução da vida útil da fieira e má qualidade superficial do arame. Ela pode ser considerada como a força por unidade de área que o arame exerce sobre a superfície da fieira, e é quase impossível de ser medida diretamente (WRIGHT, 2003). Em cada fieira, se tem um sistema de refrigeração para evitar que o calor gerado pelo atrito desta com o material sendo trefilado cause um aumento excessivo de temperatura. Uma temperatura alta durante o processo causa diminuição na vida útil da ferramenta e prejudica a lubrificação e as propriedades finais do produto (El-domiaty & Kassab, 1998). A temperatura ainda pode limitar o projeto de reduções por passe. Deve-se levar em conta uma dada tensão de trefilação que precisa estar vinculada à real tensão de trabalho e à geração de calor (WRIGHT, 2002).

3.2 Propriedades Mecânicas na Trefilação

As propriedades mecânicas do arame aumentam no processo de trefilação, conforme aumenta o encruamento causado pela redução de área nos sucessivos passes (trabalho a frio). No entanto, o alongamento e a estricção diminuem, conforme pode ser visto na Figura 2.

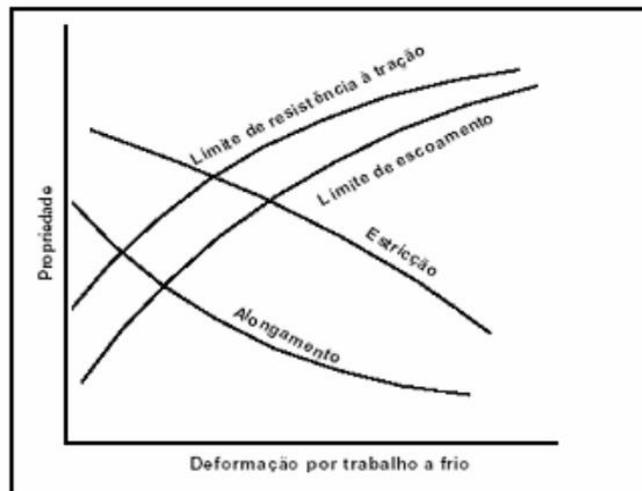


Figura 2. Variação das propriedades mecânicas com a Trefilação. (BUTTON, 2001)

Para ser calculada a redução de área por passe no processo de Trefilação, lembrando que não há variação de volume envolvida, a fórmula mais usada é a verificada na Equação 1:

$$r = 1 - \left(\frac{d}{do}\right)^2 \quad \text{Equação 1}$$

Onde r é a redução de área, do é o diâmetro inicial e d é o diâmetro final.

Como exemplo, a Tabela 1 apresenta uma série de dados para barras de aço trefiladas a frio. Esse aumento de resistência acarreta em perda de ductilidade, geração de tensões residuais e distorção interna.

Tabela 1. Alguns dados de comparação entre barras de aço da série SAE 10XX laminados a quente com barras trefiladas a frio. Adaptada de (NAKAGIRI, YAMANO, *et al.*, 2001).

Aço	Diâmetro (mm)	Condição	σ_{ys} (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	Along (L0=50mm)	Redução de área (%)	Dureza (HB)
1006	19 a 32	Laminado a quente	170	305	30	55	86
		Trefilado a frio	285	340	20	45	95
1015	19 a 32	Laminado a quente	190	345	28	50	101
		Trefilado a frio	325	385	18	40	111
1025	19 a 32	Laminado a quente	220	400	25	50	116
		Trefilado a frio	370	440	15	40	126
1030	19 a 32	Laminado a quente	260	470	20	42	137
		Trefilado a frio	440	525	12	35	149

O processo de trefilação aumenta o limite de escoamento em torno de 40% e a resistência à tração ao menos em 10%. Quando uma resistência maior é necessária, as peças que serão trefiladas podem sofrer tratamento térmico anteriormente, aumentando, assim, sua resistência à tração ou, ainda, uma modificação química do material (Boyer,2002).

A análise do processo de trefilação envolve a consideração de uma série de problemas tais como: esforço necessário para executar a operação, lubrificação na interface feira/metálico, acabamento e propriedades mecânicas finais do produto, evolução térmica do produto sob processamento, dentre outros (Nakagiri,2001; Macherauch,1987).

O gráfico apresentado na Figura 3 mostra a melhora da resistência à tração que se obtém em aços de baixo, médio e alto carbono. Nota-se que, quanto maior o teor de carbono, tanto maior é a melhora na resistência a tração por trefilação; nota-se, ainda, que a melhora dessa propriedade é bem mais significativa quando se passa de 70% a 80% de redução de área por trefilação.

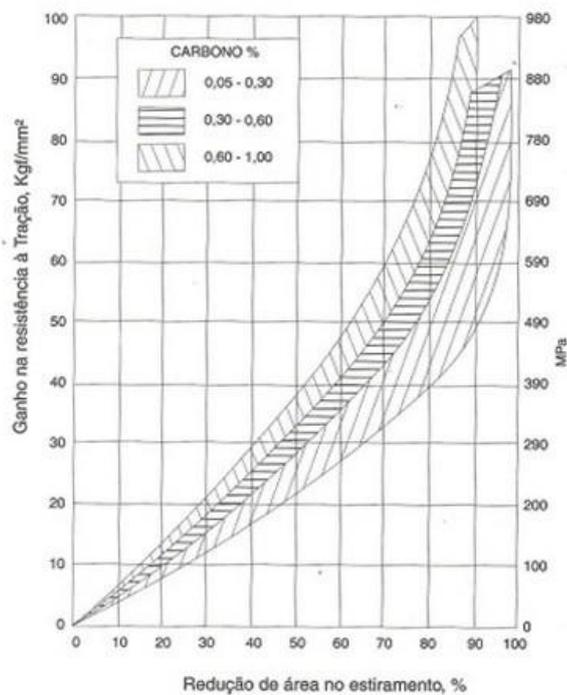


Figura 3. Efeito do encruamento na resistência à tração de aços-carbono.

3.3 Preparação Superficial

A superfície do fio máquina é coberta por uma camada de óxidos metálicos, também chamado de carepa, cuja dureza é de 3 a 10 vezes maior que a do aço e é composta por 3 camadas: Hematita, Magnetita e Wustita, conforme mostrada na Figura 4. A espessura da carepa de cada camada de óxido depende da temperatura da laminação, da atmosfera durante o período de aquecimento e da velocidade do resfriamento.

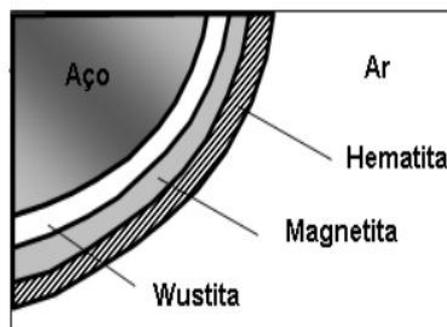


Figura 4. Tipos de carepas no fio máquina (Cetlin, 2002).

3.3.1 Decapagem Mecânica.

Nesse processo, o fio-máquina é flexionado em 5 polias. Como a carepa tem uma dureza alta, ela se rompe e cai quando o material é flexionado. O fio-máquina é dobrado em 180° nos dois planos (vertical e horizontal), removendo, assim, a carepa grossa. O processo de decapagem mecânica possui um grande diferencial quando comparado com a decapagem química, já que não há poluição ambiental através de ácidos (H_2SO_4 ou HCl), além de ser mais econômica.

A decapagem remove a carepa com o mesmo êxito da decapagem química e ainda dispensa o custo do ácido e o custo do tratamento do resíduo formado. Além disso, o produto gerado no processo mecânico é uma carepa em formato de pó e seca, que pode ser reaproveitada em aciarias e vendida para outras aplicações. Por esses motivos, a decapagem mecânica vem sendo usada cada vez mais pelas indústrias, pois, com um simples decarepador por flexão composto por 2 a 12 escovas, roletes e polias, pode-se criar um decarepador mecânico e eficaz (Dove, 1979).

Na Figura 5, temos um exemplo de decarepador mecânico. Trata-se de um decarepador por flexão composto por 5 polias, onde o fio-máquina é flexionado através dessas polias angularmente entre si, de maneira que todo o seu perímetro seja flexionado e sua carepa expulsa da superfície. Após essa etapa, o material passa por cordas ou escovas que têm a função de remover a carepa mais fina que, por ventura, ainda se encontre no material.



Figura 5. Decarepador mecânico utilizando 5 roldanas (Foto fornecida pela MMAia).

3.4 Matriz (Fieira)

A ferramenta mais difundida para realizar o processo de trefilação é a fieira. A fieira convencional é composta por uma carcaça de aço, normalmente aço SAE 1045, e um núcleo de carbeto de tungstênio sinterizado. Além disso, utiliza-se núcleo de diamante (natural ou policristalino), que proporciona uma resistência maior ao desgaste e geralmente é utilizado para trefilar arames mais finos.

O núcleo da fieira é composto por cinco partes, conforme Figura 6 (Adaptada de Cetlin, 2002):

Raio de entrada: tem como função eliminar cantos vivos que poderiam danificar o fio máquina que entra na fieira.

Cone de entrada: sua principal função é auxiliar a entrada de lubrificante na região do cone de trabalho.

Cone de trabalho: região onde ocorre a redução da secção do material. O ângulo α do cone de trabalho é o principal responsável pela quantidade de lubrificante que passa pela fieira, além de ter influência direta no grau de esforço feito pelo arame. Se for muito pequeno, provoca uma elevada tensão na trefilação e um aumento excessivo no atrito. À medida que aumenta, atinge um valor ótimo, onde o atrito e a tensão alcançam seus menores valores. Se continuar aumentando, podem ocorrer excessiva deformação na superfície do material e pouca conformação plástica na parte central do arame.

Paralelo: tem a função de dar o acabamento superficial do material. Normalmente, o comprimento do paralelo é de 0,03 a 0,05 do diâmetro de saída.

Cone de saída: tem como função proteger o paralelo contra quebras.

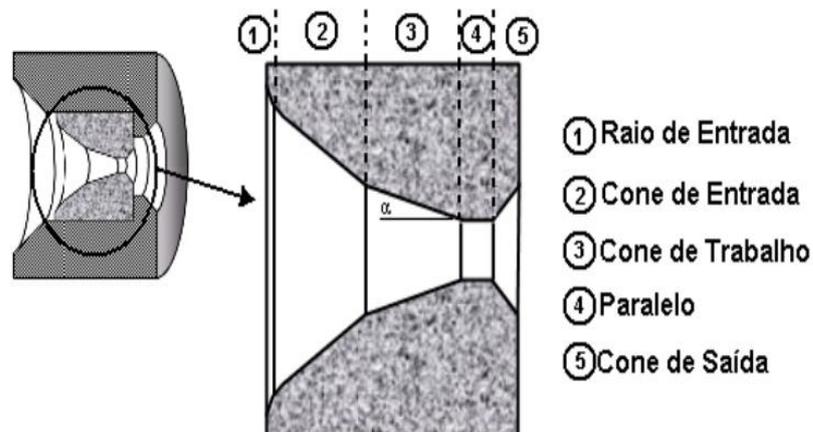


Figura 6. Fieira e parte do núcleo. Adaptada de Cetlin, 2002.

3.4.1 Preparação da Fieira

Normalmente, os núcleos de carboneto de tungstênio têm tamanhos e furos padronizados. Inicialmente, são abertos os ângulos de saída e entrada e o raio de entrada por um processo de abrasão, empregando-se pinos cônicos de aço ou ferro fundido que giram e têm movimento alternativo na direção do seu eixo. Empregam-se pastas abrasivas (mistura de vaselina e tetracloreto de boro) entre os pinos e o núcleo. O ângulo de trabalho é aberto utilizando o mesmo método, porém com granulometria menor.

Para abrir o paralelo, podem ser utilizados pinos com ponta pouco cônica e fieira presa a um cabeçote giratório ou através de equipamentos que utilizam cabeçote giratório e fio de aço com movimento alternativo na direção do eixo da fieira. O polimento da fieira é feito com pinos de madeira e algodão na ponta com a fieira girando e os pinos fixos com pós-abrasivos de diamante.

Essas máquinas (Figura 7a e 7b) servem para abrir e retificar as fieiras e trabalham com movimento de rotação e de percussão das agulhas já no ângulo desejado, girando em sentido contrário ao da fieira e desbastando o metal duro através de abrasivos especiais e de pó de diamante de granulação apropriada. Possuem velocidade regulável de rotação das agulhas e das fieiras e podem, em poucos minutos, restaurar os cones de trabalho das fieiras.

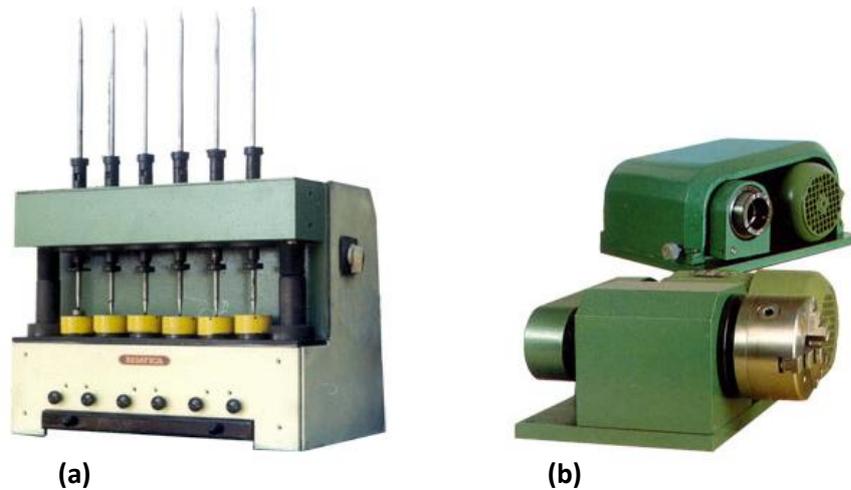


Figura 7.(a) Máquina retificadora de fieira. (b) Máquina para polimento e calibração final. Adaptada de bemfica.

3.5 Lubrificação

Lubrificante é qualquer substância, fluido ou sólido que, quando entre duas superfícies, reduz tanto a fricção entre as superfícies quanto o desgaste das mesmas. O objetivo do lubrificante é impedir o contato direto entre dois corpos, no caso da trefilação, e evitar o contato direto entre o arame e a fieira.

A escolha correta do lubrificante é uma das grandes dificuldades existentes em qualquer processo. Essa escolha baseia-se em parâmetros como os materiais, a ferramenta, a temperatura e a velocidade do processo. Assim, um bom lubrificante deve apresentar as seguintes características (Button, 2002):

- Um baixo coeficiente de atrito;
- Garantir a completa separação das superfícies da matriz e do material trefilado;
- Ser resistente ao calor;
- Favorecer o bom acabamento superficial do produto trefilado;
- Ser limpo e resistir à pressão de deformação;

Os lubrificantes utilizados no processo de trefilação são divididos em dois grupos: lubrificantes líquidos e lubrificantes sólidos.

Os lubrificantes líquidos são normalmente de origem animal, vegetal ou mineral. São utilizados para a trefilação de arames finos e recobertos com camadas de cobre, zinco e latão a altas velocidades.

Os lubrificantes sólidos são à base de sabões, talco, mica, cal, grafite, dissulfeto de molibdênio e de tungstênio. Os sabões são de uso mais comum entre as trefilações de arame, que são depositadas nas “saboneteiras” que ficam posicionadas antes da caixa de fieira. A maioria dos sabões tem a composição à base de estearato de cálcio e sódio

A trefilação de um arame ou barra, na ausência ou na seleção inadequada de um lubrificante, pode impossibilitar todo o processo. Portanto, é necessário utilizar um agente lubrificante que facilite a passagem do material pela matriz, formando uma camada entre elas, de maneira a diminuir o atrito do processo. Esse atrito entre a fieira e o arame, que é inevitável mesmo com uma excelente lubrificação, causa um aquecimento na região de contato, e o lubrificante selecionado deve suportá-lo sem perder suas propriedades químicas e físicas. Uma parte desse lubrificante será queimada no aquecimento, formando o que definimos como charuto, e outra parte é carregada junto com o arame. Essa camada residual de sabão será importante para os passes seguintes e, mais ainda, no caso de uma retrefilação em outra máquina. Existem muitos fatores que influenciam na agregação de sabão ao arame, como a redução de área de cada passe, velocidade da máquina, tipo e composição química de lubrificante escolhido. A Figura 8 mostra o esquema do sabão entre a fieira e o arame para diminuir o atrito.

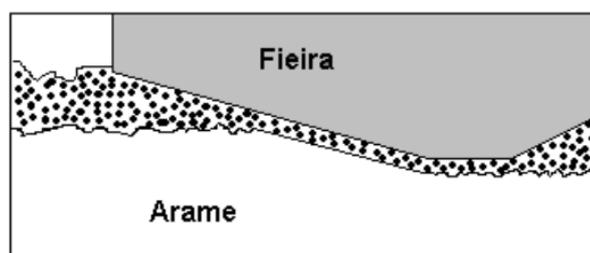


Figura 8. Lubrificação no processo de trefilação. Adaptada de Dove, 1979.

Hillery & McCabe (1995) definem que um lubrificante ideal é aquele que deve ser facilmente aplicável ao arame em movimento, garantindo um contínuo filme entre o material e a fieira durante a deformação (resultando em uma superfície isenta de defeitos) e reagindo o menos possível com a fieira e o material.

Como existe variação de bitola de entrada do fio-máquina, que é normal do processo de laminação, devemos projetar ângulos de entradas nas fieiras do primeiro passe sempre maiores do que nos demais passes. Isso faz com que tenhamos uma boa lubrificação no primeiro passe, que será fundamental para os passes seguintes (Enghag, 2003).

3.6 Encruamento

O aço trefilado, sob o ponto de vista estrutural, sofre escorregamento de cristais, de forma que deformações permanentes ou plásticas resultam após todo o processo (Jastrzebski, 1959). Diz-se, então, que o aço sofreu encruamento. Dessa forma, escorregamentos posteriores tornam-se mais difíceis, e a consequência imediata é o aumento na dureza (Van Vlack, 1970). Shackelford (1996) destaca que o mecanismo que explica esse aumento na dureza está baseado na resistência à deformação plástica devido à alta densidade de discordâncias produzidas no trabalho a frio, entendendo-se essa densidade como o comprimento das linhas de discordâncias por unidade de volume. A estrutura encruada, portanto, apresenta grãos severamente distorcidos, sendo bastante instável; os cristais, nesse caso, têm mais energia em comparação aos não deformados, já que estão cheios de discordâncias e outras imperfeições.

Outras propriedades são significativamente alteradas com a trefilação, a saber, tem-se aumentados o limite de escoamento e a resistência à tração, reduzindo-se, em contrapartida, a ductilidade (estricção e alongamento), tendo em vista que parte da elongação é “consumida” durante a deformação a frio (Van Vlack, 1984).

A Figura 9 mostra diagramas de tensão-deformação para um aço encruado e outro recozido. Podem-se observar evidentes os comentários do parágrafo anterior, além do comportamento muito menos tenaz ou mais frágil do aço encruado.

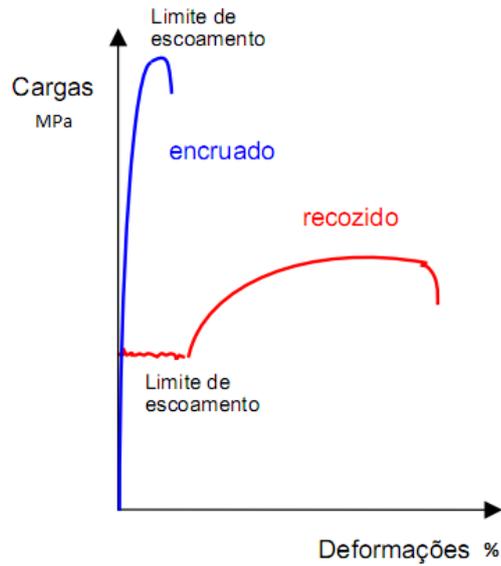


Figura 9. Comparação entre o aspecto do diagrama tensão-deformação de um aço recozido e outro encruado.

A Tabela 2 destaca e compara as variações em algumas propriedades do aço de uma forma geral no estado recozido e encruado.

Tabela 2. Variação da resistência à tração, dureza, alongamento e resistência ao choque, com a passagem de um aço recozido para encruado. (Colpaert, 1974)

Propriedades Aço	Recozido	Encruado
Resistência a Tração	400 MPa	700 MPa
Dureza Brinell	100	200
Alongamento em 10d	35%	5%
Resistência ao choque	18kgm	2kgm

3.7 Deformação durante a Trefilação

A deformação sofrida por uma barra trefilada pode ser interpretada através da análise da Figura 10. Comparando a geometria de um elemento próximo à superfície da barra antes da sua entrada na zona de deformação e após sua passagem pela fiação, é possível notar que o elemento passa por estiramento e cisalhamento. À medida que se caminha da superfície da barra para o seu centro, o efeito do cisalhamento torna-se menor, enquanto o estiramento se mantém, caracterizando, assim, uma heterogeneidade da deformação ao longo da seção transversal da barra.

A deformação responsável pelo estiramento da barra é denominada deformação homogênea, enquanto a deformação que causa o cisalhamento é denominada redundante. O cisalhamento em nada contribui para as mudanças dimensionais da barra sendo trefilada, apenas distorcendo o elemento.

A deformação redundante será maior para grandes semiângulos de trefilação e pequena redução de área. O atrito, conforme análises experimentais, não influencia significativamente o valor da deformação redundante (Helman, 1993).

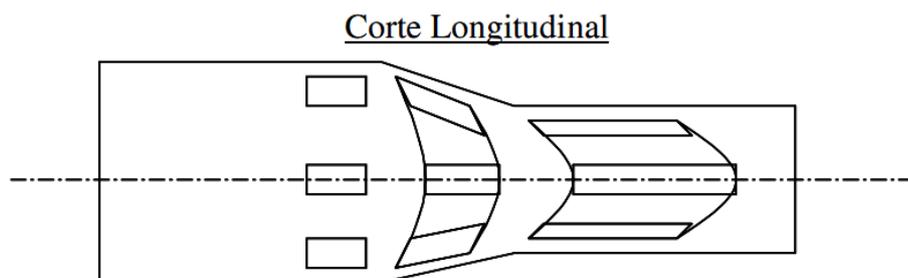


Figura 10. Deformação nos elementos da barra sendo trefilada.

3.8 Análise do Processo de Trefilação de Barras

A análise do processo de trefilação envolve a consideração de uma série de problemas. Abaixo serão abordadas as previsões do esforço necessário para executar a operação e como os metais se deformam ao passar pelas fiação. Apesar da trefilação em barras de seção transversal circular aparentar ser um dos

processos de conformação mecânica mais simples, as discrepâncias existentes entre os resultados previstos pelos diferentes modelos teóricos para os esforços de trefilação e os valores medidos indica que este processo está longe de ser compreendido em profundidade.

Alguns métodos para analisar o problema de previsão dos esforços necessários para a realização do processo de trefilação de barras circulares (Cetlin, 2005) serão citados a seguir, porém não serão discutidos neste trabalho:

- Deformação Homogênea
- Método dos discos
- Trabalho redundante

Os esforços serão analisados em função basicamente de quatro variáveis: a redução de área, o ângulo da matriz, as condições de atrito na interface feira-metal e as propriedades mecânicas do material.

3.8.1 Deformação Homogênea

Define-se tensão de trefilação σ_f como a força F necessária para executar a operação, dividida pela área da secção transversal do metal após a trefilação A_f . A tensão de trefilação é expressa pela Equação 2 que, para seções circulares, resulta na Equação 3, onde Y é a tensão de escoamento do material já trefilado, A_i , é a área inicial, A_f é a área final, D_i , o diâmetro inicial, D_f , diâmetro final. Esse método desconsidera o efeito do atrito e da deformação redundante.

$$\sigma_f = Y \ln\left(\frac{A_i}{A_f}\right) \quad \text{Equação 2}$$

$$\sigma_f = Y \ln\left(\frac{D_i}{D_f}\right)^2 = 2Y \ln\left(\frac{D_i}{D_f}\right) \quad \text{Equação 3}$$

3.8.2 Método dos Discos

Esse método baseia-se em considerações de equilíbrio realizadas sobre um elemento que está sendo deformado. A descrição do processo de deformação é idealizada, como indicado na figura 11, juntamente com suas dimensões geométricas e nomenclatura a ser empregada.

A direção axial é considerada como a de variação dominante das tensões e serão expostas as tensões em planos perpendiculares ao eixo. Na figura 11, apresenta-se um elemento da zona de deformação, com as tensões que atuam sobre ele. Existem três forças que devem ser consideradas, cujas componentes na direção axial são: força originada pelas tensões longitudinais, força originada pela pressão aplicada pela matriz e força originada pelas tensões de atrito.

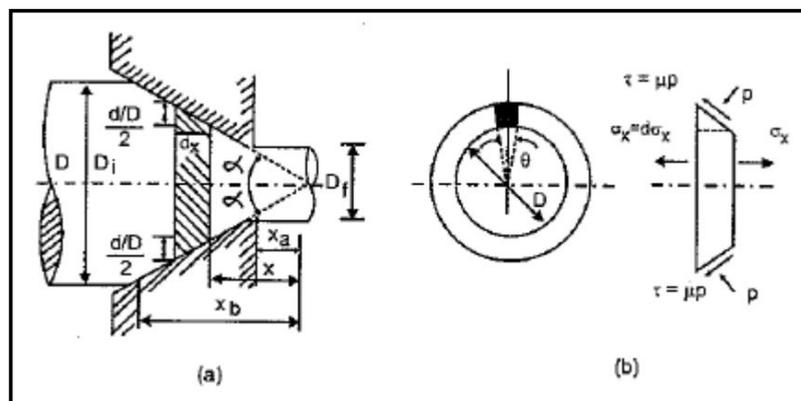


Figura 11. Detalhe da geometria e as tensões envolvidas no processo de trefilação de acordo com o método dos discos (Cetlin, 2005)

Desenvolvendo matematicamente as equações das três forças consideradas, obtém-se a Equação 4 que representa a tensão de trefilação, onde $B = \mu \operatorname{ctg} \alpha$. A Equação 4 permite calcular a tensão de trefilação levando em consideração a influência do atrito e do encruamento do material.

$$\sigma_f = Y \frac{1 + B}{B} \left[1 - \left(\frac{D_f}{D_i} \right)^{2B} \right]$$

Equação 4

3.8.3 Trabalho Redundante

Existe outro aspecto não considerado na análise anterior, presente na maioria dos processos de conformação mecânica, que será ilustrado na Figura 12. Será acompanhada a trajetória de um elemento de metal próximo à superfície. Este se aproxima da matriz com um movimento paralelo ao eixo. Ao entrar em contato com a matriz, adiciona a sua velocidade inicial de um componente perpendicular ao eixo. Como se deduz na Figura 12, o material sofre um processo interno de deformações cisalhantes (ou distorção), além daquele necessário para a trefilada. Essa deformação extra é chamada de deformação redundante, ou também trabalho redundante, desde que envolva trabalho de deformação plástica. É fácil compreender que o trabalho redundante (ou distorção) será maior quanto maior for o ângulo da matriz. Como o atrito influi na geometria do fluxo, o trabalho redundante não seria independente de μ . No entanto, foi demonstrado experimentalmente que, para uma ampla faixa de materiais e lubrificantes, essa dependência não afeta de forma sensível o trabalho redundante, o qual dependeria somente da geometria da fieira. Cetlin demonstrou ainda que esse trabalho redundante cresce ao diminuir a redução imposta ao metal (Cetlin, 2005).

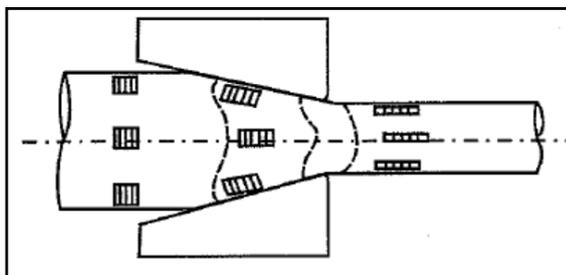


Figura 12. Esquemática da deformação redundante (Cetlin, 2005).

Como o trabalho redundante envolve deformação plástica, também contribui para o processo de endurecimento do material. Dessa forma, comumente para um só passe de trefilação, a tensão de escoamento de um material trefilado é superior à tensão de escoamento de um material com a mesma quantidade de deformação homogênea.

Usualmente, o efeito do trabalho redundante será maior nas camadas superficiais do que naquelas próximas ao eixo da barra. Em consequência, o processo de trefilação com ângulos grandes conduzirá a uma maior heterogeneidade das propriedades mecânicas na seção transversal, e as camadas externas estarão mais encruadas, ou seja, teremos uma maior geração de tensões residuais na superfície. Como na prática industrial empregam-se pequenos ângulos e grandes reduções, é, em geral, possível desprezar o efeito do trabalho redundante na avaliação das tensões de trefilação.

3.9 Ângulo de Fieira

Existem equacionamentos para quantificar o efeito destas duas variáveis (α e m) sobre o consumo de energia no processo de trefilação. No caso do semiângulo, têm-se equações que correlacionam o coeficiente de atrito e o grau de redução para determinados valores de semiângulo que minimiza a energia gasta no processo de trefilação. Helman e Cetlin (1993) citam uma extensa equação, à qual este ângulo ótimo deve satisfazer, que pode ser simplificada a equação 5:

$$\alpha_{otimo} = \sqrt{\frac{3}{2} \cdot m \cdot \ln\left(\frac{D_i}{D_f}\right)} \quad \text{Equação 5}$$

Os resultados do cálculo do semiângulo estão mostrados na Figura 13a. No gráfico da Figura 13b, comparam-se os valores da tensão de trefilação relativa (σ_f/Y) em função do semiângulo da fieira. Também cita-se que Y é a tensão de escoamento média, com valores obtidos experimentalmente (Wistreich, 1959) com as reduções de 0, 10, 20, 30 e 40%. O m é definido como a área de contato entre matriz e barra e é relativamente baixo.

Neste gráfico observa-se que o ângulo ótimo aumenta com o grau de redução por passe.

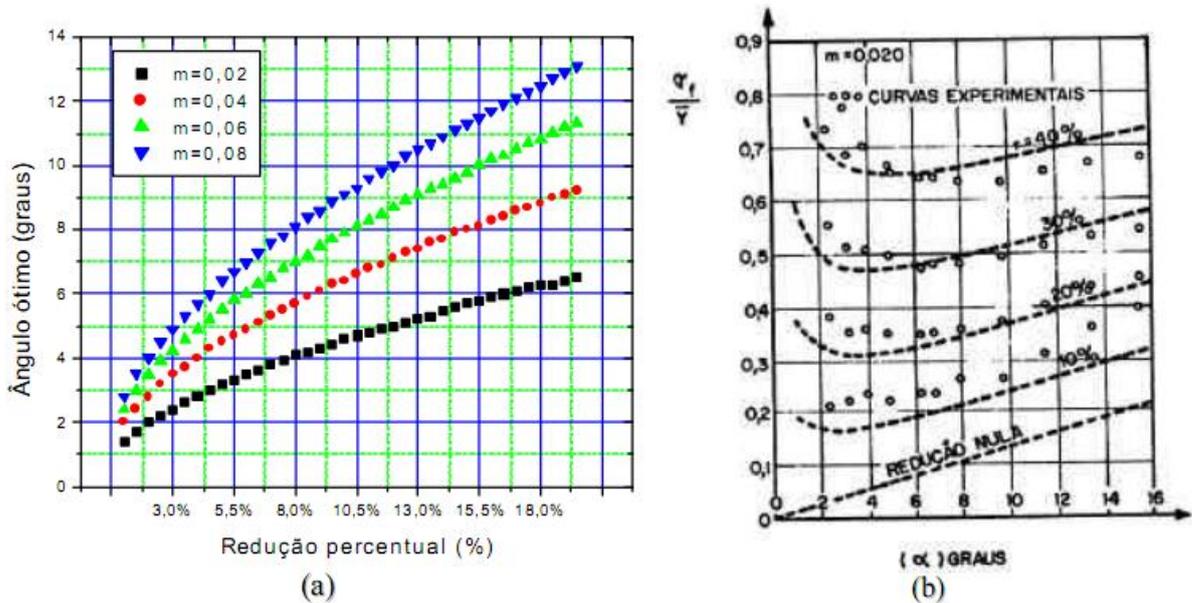


Figura 13. (a) Valores do semiângulo ótimo segundo calculado pela equação 5 e (b) variação na tensão de trefilação de acordo com o semiângulo utilizado, Helman e Cetlin (1983).

Segundo Dieter (1988), os processos comerciais de trefilação de arames empregam semiângulos (α) na faixa entre 6 a 10° e reduções de 20%.

Por outro lado, Button (2002) cita que são utilizados semiângulos (α) variando de 5 a 10° para a trefilação de barras e estiramento de tubos, e os semiângulos (α) variando de 5 a 12°, para reduções de 14 a 40%, respectivamente. Este mesmo autor apresenta uma tabela com maiores informações a respeito, reproduzida na Tabela 3.

Tabela 3. Alguns valores indicados para ângulos de matriz (2α) em graus.

Redução de área por passe (%)	Material a ser conformado			
	Aço Baixa resistência	Aço Alta resistência	Cobre	Alumínio
10 a 15	8 a 12°	6 a 8°	12 a 14°	16 a 20°
16 a 22	12 a 16°	8 a 12°	14 a 16°	20 a 24°
22 a 30	16 a 20°	-	16 a 22°	24 a 30°

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os testes e ensaios nos arames foram realizados na Metal Mecânica Maia (MMAia) no Setor de Trefilação, bem como no Laboratório de Caracterização Mecânica (LACAM) e parte no Laboratório de Engenharia de Soldagem (ENGESOLDA), pertencentes ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Ceará.

Na MMAia foram realizados os testes de trefilação, utilizando variação de ângulo de fiação e o percentual de redução de área, onde a configuração de parâmetros explorada é mostrada na Tabela 5. Também foram realizados os ensaios de tração para análise do limite de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento em cada passe do processo, desde o fio máquina até o arame final produzido.

No LACAM foi realizada a preparação metalográfica do corpo de prova (corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque) para análises da microestrutura via microscópio ótico de algumas etapas do processo, bem como a análise da microdureza em cada passe do processo.

No ENGESOLDA foram realizadas as análises da microestrutura via microscópio ótico e a medição do tamanho de grão ASTM.

Os corpos de prova trefilados fornecidos para os ensaios de tração possuem 200mm de comprimento e para análise de microestrutura e microdureza possuem 100mm de comprimento.

4.1 Materiais e Equipamentos

Para o processo de trefilação foi utilizado o fio máquina de aço SAE 1015 de diâmetro 5,5mm, corrida N° 545451/1 da SN Seixal – Siderúrgica Nacional S/A, cuja composição química, conforme o fabricante é apresentada na Tabela 4:

Tabela 4. Composição química do fio máquina - aço SAE 1015.

C [%]	P [%]	S [%]	Mn [%]	N [%]
0,13	0,022	0,031	0,45	0,009

Para evitar o efeito de composição química nas propriedades mecânicas, a bobina de fio máquina utilizada será do mesmo lote e do mesmo fornecedor. Na Figura 14 é apresentada a microestrutura do fio máquina como recebido.

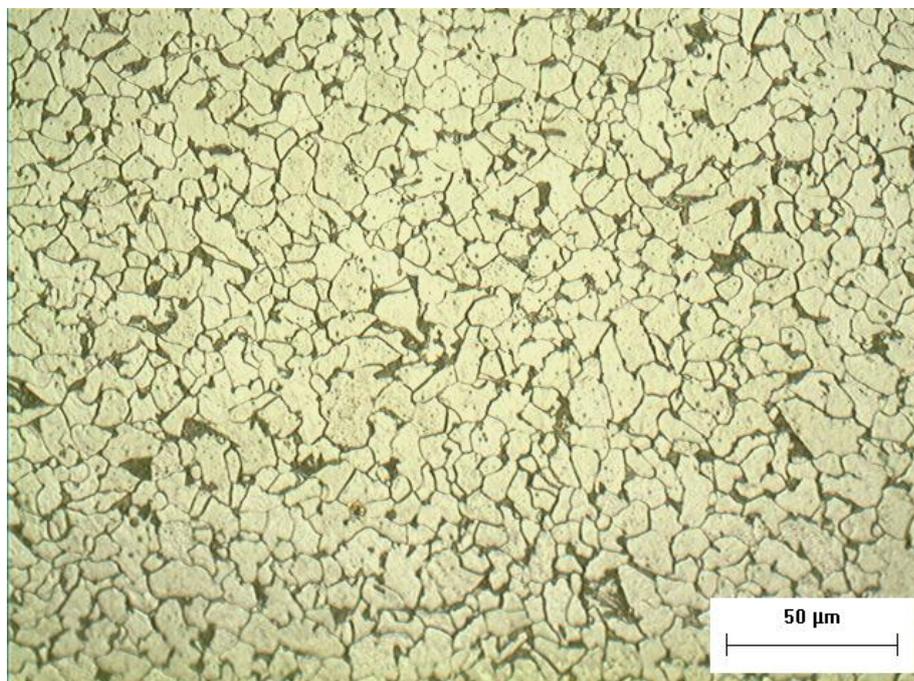


Figura 14. Microestrutura do produto laminado. Aumento de 500X. Ataque Nital 2%.

A produção do arame trefilado será realizada numa máquina com capacidade de trefilação em até 4 passes apresentada na Figura 15.



Figura 15. Máquina de Trefilação com 4 passes. (Foto fornecida pela MMAia)

Foram utilizados três tipos de lubrificantes do fornecedor FRIMOX apresentados abaixo com algumas características:

FRIMOTREF 84

Lubrificante rico em aditivos E.P. (Extrema Pressão), de granulação baixa, permitindo grandes deformações, sendo recomendado no uso das primeiras fieiras. Confere uma película de boa fixação na superfície do material, permitindo a realização de operações posteriores de deformação a frio.

FRIMOTREF 86K

Lubrificante à base de cálcio para trefilação de aços de baixo e médio teor de carbono, quando são decapados quimicamente ou mecanicamente. É usado para trefilar arames de todos os tipos de aço que necessitem de boa lubricidade para passes sequenciais e operações posteriores.

FRIMOTREF 81MF

Lubrificante anidro, à base de estearatos insolúveis, que conferem boa lubricidade ao processo de trefilação de arames de médio e alto teor de carbono e aços liga que foram decapados por processo químico. Contém aditivos E.P.

Fieiras

Foram utilizadas fieiras com o núcleo de metal duro e carcaça de aço carbono 1045 do fornecedor Durit e foram fabricadas conforme o ângulo e o percentual de redução mostrado na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros de processo utilizados nos experimentos – Testes 1 ao 5.

Teste 1					
Bitola (mm)	Fio Máquina	1° passe	2° passe	3° passe	4° passe
		5,5	4,8	4,05	3,65
Redução de área (%)	-	23,8	29	19	13
Ângulo 2α (°)		12	12	12	12
Teste 2					
Bitola (mm)	Fio Máquina	1° passe	2° passe	3° passe	4° passe
		5,5	4,65	4,15	3,76
Redução de área (%)	-	28,5	20	18	18
Ângulo 2α (°)		18	16	14	12
Teste 3					
Bitola (mm)	Fio Máquina	1° passe	2° passe	3° passe	4° passe
		5,5	4,65	4,15	3,76
Redução de área (%)	-	28,5	20	18	18
Ângulo 2α (°)		16	14	14	12
Teste 4					
Bitola (mm)	Fio Máquina	1° passe	2° passe	3° passe	
		5,5	4,25	3,76	3,4
Redução de área (%)	-	40,0	22	18	
Ângulo 2α (°)		18	16	12	
Teste 5					
Bitola (mm)	Fio Máquina	1° passe	2° passe	3° passe	
		5,5	4,25	3,76	3,4
Redução de área (%)	-	40	22	18	
Ângulo 2α (°)		16	14	12	

4.2 Metodologia

Os parâmetros operacionais – reduções de área e ângulos de fieira – utilizados são verificados na Tabela 5. Foram realizados cinco testes de trefilação a fim de obter um comparativo entre as propriedades mecânicas produzidas ao longo da variação de parâmetros. Todos os testes têm o objetivo de produzir o arame de 3,4mm de diâmetro a partir do fio-máquina de 5,5mm de diâmetro. A faixa dos ângulos e as reduções de áreas testadas foram definidas para aços de baixa resistência conforme Button (2002) Tabela 3.

Os lubrificantes utilizados serão analisados apenas para efeito comparativo dos testes e verificar se há mudança nas características estéticas do produto como: brilho, camada residual.

O teste 1 apresenta o experimento realizado antes de qualquer aplicação desse estudo, ou seja, é o processo baseado na experiência de terceiros. Nota-se que não há variação de ângulo de fieira (12°), e a redução de área do 2º passe aumenta (29%) em relação ao 1º passe (23,8%), já que o melhor para o processo seriam reduções decrescentes, pois aliviaria as tensões produzidas e evitaria a quebra do arame. Observa-se, também, o uso no tipo de lubrificante utilizado (FRIMOTREF 84) nos dois primeiros passes, e isso gera um produto mais escuro e com camada residual alta. Nesse teste há casos de quebra nos passes de reduções. Isso provavelmente ocorre devido a uma má aplicação do uso do ângulo de fieira ou de reduções de áreas mal dimensionadas, além do arame final produzido se apresentar muito carregado (escuro) com o lubrificante utilizado, o que gerava reclamações de clientes.

Nos testes 2 e 3, o tipo de lubrificante utilizado nos dois primeiros passes será o FRIMOTREF 86K. Já nos testes 4 e 5, o lubrificante FRIMOTREF 86K será apenas utilizado no primeiro passe. No teste 2, aplicamos a variação dos ângulos de fieira nos três primeiros passes (18°, 16° e 14°) e reduções de áreas decrescentes (28,5%, 20%, 18% e 18%). No teste 3, foram mantidas as reduções de área do teste 2, com mudanças somente nos dois primeiros ângulos da fieira (16° e 14°).

Os testes 4 e 5 são justificados com a tentativa de implantação de melhoria de produção do mesmo material com três passes em vez de quatro passes, sendo menos dispendioso em relação a tempo, custo, mão de obra etc. No teste 4, utilizou-se de apenas três passes para a produção do arame final (3,4mm). Com isso, houve uma grande redução de área no 1° passe (40%). Esse valor, pouco acima do indicado pela literatura, foi aplicado a fim de obedecer ao fato de que diâmetros maiores suportam maiores reduções e permitem uma melhor lubrificação. Nos passes seguintes (2° e 3°), as reduções foram 22% e 18% respectivamente. Já os ângulos foram 18°, 16° e 12° respectivamente.

No teste 5, foram mantidos as reduções de área e o tipo de lubrificante utilizado no teste 4. A mudança ocorreu apenas no ângulo da fieira que foram 16°, 14° e 12° respectivamente. Com essas variações de parâmetros utilizadas, iremos verificar o que as mesmas alteram nas propriedades mecânicas e microestruturais do material trefilado.

4.3 Caracterização Metalúrgica

4.3.1 Preparação das amostras

As amostras dos arames trefilados foram cortadas na cut-off com disco desbastador com fluido refrigerado. Após o corte, as amostras foram embutidas a quente com baquelite.

4.3.2 Preparação dos corpos de prova para microscopia ótica e microdureza.

As amostras foram lixadas utilizando as granulometrias: 100, 220, 320, 400, 600 e 1200. Após o lixamento, as amostras foram polidas com pastas de diamante sintético de 3 μm e 1 μm . Para revelar a microestrutura adequadamente, foi utilizado o reagente Nital 2% durante 15 segundos.

4.3.3 Ensaio de resistência à tração

Os ensaios de tração foram realizados pela máquina EMIC da MMAia, e foram utilizados três corpos de prova para cada passe trefilado com 200mm de comprimento e realizada a média com desvio padrão. Não foi utilizado extensômetro. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma NBR 6892. Os testes de tração do último passe foram realizados após o mesmo ser submetido ao bobinador. Nessa etapa, o material entra em um cabeçote guiado por roletes, ficando em formato espiral; assim é comercializado.

4.3.4 Ensaio de Microdureza

Foram feitos cinco pontos de microdureza em cada amostra, aleatoriamente, e obtida uma média. A carga aplicada foi de 9,807N por um tempo de impressão de 10 segundos, e foi utilizado o Microdurômetro Shimadzu.

4.3.5 Análise microestrutural – Tamanho de grão ASTM

As análises de microestrutura de todos os testes foram realizadas em cada passe de trefilação, para se observar a evolução microestrutural com a redução de bitola do material. Foi verificado somente o tamanho de grão ASTM, utilizando um programa para medição do tamanho de grão fornecido pela Metal Soluções Júnior.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nos testes realizados no processo de trefilação. Os gráficos foram obtidos por meio do programa Origin. As microestruturas foram obtidas pelo programa Image Pro-Plus.

5.1 Propriedades Mecânicas

5.1.1 Ensaio de tração

A Tabela 6 mostra a média e o desvio padrão dos resultados dos ensaios de tração do limite de escoamento (LE) e do limite de resistência (LR) para todos os testes de trefilação.

Tabela 6. Resultados do limite de resistência e escoamento do material ao longo do processo de trefilação e desvio padrão

Média do Limite de Escoamento (MPa) e Desvio Padrão (DP)										
-	Teste 1	DP	Teste 2	DP	Teste 3	DP	Teste 4	DP	Teste 5	DP
FM	327	5,7	327	5,7	327	5,7	327	5,7	327	5,7
1° passe	736	16,7	727	3,0	743	8	797	3	805	7
2° passe	772	1	790,5	1,5	772	6,5	828	2,6	855	9
3° passe	823	3	836	18	832,5	22,5	790	2,6	770	2
4° passe	799	4	769,5	6,5	777	5,5	-		-	
Média do Limite de Resistência (MPa) e Desvio Padrão (DP)										
-	Teste 1	DP	Teste 2	DP	Teste 3	DP	Teste 4	DP	Teste 5	DP
FM	493	4,0	493	4,0	493	4,0	493	4,0	493	4,0
1° passe	752	16	757	1	779	2,5	822	4,6	832	3,6
2° passe	817	3	828	1,5	829	2,5	884	3,5	897	3
3° passe	884	1	887	1	897	4	900	1	883	0,6
4° passe	904	4	849	0,6	878	3	-		-	

O gráfico da Figura 16 apresenta o LE e o LR dos testes 2 e 4 para o 1° e 2° passe partindo do fio-máquina (FM) e compara a influência da redução de área nesses testes. Podemos observar que os valores de LE e LR para o teste 2 no 1° passe são menores devido a menor redução de área aplicada (28,5%) em relação ao teste 4 que utiliza redução de 40% no 1° passe. No 2° passe também observamos esse comportamento, porém com reduções de 20% para o teste 2 e 22% no teste 4. Isso nos mostra que quanto maior o percentual de redução aplicado, maior serão as propriedades mecânicas.

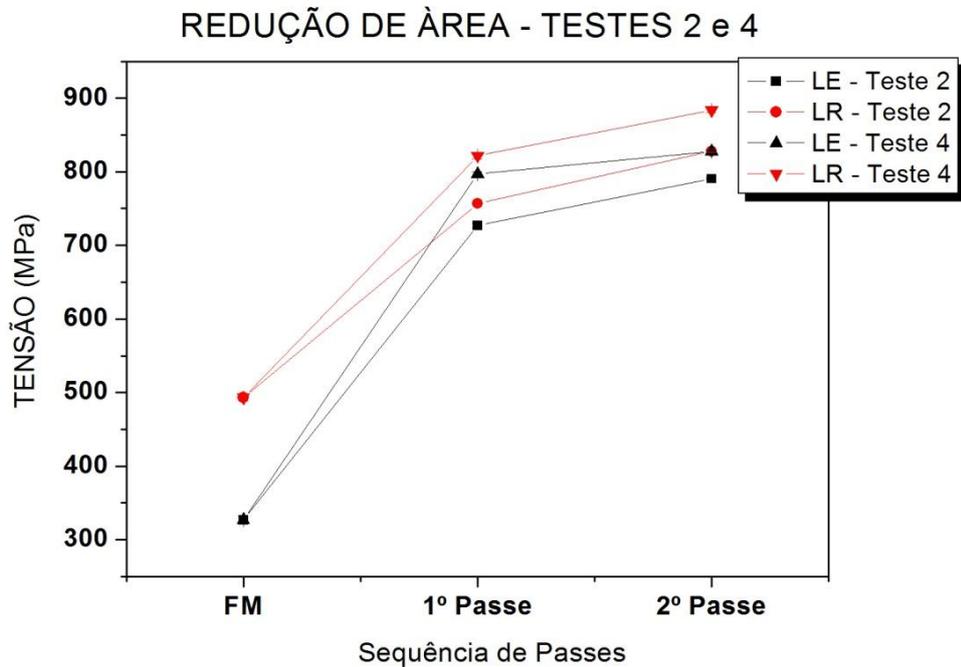


Figura 16. Influência da redução de área no LE e LR dos testes 2 e 4

O gráfico da Figura 17 apresenta a influência da redução de área no LE e o LR dos testes 3 e 5 para o 1° e 2° passe, partindo do fio-máquina (FM). Podemos observar que o 1° passe do teste 3 os valores de LE (743MPa) e LR (779MPa) são menores em relação ao teste 5 LE (805MPa) e LR (832MPa) e isso ocorre devido a menor redução de área aplicada no teste 3 (28,5%) onde no teste 5 se utilizou uma redução de 40% de área no 1° passe. No 2° passe também observamos esse comportamento, no teste 3 com redução de área de 20% obtivemos o LE (772MPa) e o LR (829MPa), no teste 5 com redução de área 22% obtivemos o LE (855MPa) e o LR (897MPa) . Novamente isso comprova o fato que com maiores reduções de área aplicada maior serão as propriedades mecânicas.

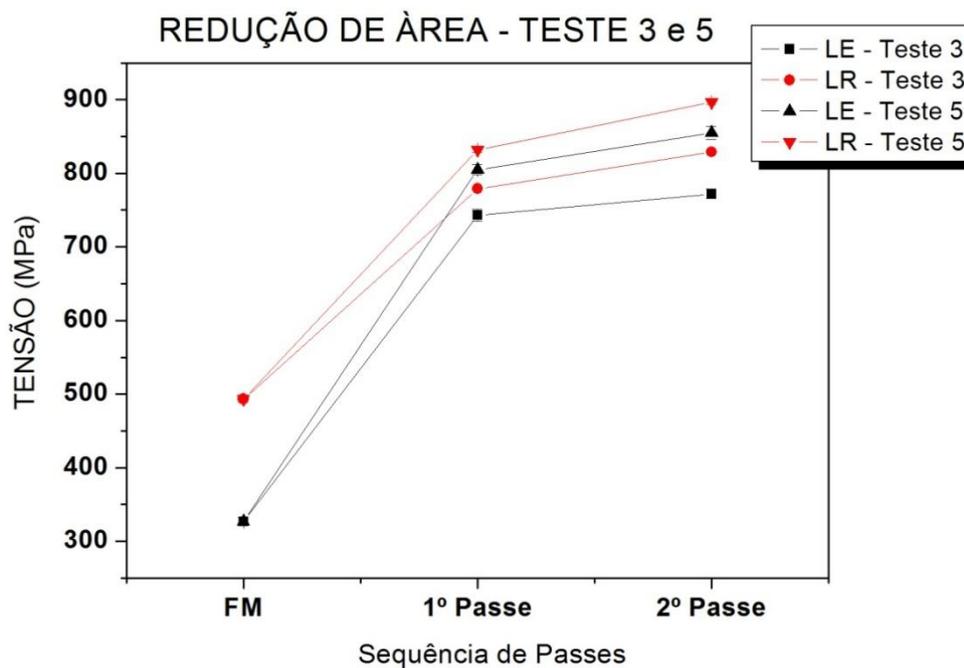


Figura 17. Influência da redução de área no LE e LR dos testes 3 e 5.

O gráfico da Figura 18 apresenta a influência do ângulo de fieira no LE e o LR dos testes 2 e 3 para o 1° e 2° passe, partindo do fio-máquina (FM). Podemos observar que o 1° passe do teste 2 os valores de LE (727MPa) e LR (757MPa) são menores em relação ao teste 3 LE (743MPa) e LR (779MPa) e isso ocorre devido a o uso de um ângulo maior no teste 2 (18°), e no teste 3 se utilizou um ângulo menor (16°) no 1° passe. Isso nos dá uma tendência que quanto menor o ângulo da fieira maior serão as propriedades mecânicas.

No entanto, no 2° passe observamos um comportamento diferente, no teste 2 com ângulo de fieira de 16° obtivemos o LE (790,5MPa) e o LR (828MPa), no teste 3 com ângulo de fieira de 14°, obtivemos o LE (772MPa) e o LR (829MPa), ou seja, o LE diminui para um ângulo menor e o LR praticamente se manteve. Para tentarmos visualizar melhor esse comportamento apresentaremos a comparação entre os testes 4 e 5.

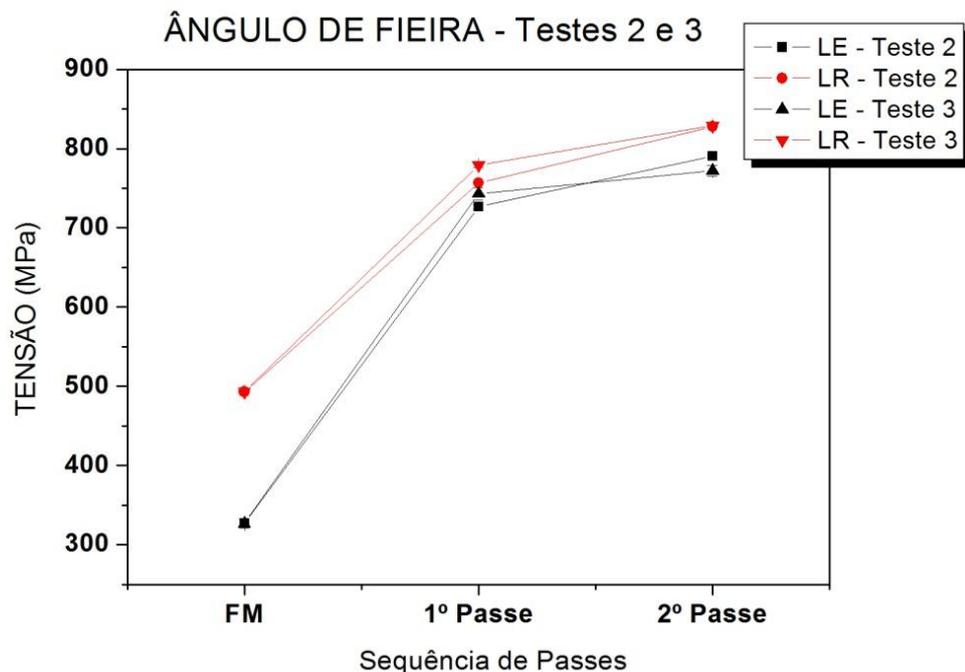


Figura 18. Influência do ângulo de fieira no LE e LR dos testes 2 e 3.

O gráfico da Figura 19 apresenta a influência do ângulo de fieira no LE e o LR dos testes 4 e 5 para o 1° e 2° passe, partindo do fio-máquina (FM). Podemos observar que o 1° passe do teste 4 os valores de LE (797MPa +/- 3) e LR (822MPa +/- 7) são equivalentes em relação ao teste 5 LE (805MPa +/- 4,6) e LR (832MPa +/- 3,6) considerando o desvio padrão apresentado não há variações tão significativas que possam ser consideradas relevantes mesmo com o uso de um ângulo maior no teste 4 (18°), e um ângulo menor (16°) no teste 5 no 1° passe. Isso não nos dá uma tendência definida em função do ângulo utilizado com as propriedades mecânicas.

No entanto, no 2° passe já observamos um comportamento diferente, no teste 4 com ângulo de fieira de 16° obtivemos o LE (828MPa +/- 2,6) e o LR (884MPa +/- 9), no teste 5 com ângulo de fieira de 14°, obtivemos o LE (855MPa +/- 3,5) e o LR (897MPa +/- 3), ou seja, nota-se que o LE e o LR há um pequeno aumento que é significativo para o uso de ângulo de fieira, onde pode-se nesse caso afirmar que quanto menor o ângulo maiores as propriedades mecânicas obtidas.

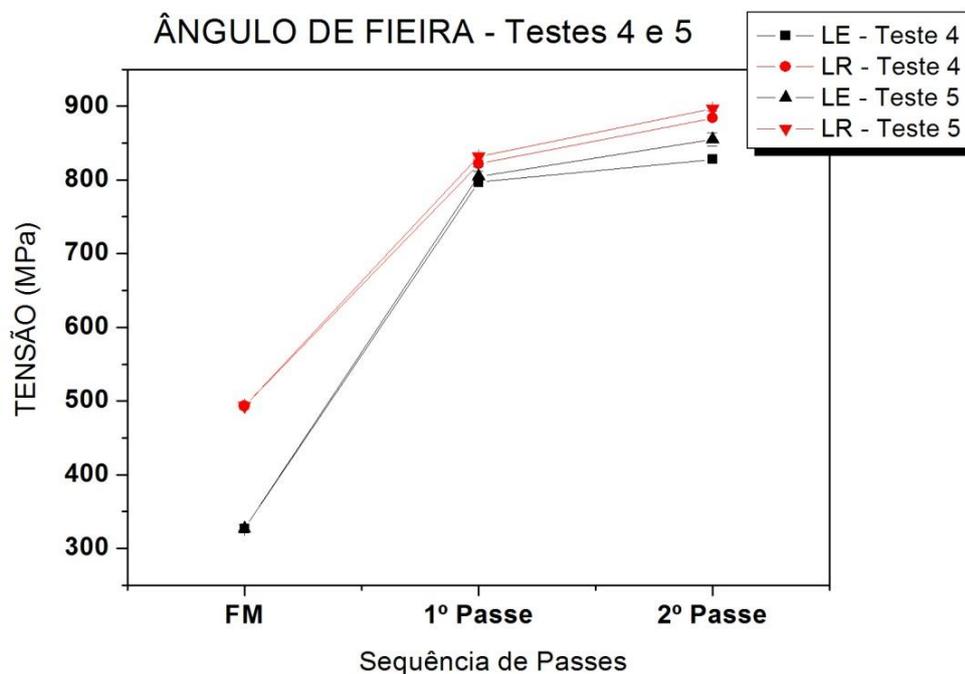


Figura 19. Influência do ângulo de fieira no LE e LR dos testes 4 e 5.

Os gráficos das Figuras 20 e 21 apresentam os valores para o limite de escoamento e o limite de resistência para todos os testes realizados, neles é possível verificar um aumento na resistência da tração e no limite de escoamento do material após a redução. Observa-se com os testes 4 e 5 que com um menor número de passes o LE e o LR se apresentam equivalentes em relação aos demais testes, o que comprova que com um menor número de passes é possível obter propriedades mecânicas satisfatórias e a um menor custo já que utiliza-se uma fiação a menos.

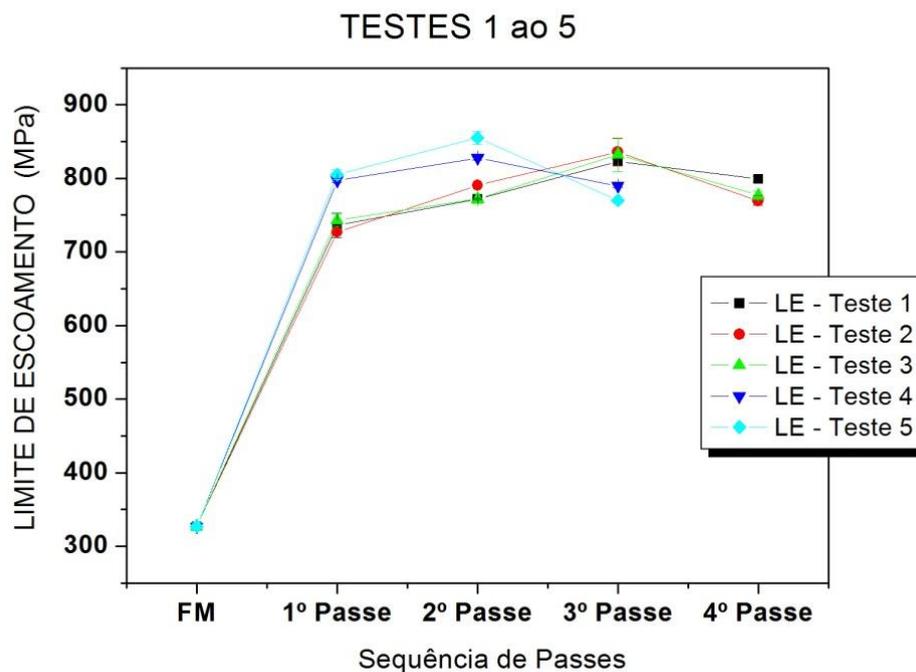


Figura 20. Limite de escoamento para todos os testes x sequência de passes.

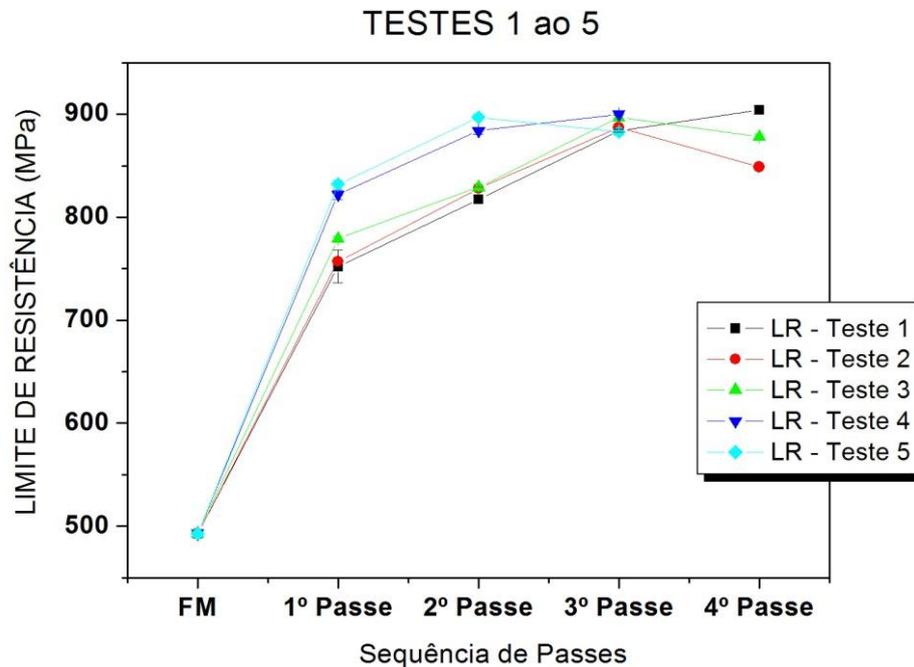


Figura 21. Limite de resistência para todos os testes x sequência de passes.

Os resultados já eram esperados de acordo com a literatura citada por VAN VLACK, 1984. O gráfico da Figura 9 mostra o resultado esperado, ou seja, um aumento das propriedades mecânicas (LE e LR) do material, e, conseqüentemente, devido ao encruamento, há uma diminuição na tenacidade e ductilidade.

Pelo gráfico da Figura 3, verifica-se que, para a faixa de 0,05 a 0,3% de carbono com uma redução total de área de 62%, se obtém uma melhora na resistência a tração (LR) em torno de 400 MPa, o que é confirmado nos ensaios dos testes mostrados na tabela 6. Isso pode ser observado no teste 4, onde apresenta LR no fio máquina de 493 MPa e, no último passe, um LR de 900 MPa, ou seja, houve um aumento de 407 MPa na resistência à tração. Para os testes 1 a 5 houve um ganho de 411, 356, 385, 407 e 390 MPa no limite de resistência respectivamente.

Nos testes de alongamento apresentados na Tabela 7 observa-se que há uma queda considerável do percentual de alongamento no último passe (variando de 20,6 a 23,6%) em relação ao fio-máquina (74%). Esse comportamento já era esperado conforme indica a literatura na Figura 2, no qual há uma queda no alongamento à medida que há um aumento da deformação por trabalho a frio.

Tabela 7. Resultados dos ensaios de microdureza para todos os testes de trefilação com desvio padrão.

Média do Percentual de Alongamento (%) e Desvio Padrão (DP)										
	Teste 1	DP	Teste 2	DP	Teste 3	DP	Teste 4	DP	Teste 5	DP
FM	74	4	74	4	74	4	74	4	74	4
1° passe	14,80	0,1	15,5	0,4	15,7	0,34	15,7	0,8	15,5	0,4
2° passe	17,6	0,6	18,7	0,5	16,9	0,16	15,7	0,26	16,5	0,1
3° passe	17	0,3	16,8	0,8	17,2	1,1	22,6	1,52	21,2	1,6
4° passe	22,1	1,1	20,6	0,5	23,6	1,4	-	-	-	-

5.1.2 Microdureza

A Tabela 8 mostra os resultados dos ensaios de microdureza vickers para todos os testes ao longo do processo de trefilação.

Tabela 8. Resultados dos ensaios de microdureza vickers para todos os testes de trefilação com desvio padrão.

Média de Microdureza Vickers (HV) e Desvio Padrão (DP)										
	Teste 1	DP	Teste 2	DP	Teste 3	DP	Teste 4	DP	Teste 5	DP
FM	156	3	156	3	156	3	156	3	156	3
1° passe	255	3	260	2,9	265	5	278	6,3	277	2,6
2° passe	275	3	282	3	281	4,2	288	4	298	2,7
3° passe	281	3,2	290	4	285	5,8	299	4	309	4
4° passe	310	2,7	294	6	304	2	-	-	-	-

Nos testes 4 e 5, nota-se um aumento considerável no 1° passe na microdureza em relação ao demais testes. Isso ocorre devido ao aumento do grau de encruamento do material e devido às grandes reduções aplicadas (40%). O fato também se comprova nos valores elevados obtidos no ensaio de tração para o LE e LR.

Com o intuito de verificar e confirmar a influência do ângulo de fieira e do percentual de redução de área, serão apresentados gráficos de microdureza e tentaremos comparar com os de LE e LR, se há alguma tendência definida em relação às propriedades mecânicas, principalmente ângulo de fieira onde não se verificou tendência alguma.

O gráfico da Figura 22 apresenta a influência do ângulo de fieira na microdureza vickers dos testes 2 e 3 para o 1° e 2° passe, partindo do fio-máquina (FM). Podemos observar que o 1° passe do teste 2 os valores de 260HV (+/-2,9) são equivalentes em relação ao teste 3 com 265HV (+/-2,6) mesmo com o uso de um ângulo maior no teste 2 (18°), e um menor (16°) no teste 3 no 1° passe. Isso não nos dá uma tendência definida em função do ângulo utilizado com as propriedades mecânicas.

No 2º passe também observamos um comportamento semelhante, no teste 2 com ângulo de fieira de 16º obtivemos a microdureza de 282HV (+/-3) , no teste 3 com ângulo de fieira de 14º, obtivemos a microdureza de 281HV (+/-4,2), ou seja, novamente não nos dá uma tendência definida em função do ângulo utilizado com as propriedades mecânicas. Para tentarmos visualizar melhor esse comportamento apresentaremos a comparação entre os testes 4 e 5.

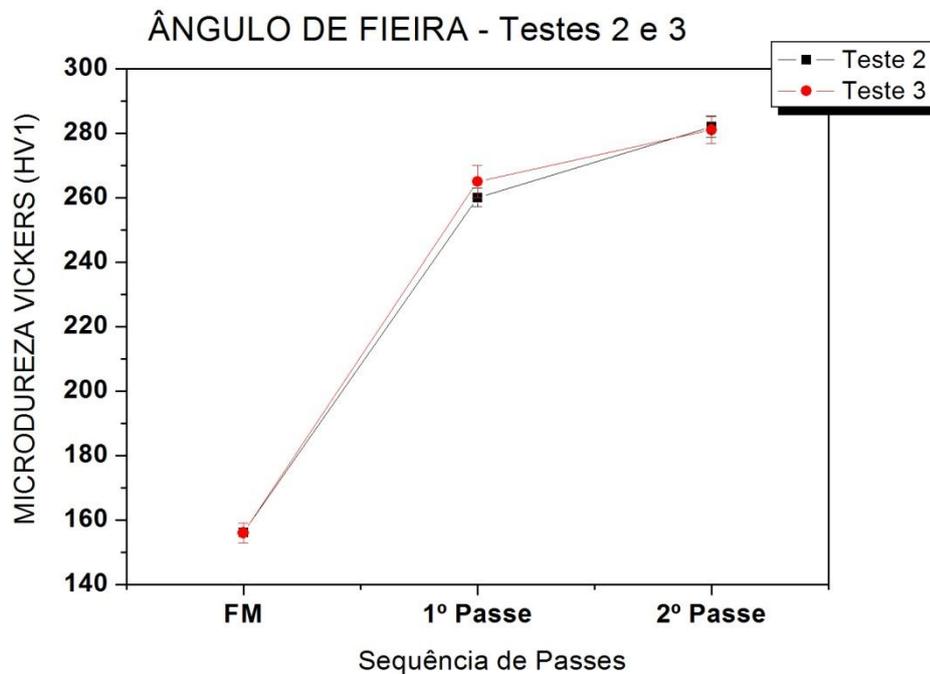


Figura 22. Influência do ângulo de fieira na microdureza vickers dos testes 2 e 3.

O gráfico da Figura 23 apresenta a influência do ângulo de fieira na microdureza vickers dos testes 4 e 5 para o 1º e 2º passe, partindo do fio-máquina (FM). Podemos observar que o 1º passe do teste 4 os valores de 278HV (+/-6,3) são equivalentes em relação ao teste 3 com 277HV (+/-5,0) mesmo com o uso de um ângulo maior no teste 2 (18º), e um menor (16º) no teste 3 no 1º passe. Isso não nos dá uma tendência definida em função do ângulo utilizado com as propriedades mecânicas.

No entanto, no 2º passe também observamos um comportamento diferente, no teste 2 com ângulo de fieira de 16° obtivemos a microdureza de 288HV (+/-4) , no teste 3 com ângulo de fieira de 14°, obtivemos a microdureza de 298HV (+/-2,7), ou seja, houve um pequeno aumento na microdureza com um ângulo de fieira menor e novamente não nos dá uma tendência definida em função do ângulo utilizado com as propriedades mecânicas.

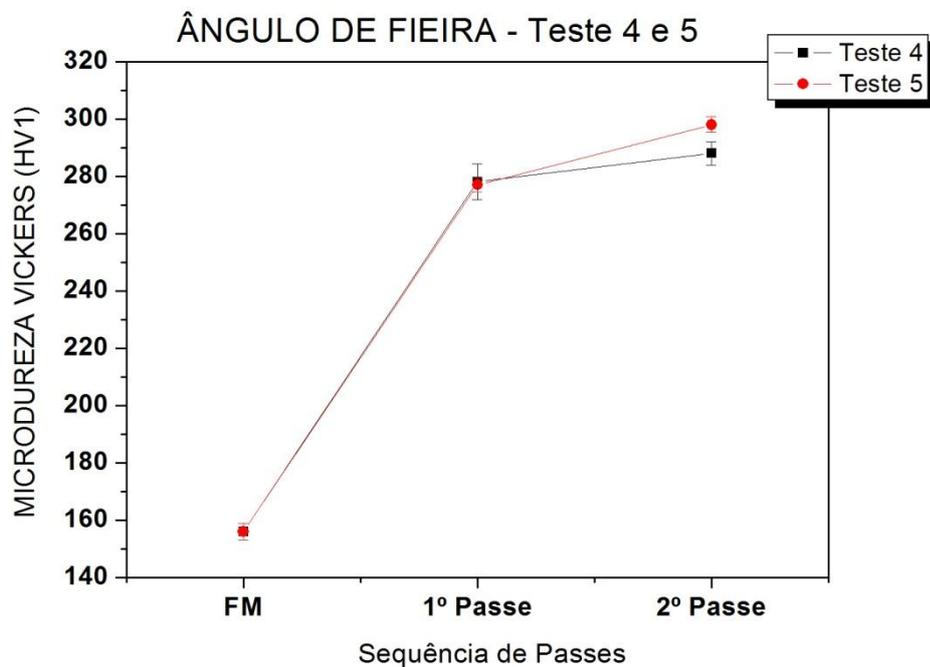


Figura 23. Influência do ângulo de fieira na microdureza vickers dos testes 2 e 3.

Os gráficos das Figuras 24 e 25 onde apresentam a influência da redução de área na microdureza para comparar os testes (2 e 4) e os testes (3 e 5), confirmam o que os gráficos das figuras 16 e 17 apresentam, que quando há um aumento no percentual de redução de área há um aumento nas propriedades mecânicas, nesse caso de microdureza, do material trefilado.

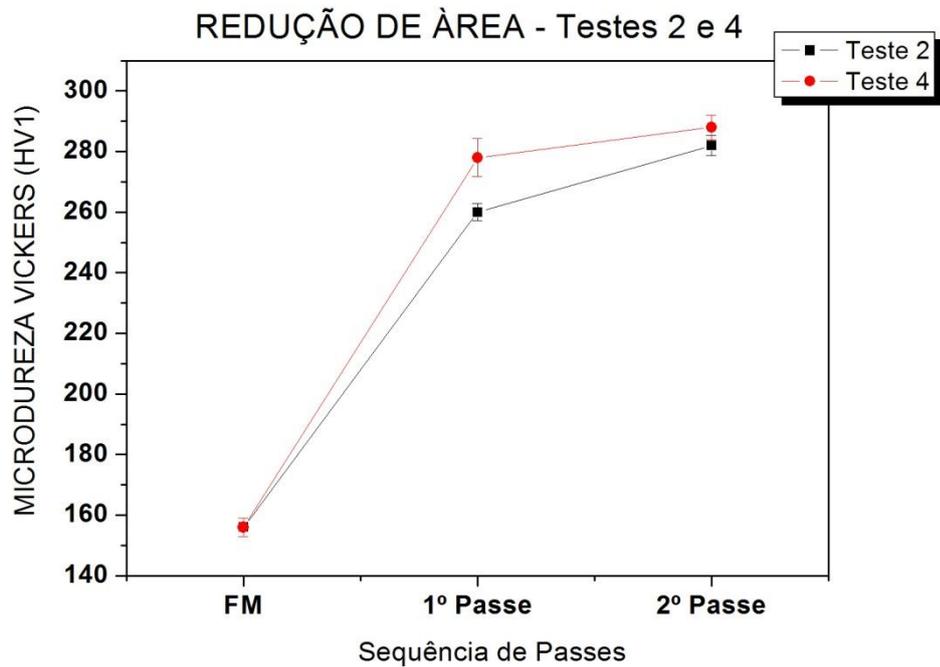


Figura 24. Influência da redução de área na microdureza vickers dos testes 2 e 4.

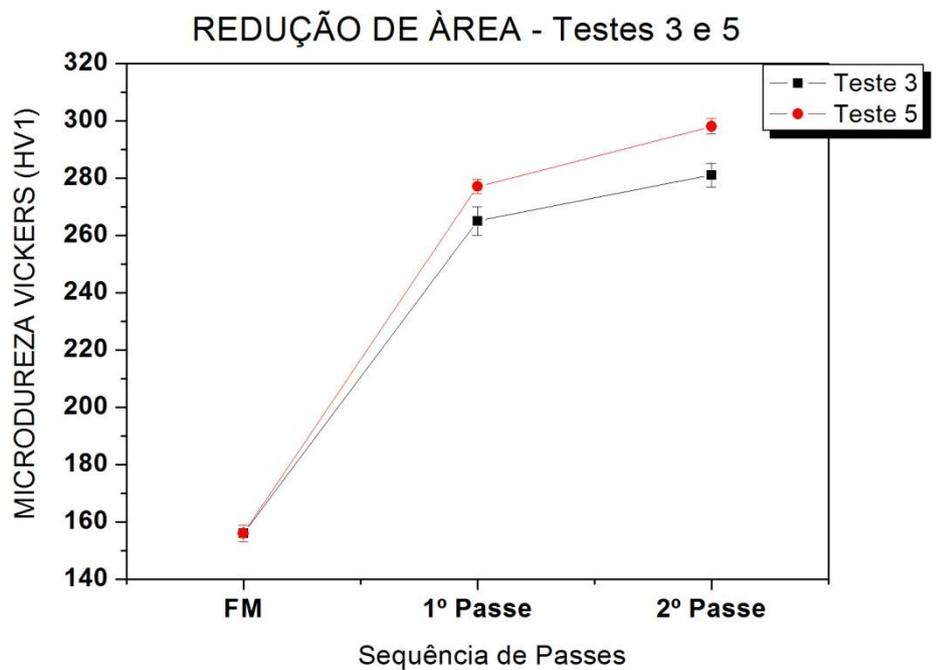


Figura 25. Influência da redução de área na microdureza vickers dos testes 3 e 5.

O gráfico da Figura 26 apresenta os valores de microdureza vickers para todos os testes realizados, nota-se um aumento crescente na microdureza após as reduções aplicadas, até mesmo no último passe, nota-se que não há uma queda como ocorre com o LE e LR. Observa-se novamente com os testes 4 e 5 que com um menor número de passes o LE e o LR se apresentam equivalentes em relação aos demais testes, o que comprova que com um menor número de passes é possível obter propriedades mecânicas satisfatórias.

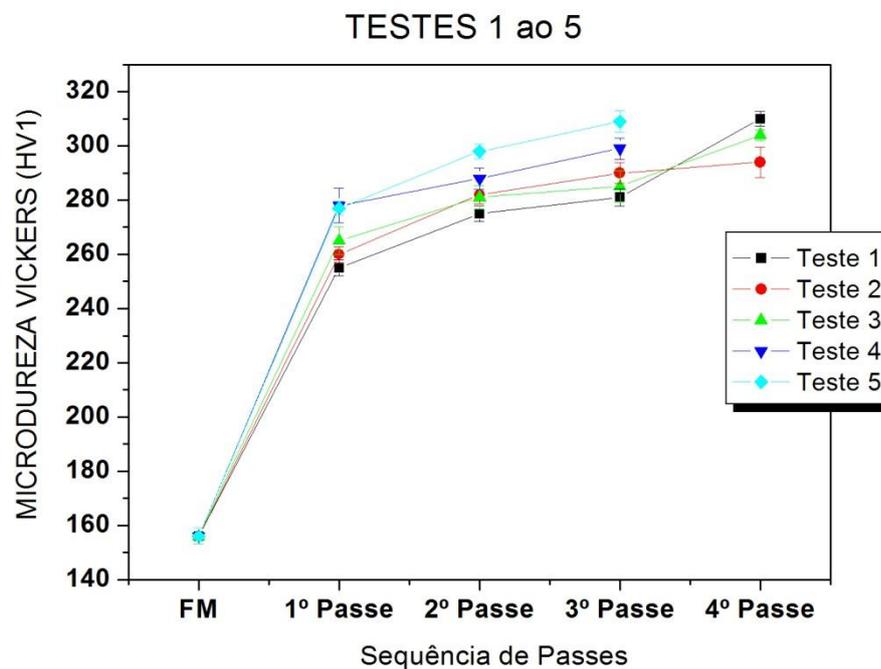


Figura 26. Microdureza Vickers para todos os testes x sequência de passes.

Como já era esperado e de acordo com a literatura, ocorre um aumento da microdureza a partir da redução da fieira devido ao encruamento que o material sofre durante a redução de área. No entanto, não podemos relacionar esse aumento de dureza com o ângulo de fieira, visto que, em alguns passes, ele apresenta comportamento contraditório. Ou seja, quando aumenta o ângulo da fieira, há aumento ou diminuição da microdureza, não se podendo tirar conclusões.

Nota-se que os resultados de microdureza praticamente dobram no último passe em relação ao fio-máquina. Os desvio padrão das microdureza apresentados giram em torno de 2% em relação a média de cada passe.

5.2 Microestrutura e Tamanho de Grão

Os testes para medição do tamanho de grão foram analisados com a microestrutura na secção transversal. No entanto, apresentaremos no trabalho as microestruturas na secção longitudinal devido à melhor verificação da deformação e do alinhamento dos grãos. Devido à semelhança nas microestruturas obtidas, só serão apresentadas as do teste 3 com quatro passes e do teste 4 com três passes, pois não houve nenhuma alteração significativa nos demais testes que pudesse ser apresentada.

A Figura 27 apresenta a microestrutura longitudinal do fio máquina, onde é possível notar que a estrutura é típica de um material que não sofreu deformação a frio alguma, pois seus grãos não se apresentam alongados ou orientados, ou seja, não apresentam deformação. A estrutura é composta por uma matriz ferrítica pró-eutetóide com presença de perlita.

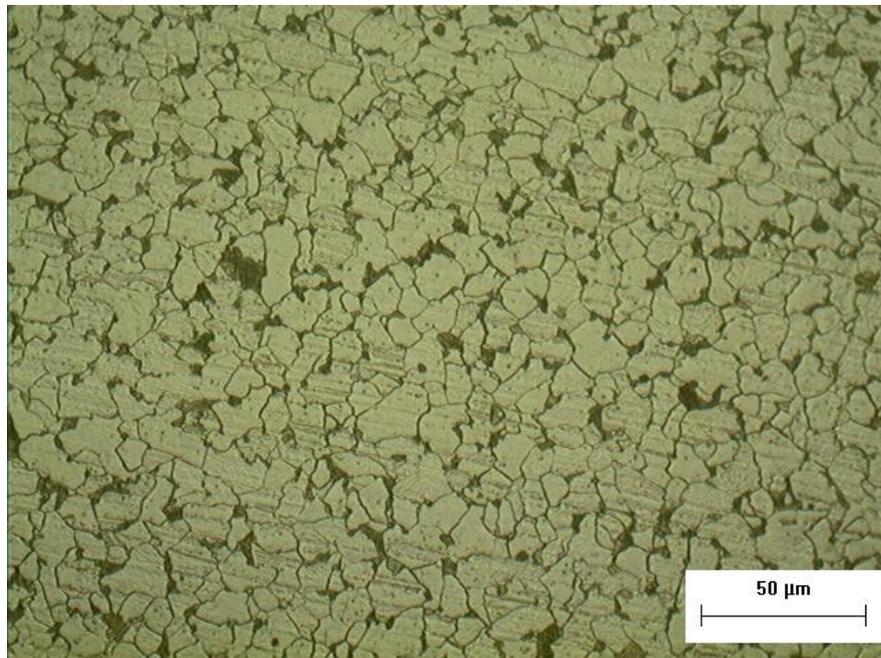


Figura 27. Microestrutura da região longitudinal do fio-máquina com diâmetro de 5,5mm. Tamanho de Grão ASTM 10. Ataque Nital 2%. (500X)

A Figura 28 apresenta a microestrutura da região longitudinal do teste 3 no primeiro passe com 4,65mm de diâmetro e 28,5% de redução. Como o material já sofre trabalho a frio nota-se uma pequena deformação nos grãos em relação à microestrutura do FM apresentada na figura 20.

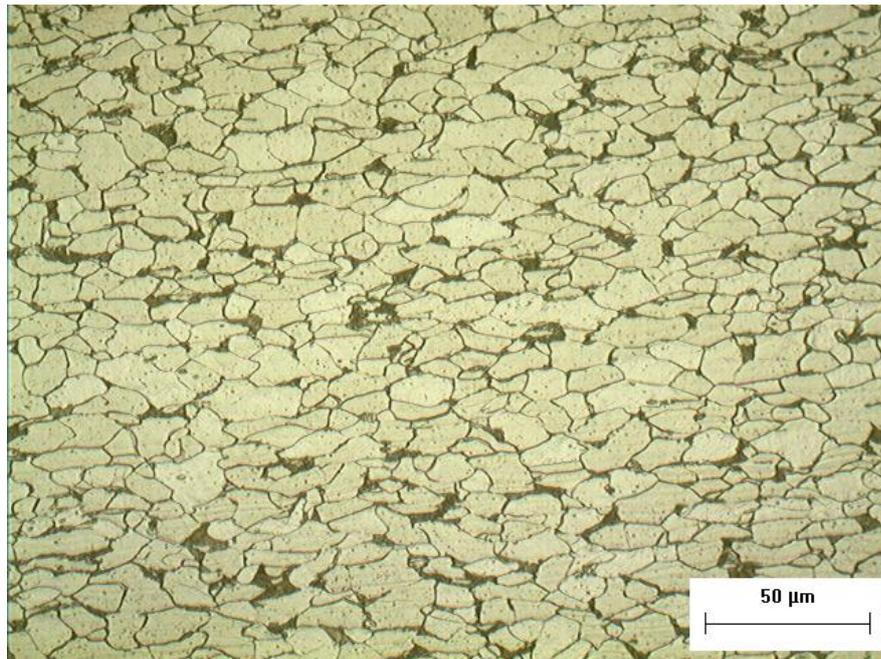


Figura 28. Microestrutura da região longitudinal do T3P1 com diâmetro de 4,65mm e redução de 28,5%. Tamanho de Grão ASTM 10. Ataque Nital 2%. (500X)

A Figura 29 apresenta a microestrutura da região longitudinal do teste 3, no segundo passe, com 4,15mm de diâmetro e 43% de redução de área total. Nota-se que os grãos estão se alinhando cada vez mais e não apresentam mais comportamento equiaxial.

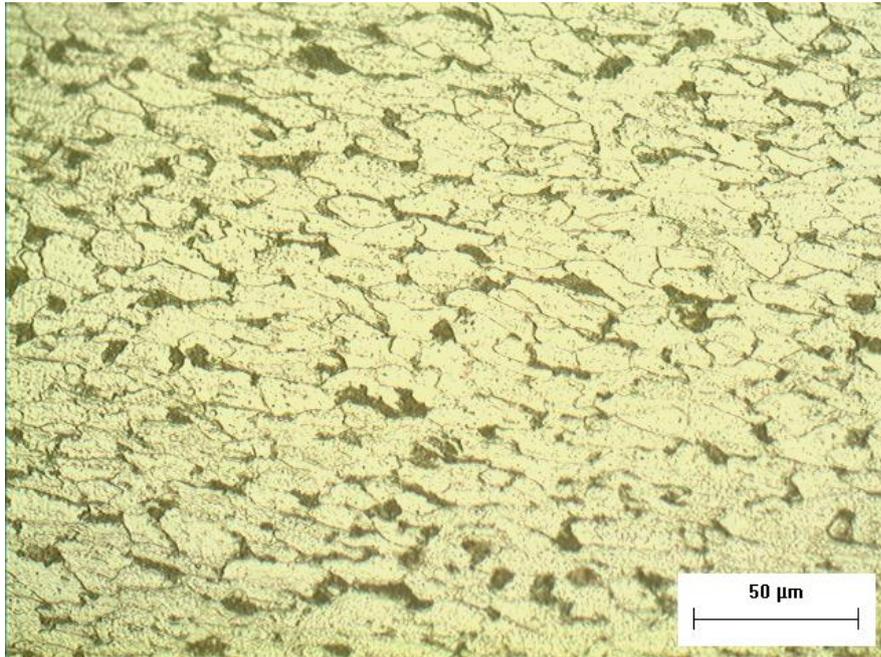


Figura 29. Microestrutura da região longitudinal do T3P2 com diâmetro de 4,15mm e redução total de 43%. Tamanho de Grão ASTM 10. Ataque Nital 2%. (500X)

A Figura 30 apresenta a microestrutura da região longitudinal do teste 3, no terceiro passe, com 3,76mm de diâmetro e 53% de redução de área total. Os grãos se apresentam cada vez menores, mais orientados e alinhados.

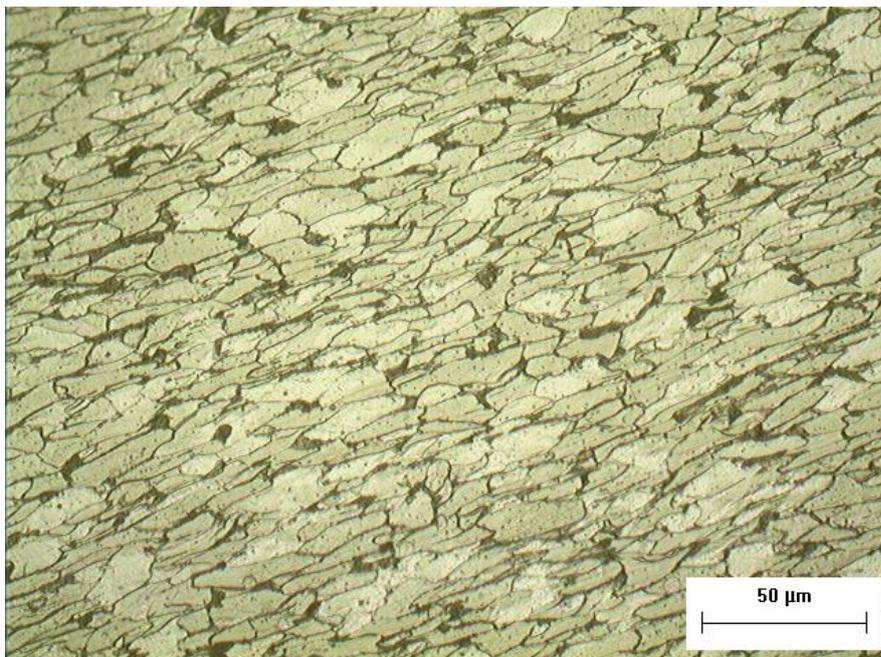


Figura 30. Microestrutura da região longitudinal do T3P3 com diâmetro de 3,76mm e redução total de 53%. Tamanho de Grão ASTM 11. Ataque Nital 2%. (500X)

A Figura 31 apresenta a microestrutura da região longitudinal do teste 3, no último passe, com 3,4mm de diâmetro e 62% de redução de área total, ou seja, de 5,5mm a 3,4mm. Seus grãos se apresentam no tamanho ASTM 12, orientados e com uma estrutura fortemente alinhada no sentido do trabalho a frio aplicado no processo de trefilação.

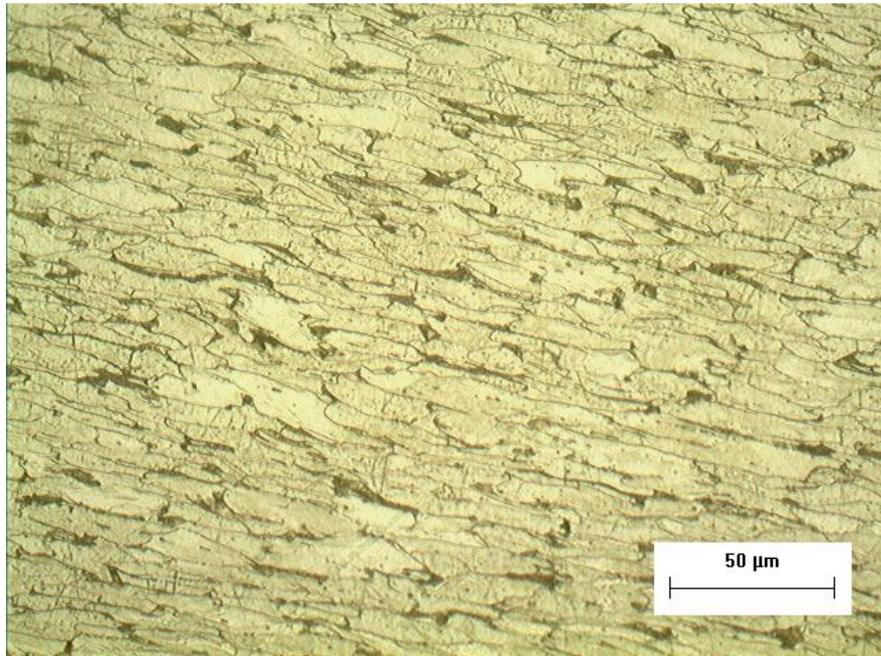


Figura 31. Microestrutura da região longitudinal do T3P4 com diâmetro de 3,4mm e redução total de 62%. Tamanho de Grão ASTM 12. Ataque Nital 2%. (500X)

A Figura 32a apresenta a microestrutura da seção transversal do fio máquina com diâmetro de 5,5mm e tamanho de grão ASTM 10. Já na Figura 32b, é possível comparar o efeito de redução do tamanho de grão no último passe do teste 3, com redução total de área de 62%. Pelas microestruturas, nota-se claramente que houve redução do tamanho do grão devido ao grau de encruamento mais elevado e, conseqüentemente, um aumento nas propriedades mecânicas (LR, LR e microdureza) do material trefilado. A microestrutura apresentada na Figura 32b apresenta tamanho de grão ASTM 12.

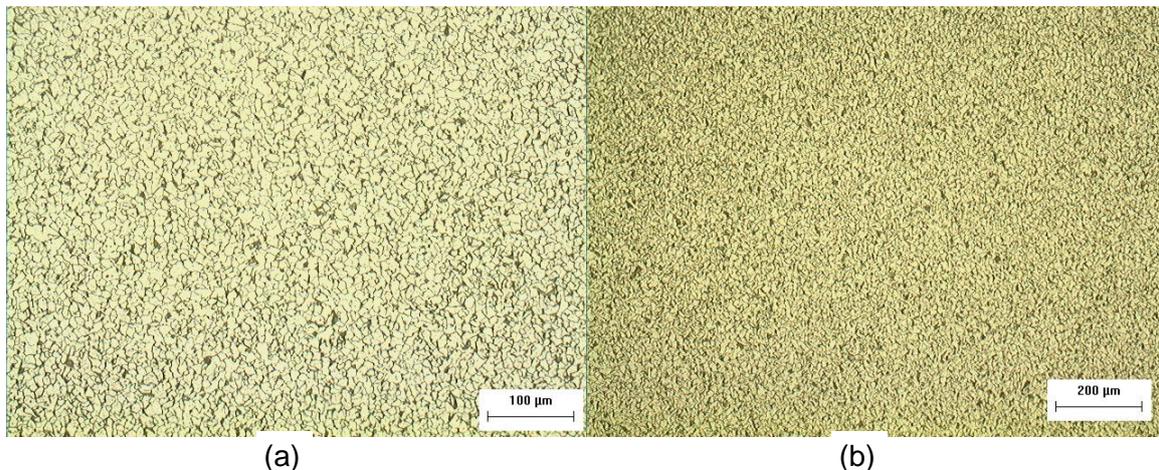


Figura 32. (a) Microestrutura da Região Transversal do fio-máquina com diâmetro de 5,5mm. (200x) e (b) Microestrutura da região transversal do último passe do teste 3. (200X) redução total de 62%. Ataque Nital 2%.

A Figura 33 apresenta a microestrutura da região longitudinal do teste 4, no primeiro passe, com 4,25mm de diâmetro e 40% de redução. Em comparação com a Figura 21, onde se passou de 28,5% para 40% de redução de área, ou seja, o material estará submetido a um nível de deformações plásticas mais elevadas, pela microestrutura, nota-se que os grãos se apresentam mais deformados apesar de ser o primeiro passe, o que se justifica pelos 40% de redução de área aplicado.

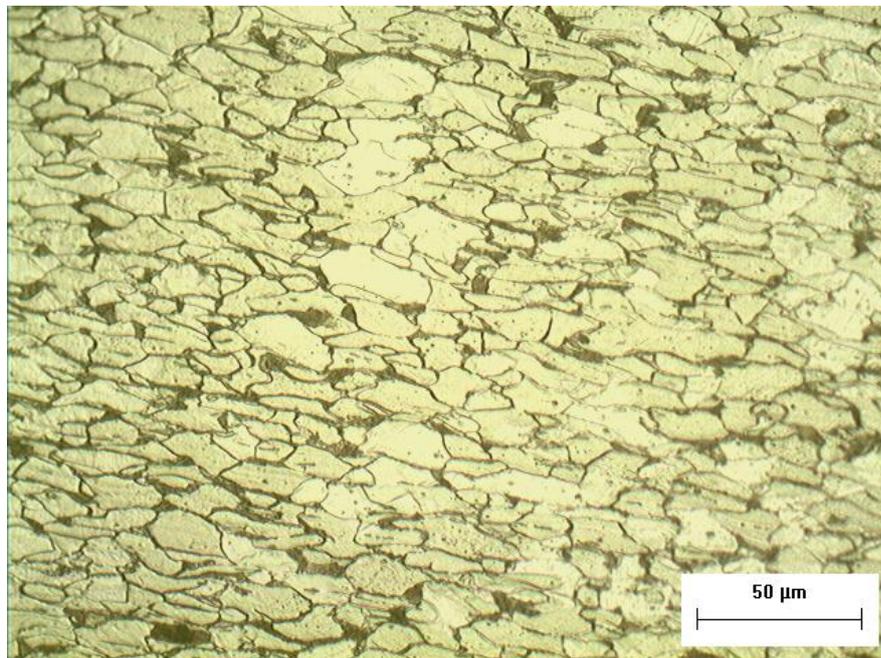


Figura 33. Microestrutura da região longitudinal do T4P1 com diâmetro de 4,25mm e redução de 40%. Tamanho de Grão ASTM 10. Ataque Nital 2%. (500X)

As Figuras 27 e 28 apresentam a microestrutura da região longitudinal do teste 4 com aumento de 500x e 200x respectivamente, no passe com 3,4mm de diâmetro e 62% de redução de área total, ou seja, de 5,5mm a 3,4mm. Seus grãos se apresentam no tamanho ASTM 12, orientados e com uma estrutura fortemente alinhada no sentido do trabalho a frio aplicado no processo de trefilação.

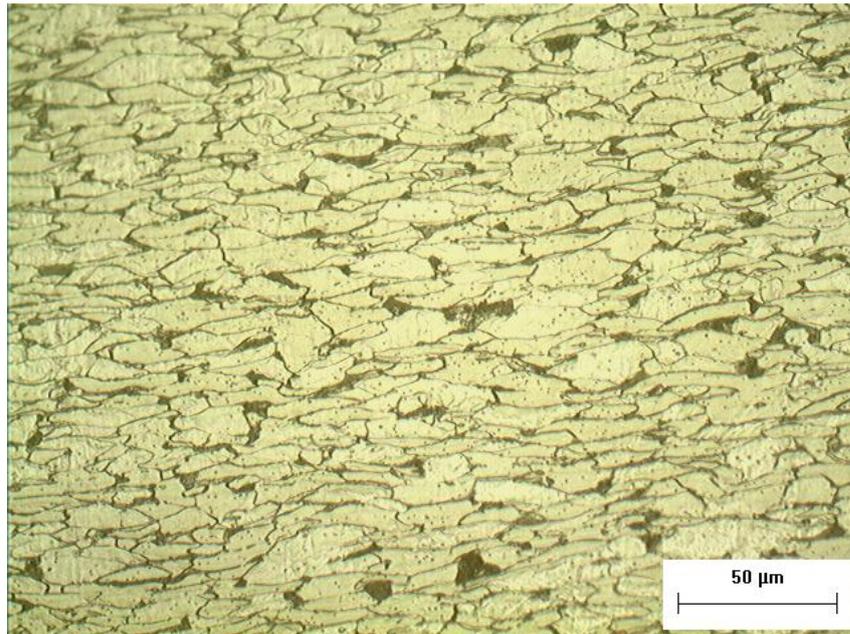


Figura 34. Microestrutura da região longitudinal do T4P3 com diâmetro de 3,4mm e redução de 62%. Tamanho de Grão ASTM 12. Ataque Nital 2%. (500X)

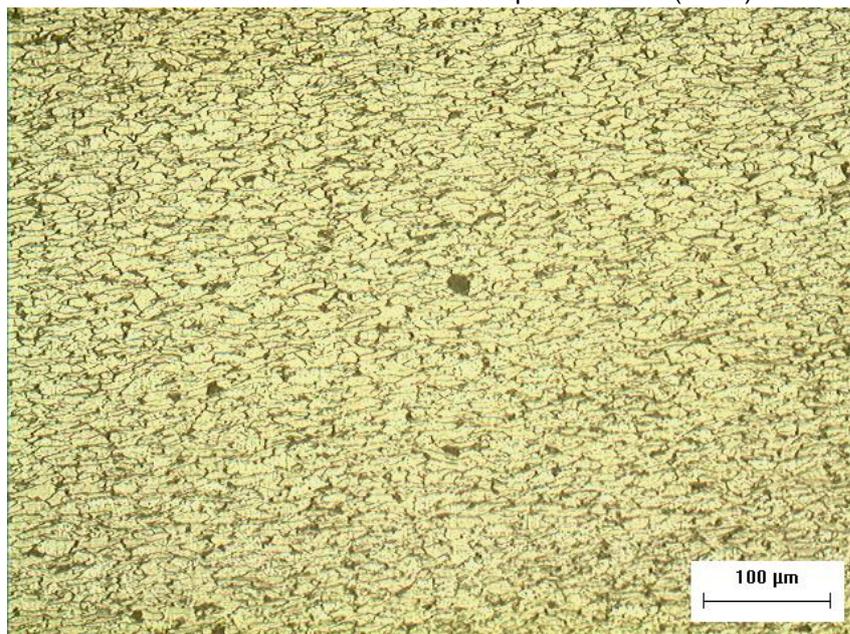


Figura 35. Microestrutura da região longitudinal do T4P3 com diâmetro de 3,4mm e redução de 62%. Tamanho de Grão ASTM 12. Ataque Nital 2%. (200X)

Todos os testes apresentaram microestruturas aparentemente iguais. Por isso, só serão apresentadas as do teste 3. Por fim, colocamos as microestruturas principais dos teste com 4 passes (Teste3) e com 3 passes (Teste 4). Nota-se, pelas microestruturas apresentadas nas figuras 23 e 26, que, apesar de terem sido conduzidas anteriormente por reduções diferentes e no último passe terem a mesma redução de área de 62%, apresentaram comportamento em sua microestrutura bem semelhantes, não havendo nenhuma alteração significativa.

Antes de qualquer deformação, os grãos são equiaxiais, ou seja, têm praticamente as dimensões iguais em todas as direções. Após as reduções de área e consequentemente deformações plásticas aplicadas no material, nota-se que os grãos se apresentam de forma alongada.

Em relação ao tamanho de grão, apesar de ter reduzido, não foi tão significativo. Iniciou-se com o tamanho ASTM 10 no FM, e os valores no último passe ficaram no tamanho de grão entre ASTM 11 e 12.

Já em relação às variáveis do processo utilizadas (redução de área, ângulo de feira e tipo de lubrificante), não foi notada nenhuma influência nas micrografias, com exceção das microestruturas apresentadas nas figuras 21 e 26, onde há um aumento significativo na redução de área no primeiro passe. Com isso, nota-se sutilmente uma contribuição na deformação dos grãos na microestrutura devido ao encruamento gerado pela maior redução de área aplicada.

5.3 Lubrificantes

No Teste 1 utilizando os lubrificantes 84 e 81MF observou-se um comportamento no qual o arame final produzido apresentou uma alta camada residual do lubrificante no arame e deixando o produto sem brilho e com um aspecto, essa condição é boa para os primeiros passes no qual o arame já entra no próximo passe lubrificado, no entanto no ultimo passe o ideal é que essa camada residual não apareça. Essa camada residual apresentada gerava reclamações na fabricação de pregos, pois dificultava a remoção da mesma no processo de tamboreamento, que é utilizado para retirar a rebarba dos pregos e deixa-lo mais polido.

Nos demais testes, substituímos o lubrificante 84 pelo Frimotref 86K, com essa combinação obtivemos resultados satisfatórios no qual o arame se apresentou mais polido e sem camada residual alguma. Como podemos observar na descrição do fabricante o lubrificante Frimotref 84 apresentava como característica conferir uma película de boa fixação na superfície do material, tanto que nos passes posteriores não havia remoção dessa camada residual.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais sobre os parâmetros de trefilação analisados para propriedades mecânicas e microestruturais foi possível concluir que:

A melhora da resistência à tração, com um menor número de passes, devido às maiores reduções aplicadas, é bem significativa.

O parâmetro que mais influência nas propriedades mecânicas é o percentual de redução de área. Isso é verificado claramente no 1º passe dos testes 4 e 5, nos quais se utilizou uma redução de 40% e se obteve valores elevados nos ensaios de microdureza e tração. As análises comprovam que quanto maior o percentual de redução aplicado maior serão as propriedades mecânicas obtidas.

O ângulo de fieira foi um parâmetro no qual não se observou muita influência nos resultados de tração, microdureza e microestrutura. No entanto, nos ensaios de tração, essa variável apresentou comportamento contraditório nos testes 2 e 3, não se podendo tirar uma conclusão mais confiáveis. E nos testes 4 e 5, observou-se que quanto menor o ângulo, maior o aumento nas propriedades mecânicas para o 1 e 2º passe. Isso não nos dá uma tendência definida em função do ângulo utilizado com as propriedades mecânicas a serem obtidas, talvez devido a pequena variação de ângulo entre testes ser de apenas 2º.

A combinação dos lubrificantes Frimotref 86K e 81MF se mostrou eficaz, pois o arame produzido se apresentou mais polido, brilhante e sem camadas residuais.

Não se verificaram alterações significativas dos parâmetros utilizados nas microestruturas obtidas nos ensaios.

Após a redução de área do material em 62%, verificou-se que o tamanho do grão ficou menor, passando de ASTM 10 para ASTM 12.

Constatou-se que os resultados dos ensaios de microdureza no arame trefilado teve um aumento de aproximadamente 100% no último passe em todos os testes.

No final, o teste 4 com três passes, onde utilizou-se reduções de 40, 22 e 18% entre passes e ângulos de fieira 18, 16 e 12° apresentou-se como o melhor teste ser aplicado, devido a obtenção de propriedades mecânicas satisfatórias e equivalentes aos testes com quatro passes e os ângulos maiores que proporcionam uma melhor lubrificação na fieira, com vantagem para o processo.

Conforme esperado os grãos, inicialmente, se apresentaram equiaxiais e, após as deformações plásticas impostas pelo processo de trefilação, ficaram alongados e alinhados no sentido do esforço de tração.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Fazer a retrefilação do arame 3,4mm até arames mais finos de 1,0mm, aplicando novos parâmetros e verificando sua influência nas propriedades mecânicas.

Realizar tratamento térmico de recozimento após a trefilação, para aliviar as tensões, remover os efeitos provocados pelo encruamento e verificar as mudanças causadas na resistência mecânica.

Analisar as tensões residuais provocadas pelos níveis de deformações geradas no encruamento, devido aos níveis de reduções aplicadas.

Fazer os testes com o aço 1006 para verificar a obtenção das propriedades solicitadas no CA-60, produzindo, assim, um material tão resistente com menor teor de carbono.

Analisar o limite de escoamento, o limite de resistência e o alongamento do material trefilado após o endireitamento e verificar se há aumento ou diminuição nas propriedades mecânicas.

Acompanhar o tempo de produção de cada fieira com o percentual de redução aplicado, ângulo de fieira e tipo de lubrificante utilizado.

Realizar análise dimensional e a criação de um modelo teórico da influência das variáveis – Número de passes, ângulo de fieira, redução de área, lubrificante - nas propriedades mecânicas.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado; especificação; NBR 7480. Rio de Janeiro, 1996.

BOYER, H. E, Cold Finished Steel Bars, In AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Committee on Carbon and Alloy Steel, Metals Handbook, 9º ed., p.215-251, 2002.

BUTTON, S.T. Trefilação: programa de educação continuada, São Paulo: ABM, 2001.

CETLIN, P.R: “Curso de Tecnologia de Trefilação de Arames de Aço”, Departamento de Engenharia Metalúrgica, UFMG, 2002.

CETLIN, P. R., HELMAN, H. Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais. Artliner, 2005.

COLPAERT, H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 3º ed. São Paulo, Edgard Blucher, 1974. 412 p.

DIETER, G. E.; Mechanical Metallurgy . SI Metric edition. McGraw Hill, Singapore, 1988.

DOVE, A. B. Steel Wire Handbook, USA: The Wire Association International INC, Vol 1, 3º ed., 1979.

EI-DOMIATY, A. KASSAB, S. Z. Temperature Rise in Wire- Drawing. Journal of materials Processing Technology, Vol. 83, p.72 - 83, 1998.

ENGHAG, P. Steel Wire Technology. Sweden: Repro Orebro University, 3º ed., 2003.

HELMAN, H., CETLIN, P.R. Fundamentos de Conformação Mecânica dos Metais. 2 ed. Belo Horizonte: FCO, 1993. 170p.

HILLERY, M.T. ;McCABE, V. J. Wire Drawing at Elevated Temperatures Using Different Die Materials and Lubrificants. Journal of Materials Processing Technology, Vol.55, p.53-57, 1995.

JASTRZEBSKI, Z. D. Nature and properties of engineering materials. New York and London, John Wiley & Sons, Inc.; Tokyo, Toppan; 1959.

MACHERAUCH, E., KLOOS, K. Origin, Measurement and Evaluation of Residual Stress. Science Technology, p.3-27, 1987.

MORAIS, W. A. Apostila de conformação plástica dos materiais -Trefilação – cap. 4- Unisanta

NAKAGIRI, A., YAMANO, T., KONADA, M., ASAKAWA, M., SASAKI, W. Behavior of Residual Stress and Drawing Stress in Conical – Type Die and Circle – Type Die Drawing by FEM simulation and Experiment. Wire Journal International, p.72-80, 2001.

SHACKELFORD, J. F. Introduction to materials Science for engineers. 4 ed. New Jersey, USA, Prentice - Hall / Simon & Schuster/A, 1996

VAN VLACK, L. H. Princípios de ciências dos materiais; Trad. FERRÃO, L.P.C. São Paulo, Edgard Blucher, 1970. 427 p.

VAN VLACK, L. H. Princípios de ciências dos materiais; Trad. MONTEIRO E. 4 ed. Rio de Janeiro, Campus, 1984. 567 p.

WRIGHT, R. Tips from wiredrawing 101 sm. Wire and cable technology international. Jan 2002 a.

WRIGHT, R. Tips from wiredrawing 101 sm. Wire and cable technology international. May 2003 a.

http://www.bemfica.com.br/produtos_RF.asp/ acessado em 02/12/2010 as 16:34h