

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR GUSTAVO ARISTIDES
SANTANA MARTINEZ E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 10 / 06 / 98

Sérgio Tonini Button
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Comportamento da Lubrificação no Tribo-sistema de Trefilação a Altas Velocidades

Autor: Gustavo Aristides Santana Martinez
Orientador: Sérgio Tonini Button

06/98

M366c

34887/BC

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

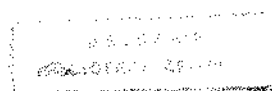
Comportamento da Lubrificação no Tribo-sistema de Trefilação a Altas Velocidades

Autor: Gustavo Aristides Santana Martinez
Orientador: Sérgio Tonini Button

Curso: Engenharia Mecânica
Área de concentração: Materiais e Processos

Tese de Doutorado apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 1998
S.P. – Brasil



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

TESE DE DOUTORADO

Comportamento da Lubrificação no Tribo-sistema de Trefilação a Altas Velocidades

Autor: Gustavo Aristides Santana Martinez

Orientador: Sérgio Tonini Button

Sérgio Tonini Button

Prof. Dr. Sérgio Tonini Button, Presidente
DEMA-FEM-UNICAMP

Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia

Prof. Dra. Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia
DEMA-FEM-UNICAMP

Paulo Roberto Cetlin

Prof. Dr. Paulo Roberto Cetlin
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Viktor Pastoukhov

Prof. Dr. Viktor Pastoukhov
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

Rubens Caram Junior

Prof. Dr. Rubens Caram Junior
DEMA-FEM-UNICAMP

Agradecimentos

Gostaria de agradecer às seguintes pessoas e instituições:

Ao Prof. Dr. Sérgio Tonini Button pela orientação dada durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Loir Afonso Moreira, do DPM-FEM-UNICAMP, pela contribuição ao longo do trabalho.

A Rosângela da Silva e Oswaldo Leite Torres do DPM-FEM-UNICAMP pelo apoio técnico e pela amizade a mim dedicado.

Ao Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos pelo inestimável auxílio e pela manutenção da esperança de que a parte experimental deste trabalho seria possível.

Aos Srs. Laerte e José da oficina mecânica do DEMa-FEM-UNICAMP.

Aos técnicos do DEMAR-FAENQUIL, pela construção da trefila monobloco.

Ao amigo Ângelo Caporalli Filho do DEMa-FEM-UNICAMP.

Às empresas: Durlait, Inbra, Quality Dies, Di Martino e Castrol.

Aos demais colegas do DEMa-FEM-UNICAMP e DEMAR-FAENQUIL.

Ao CNPq pela concessão de bolsa.

À CAPES pela concessão de Bolsa PICD.

Barco sem rumo pelo mar da vida
Ao açoite das ondas alterosas.
Depois de longas horas tormentosas,
É rota a vela, a bússola partida

Mas o nauta sorri, sorri de esperança,
Pensando com fervor e confiança,
Na força criadora do seu "Eu"
E na graça infinita de viver.

Gritando para que o ouça o próprio céu,
Eu o quero Deus o quer **Hei de vencer!...**

Sumário

Capítulo 1 – Objetivos e Justificativas	
1. Objetivos	01
2. Justificativas	01
Capítulo 2 – Tribologia na trefilação	03
2.1 O processo de trefilação	04
2.2 Tribologia	06
2.3 Parâmetros tribológicos da trefilação	07
2.3.1 Tribo-elemento móvel-fio	08
2.3.2 Tribo-elemento estacionário-fieira	09
2.3.3 Tribo-elemento interfacial-lubrificante	12
2.4 Formação e influência do regime hidrodinâmico na trefilação	18
Capítulo 3 – Modelagem do tribo-elemento interfacial	25
3.1 Análise do escoamento do fluido lubrificante	26
3.2 Análise na região de entrada	28
3.3 Análise da região II	30
3.3.1 Análise da temperatura do fio	31
3.3.2 Determinação da pressão no filme na região II	33
3.4 Expressões finais utilizadas nas rotinas computacionais	35
Capítulo 4 – Procedimento Experimental	38
4.1 Tribo-elementos	38
4.2 Ensaios de trefilação	39
Capítulo 5 – Resultados e discussões	44
5.1 Análise da rugosidade superficial e da espessura do filme lubrificante	44
5.2 Análise dos esforços e das temperaturas nos ensaios de trefilação	49
5.3 Análise das simulações com o modelo físico-matemático	66
Capítulo 6 – Conclusões e sugestões para próximos trabalhos	86
6.1 Conclusões	86
6.2 Sugestões para trabalhos futuros	87

Referências bibliográficas	88
Apêndices	93

RESUMO

MARTINEZ, Gustavo Aristides Santana Martínez, Comportamento da Lubrificação no Tribo-sistema de Trefilação a Altas Velocidades, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1998. 106 p. Tese (Doutorado)

O tipo de regime de lubrificação que ocorre na trefilação tem uma grande influencia nas condições de atrito, acabamento superficial e no desgaste da ferramenta. Este trabalho apresenta o estudo da lubrificação no tribo-sistema de trefilação a altas velocidades. É analisada a influencia da velocidade, viscosidade e da geometria da ferramenta no estabelecimento do regime de lubrificação na trefilação do aço inoxidável austenítico ABNT 304 L. Foi desenvolvido também um modelo físico-matemático para auxiliar na determinação das condições ideais para o estabelecimento da lubrificação, verificado pela análise dos resultados experimentais.

Palavras Chave

- Trefilação, Tribologia, Lubrificação hidrodinâmica

ABSTRACT

MARTINEZ, Gustavo Aristides Santana Martinez, Comportamento da Lubrificação no Tribo-sistema de Trefilação a Altas Velocidades, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1998. 106 p. Tese (Doutorado)

The lubrication regime which occurs in wiredrawing has a strong influence on frictional conditions, surface finish and tooling wear. This work presents a study of the lubrication in wiredrawing tribo-system with high speeds. It is analyzed the influence of the drawing speed, the lubricant viscosity and the tool geometry in the formation of the lubrication regime in the wiredrawing of the austenitic stainless steel ABNT 304 L. It was also developed a physical-mathematical model to aid in the determination of the ideal conditions for the establishment of the hydrodynamic lubrication. Experimental results show the possibility of previously define the process conditions to obtain adequate lubrication.

Key Words

- Wiredrawing, Tribology, Hydrodynamic lubrication.

Lista de Figuras

Figura 2.1	Elementos básicos de um tribosistema de trefilação	7
Figura 2.2	Efeito da rugosidade do material	9
Figura 2.3	Representação das partes de uma fieira	10
Figura 2.4	Lubrificante no processo de trefilação	13
Figura 2.5	Temperatura na fieira	14
Figura 2.6	Representação dos regimes de lubrificação em processos de conformação	17
Figura 2.7	Curva de Stribeck	19
Figura 2.8	Escoamento em cunha do fluido	20
Figura 2.9	Comportamento da pressão - esquemático	21
Figura 2.10	Limite de resistência a tração	22
Figura 2.11	Rugosidade superficial na trefilação convencional e trefilação hidrodinâmica	23
Figura 3.1	Regiões da fieira	28
Figura 3.2	Representação das tensões atuantes num elemento infinitesimal na região de deformação	33
Figura 4.1	Rugosímetro	41
Figura 4.2	Trefila monobloco	41
Figura 5.1	Qualidade superficial do fio $\varnothing 0,50$ mm recozido (400 x)	45
Figura 5.2	Variação da rugosidade superficial (Ra) do material de partida e dos produtos retrefilados	46
Figura 5.3	Variação de rugosidade superficial (Ra) do material de partida e dos produtos retrefilados	46
Figura 5.4	Força x Velocidade com óleo Honilo 171 e material recozido	51
Figura 5.5	Força x Velocidade com óleo Honilo 171 e material recozido	51
Figura 5.6	Força x Velocidade com óleo Honilo 171 e material recozido	52
Figura 5.7	Força x Velocidade com óleo MJF 5 e material recozido	54
Figura 5.8	Força x Velocidade com óleo MJF 5 e material recozido	55
Figura 5.9	Força x Velocidade com óleo MJF 5 e material recozido	55
Figura 5.10	Melhores resultados com material recozido	57
Figura 5.11	Melhores resultados com material encruado	58
Figura 5.12	Variação da temperatura - óleo MJF 5 – fieira 1	60
Figura 5.13	Variação da temperatura - óleo Honilo 171 – fieira 1	60
Figura 5.14	Temperatura x Velocidade - fieira 1 - recozido	63

Figura 5.15	Temperatura x Velocidade – fieira 5 – óleo Honilo 171 – recozido	64
Figura 5.16	Temperatura x Velocidade – fieira 5 – óleo MJF 5 – recozido	64
Figura 5.17	Temperatura x Velocidade – fieira 5 – óleo Honilo 171 – encruado	65
Figura 5.18	Temperatura x Velocidade – fieira 5 – óleo MJF 5 – encruado	65
Figura 5.19	Semi-ângulo (β) x Espessura do filme – óleo Honilo 171 – recozido	70
Figura 5.20	Semi-ângulo (β) x Espessura do filme – óleo MJF 5 – recozido	70
Figura 5.21	Semi-ângulo (β) x Espessura do filme – óleo Honilo 171 – encruado	71
Figura 5.22	Semi-ângulo (β) x Espessura do filme – óleo MJF 5 – encruado	71
Figura 5.23	Fieiras 7,8 e 9 – Honilo 171 – recozido	73
Figura 5.24	Fieiras 5 e 6 – Honilo 171 – recozido	73
Figura 5.25	Fieiras 2 e 3 – Honilo 171 – recozido	74
Figura 5.26	Fieiras 7, 8 e 9 – MJF 5 – recozido	74
Figura 5.27	Fieiras 4, 5 e 6 – MJF 5 – recozido	75
Figura 5.28	Fieiras 2 e 3 – MJF 5 – recozido	75
Figura 5.29	Fieiras 3 e 9 – Honilo 171 – encruado	76
Figura 5.30	Fieiras 2 e 3 – MJF 5 – encruado	76
Figura 5.31	Variação da pressão a 0.7 m/s – Material: recozido – fieira: 2 – óleo: MJF 5	77
Figura 5.32	Variação da pressão a 1 m/s – Material: encruado – fieira: 2 – óleo: MJF 5	77
Figura 5.33	Variação da pressão a 10.6 m/s – Material: recozido – fieira: 2 – óleo: MJF 5	78
Figura 5.34	Variação da pressão a 12.3 m/s – Material: encruado – fieira: 2 – óleo: MJF 5	78
Figura 5.35	Variação da pressão a 22.8 m/s – Material: recozido – fieira: 2 – óleo: MJF 5	79
Figura 5.36	Variação da pressão a 22.7 m/s – Material: encruado – fieira: 2 – óleo: MJF 5	79
Figura 5.37	Variação da pressão e temperatura a 1.2 m/s – Material: recozido – fieira: 9 – óleo: Honilo 171	82
Figura 5.38	Variação da pressão e temperatura a 11 m/s – Material: recozido – fieira: 9 – óleo: Honilo 171	82
Figura 5.39	Variação da pressão e temperatura a 22.8 m/s – Material: recozido – fieira: 9 – óleo: Honilo 171	82
Figura 5.40	Variação da pressão e temperatura a 1.1 m/s – Material: recozido – fieira: 3 – óleo: Honilo 171	83
Figura 5.41	Variação da pressão e temperatura a 10.6 m/s – Material: recozido – fieira: 3 – óleo: Honilo 171	83
Figura 5.42	Variação da pressão e temperatura a 22.7 m/s – Material: recozido – fieira: 3 – óleo: Honilo 171	83

- Figura 5.43 Variação da pressão e temperatura a 0.8 m/s - Material: 84 recozido - fieira: 3 – óleo: MJF 5
- Figura 5.44 Variação da pressão e temperatura a 11.5 m/s - Material: 84 recozido - fieira: 3 – óleo: MJF 5
- Figura 5.45 Variação da pressão e temperatura a 22.7 m/s - Material: 84 recozido - fieira: 3 – óleo: MJF 5
- Figura 5.46 Variação da pressão e temperatura a 0.7 m/s - Material: 85 recozido - fieira: 2 – óleo: MJF 5
- Figura 5.47 Variação da pressão e temperatura a 10.6 m/s - Material: 85 recozido - fieira: 2 – óleo: MJF 5
- Figura 5.48 Variação da pressão e temperatura a 22.8 m/s - Material: 85 recozido - fieira: 2 – óleo: MJF 5

Lista de Tabelas

Tabela 4.1	Composição Química do Aço Inoxidável ABNT 304 L [%]	39
Tabela 4.2	Parâmetros de processamento utilizados nos ensaios de trefilação	42
Tabela 4.3	Programa de ensaios experimentais	43
Tabela 4.4	Características dimensionais	43
Tabela 5.1	Variação da rugosidade superficial dos materiais de partida e dos produtos retrefilados.	47
Tabela 5.2	Espessura mínima – regime de filme fino	48
Tabela 5.3	Espessura mínima – regime de filme espesso	48
Tabela 5.4	Limite de resistência do aço inoxidável ABNT 304 L	49
Tabela 5.5	Viscosidade dinâmica dos lubrificantes	49
Tabela 5.6	Comportamento da geometria da fieira	53
Tabela 5.7	Ponto ótimo – Honilo 171	53
Tabela 5.8	Comportamento da geometria da fieira	56
Tabela 5.9	Ponto ótimo – MJF 5	56
Tabela 5.10	Espessura do filme – condições utilizadas para simulação	67
Tabela 5.11	Valores complementares assumidos para os parâmetros de trefilação	67
Tabela 5.12	Espessura do filme lubrificante – material recozido	68
Tabela 5.13	Espessura do filme lubrificante – material encruado	68

Nomenclatura

U	velocidade na direção x	[m/s]
b	coeficiente de temperatura	[°C ⁻¹]
p	pressão do filme	[N/m ²]
f	fieira	-
L	comprimento da região cilíndrica de calibração	[m]
D	diâmetro do material do fio num dado instante na região II	[m]
A	coeficiente de resistência mecânica	[Pa]
K	coeficiente de encruamento	-
T	tempo necessário para redução de D ₁ até D	[s]
x	abscissa relativa ao fio, variando de 0 a l	-
μ	coeficiente de atrito	-
ρ	densidade do material do fio	Kg/m ³
ε	deformação	-
τ	tensão de cisalhamento	[N/m ²]
β	semi-ângulo de conicidade da fieira	[°]
α	coeficiente de sensibilidade à variação de pressão	[m ² /N]
η	viscosidade absoluta (ou dinâmica) do fluido	[Pa.s]
δ	alongamento	[%]
V ₁ e V ₂	velocidade na direção y	[m/s]
U ₁ e U ₂	velocidade na direção x	[m/s]
w ₁ e w ₂	velocidade na direção z	[m/s]
h ₁	espessura do filme	[m]
ΔT	variação de temperatura	[°C]
D ₁	diâmetro inicial do material a trefilar	[m]
D ₂	diâmetro final do material trefilado	[m]
R ₀	raio inicial	[m]
R _f	raio final	[m]
D ₀	diâmetro inicial	[m]
D _f	diâmetro final	[m]
R _a	rugosidade aritmética média	[m]
H _c	cilindro de calibração	[%]
Fieira 1	2β = 10 e H _c /D _f = 20%	-

Fieira 2	$2\beta = 10$ e $H_c/D_f = 35\%$	-
Fieira 3	$2\beta = 10$ e $H_c/D_f = 50\%$	-
Fieira 4	$2\beta = 14$ e $H_c/D_f = 20\%$	-
Fieira 5	$2\beta = 14$ e $H_c/D_f = 35\%$	-
Fieira 6	$2\beta = 14$ e $H_c/D_f = 50\%$	-
Fieira 7	$2\beta = 18$ e $H_c/D_f = 20\%$	-
Fieira 8	$2\beta = 18$ e $H_c/D_f = 35\%$	-
Fieira 9	$2\beta = 18$ e $H_c/D_f = 50\%$	-
η_0	viscosidade inicial absoluta (ou dinâmica) do fluido	[Pa.s]
θ_b	temperatura do fio	[°C]
θ_f	temperatura da fieira	[°C]
θ_l	temperatura do filme lubrificante na entrada da região II	[°C]
k_l	condutibilidade térmica do lubrificante	[W/m °C]
k_b	condutibilidade térmica do material do fio	[W/m °C]
2β	ângulo de conicidade ou de trabalho da fieira	[°]
2ϑ	ângulo do cone de saída	[°]
2τ	ângulo do cone de entrada	[°]
σ_0	tensão limite de escoamento do material a trefilar	[Pa]
σ_y	tensão de escoamento em função da deformação provocada	[Pa]
σ_{xf}	tensão de trefilação	[Pa]
σ_{xb}	tensão frontal	[Pa]

Capítulo 1

Objetivos e Justificativas

1. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo estudar a lubrificação no tribo-sistema de trefilação, através da análise dos regimes de lubrificação possíveis de ocorrer na trefilação de fios de aço inoxidável.

Também pretende-se desenvolver um modelo físico-matemático que represente os fatores que influenciam a ocorrência dos diversos regimes de lubrificação, facilitando o seu entendimento e possibilitando definir condições de processamento ideais.

2. Justificativas

A realização deste trabalho justifica-se já que o processo em estudo, transformação a frio por trefilação, tem acentuada contribuição na obtenção de produtos manufaturados com alta precisão dimensional e boa qualidade superficial.

Justifica-se também pela necessidade de se estabelecerem de forma sistemática informações sobre lubrificação e fatores que a influenciam por meio do enfoque tribológico.

O conhecimento das variáveis envolvidas no tribo-sistema de trefilação é um fator de interesse não somente para os pesquisadores envolvidos com a área de conformação plástica, mas também para os fabricantes de máquinas, assim como para os profissionais preocupados com a melhoria da eficiência e da redução dos custos de produção.

Todos estes elementos traduzem-se em maior produtividade, menores custos e conseqüente aumento da competitividade num mercado globalizado.

Capítulo 2

Tribologia na Trefilação

A trefilação é um dos processos mais antigos de conformação de metais [Dove,1969]. Os adornos de ouro em forma de arame trabalhado foram incorporados aos adornos pessoais dos faraós egípcios quase 3.000 anos antes de Cristo. Em torno do ano de 1350, Rudolph de Nuremberg trouxe para a indústria o primeiro equipamento mecânico de trefilação que era movido a água. De 1850 a 1870, devido à difusão do telégrafo, a trefilação sofreu um grande avanço. Nos últimos 30 anos tem-se visto avanços nas técnicas de trefilação e no aperfeiçoamento do tratamento térmico contínuo, com menor interferência humana, com o objetivo de melhorar a uniformidade e a qualidade, aumentar a produtividade e reduzir os custos de produção.

O processo de trefilação ocorre pelo tracionamento [Gerds, Boulger, 1966] de fio, barra ou tubo através de uma matriz. Desde que a secção transversal da matriz é sempre menor que a peça trabalhada, o processo de trefilação ocasionará uma redução em área e um aumento no comprimento. Trata-se de um processo mecânico que confere ao material precisão dimensional [Dieter,1981] e melhores propriedades mecânicas. Logo, a finalidade do processo de trefilação é a obtenção de fio, barra, ou tubo de dimensões, acabamento superficial e propriedades mecânicas controladas. Por se tratar de uma área do conhecimento humano de extrema importância e utilização em grande escala, é de vital importância conhecer a força necessária e as diversas variáveis envolvidas no processo para que se possa:

- reduzir os tempos de parada de máquina devido a quebra de

material;

- dimensionar eficientemente partes integrantes de uma máquina trefiladora, com o objetivo de reduzir o nível de investimento;
- reduzir o desgaste das fieiras.

2.1 O Processo de trefilação

O processo de trefilação tem início com o fio-máquina, que é o material laminado a quente que não se fabrica em diâmetros menores que 5,5 mm.

Recorre-se também a recozimentos intermediários, pois cada passe de redução da seção transversal o material sofre um encruamento verificado pela elevação da tensão de escoamento do material que, ao atingir um certo valor, torna a trefilação impraticável.

Por outro lado, durante as etapas de recozimento, devido a fatores como temperatura, tempo de recozimento e componentes da atmosfera de recozimento [Ono,Uchida,Ishibashi,1992], o aço adquire uma película superficial de óxido que deve ser eliminada anteriormente à trefilação, devido ao maior coeficiente de atrito correspondente quando comparada com a superfície metálica nua. O processo utilizado para eliminação da película superficial de óxido é a decapagem.

A decapagem é uma etapa também necessária entre as diversas etapas de trefilação, não somente para eliminação de óxidos, mas principalmente para obtenção de uma superfície que retenha eficientemente o lubrificante e é realizada pela passagem dos rolos de arame por sistemas mecânicos (decapagem mecânica) ou por tanques em meio químico (decapagem química) [Tecnovo,1992].

Como mencionado, a determinação dos esforços é vital no processo de trefilação. Diversos pesquisadores, como Avitzur [1983], Bonzel [1935], Rowe [1965], Wistreich [1958], dedicaram muito tempo a esse estudo. Além desses pesquisadores, muitos outros têm trabalhado no sentido de estabelecer uma relação entre a força necessária para a trefilação e as diversas variáveis como: geometria de ferramenta, lubrificação,

temperatura e velocidade. A lubrificação, e conseqüentemente o atrito, é um dos principais fatores considerados ainda sem solução estabelecida.

Estudos sobre atrito têm início com Leonardo da Vinci, no século XV [Sargent, Tsao, 1980] dando continuidade com Parent, Hire, Belidor, mas principalmente Amontons, no século dezessete, que estudou detalhadamente a influência da rugosidade. Coulomb, 100 anos após Amontons, dá sua importante contribuição explicando a diferença entre atrito dinâmico e estático. Finalmente, 250 anos após Amontons, Holm (1946) e Bowden-Tabor (1950) encerram a visão do fenômeno do atrito pela hipótese da rugosidade e dão início ao estudo da hipótese da aderência interfacial associada à deformação plástica. Como pode-se verificar, o estudo do atrito é antigo, mas muitos dos seus aspectos fundamentais ainda não estão totalmente esclarecidos.

Define-se atrito como a resistência ao movimento relativo de dois corpos em contato direto. Em processos por conformação, esse movimento ocasiona deformações plásticas, aquecimento e desgaste, o que resulta em perda de eficiência e solicitação de maior potência. Isto deve-se ao fato que as superfícies, ainda que cuidadosamente trabalhadas, quando examinadas ao microscópio, apresentam-se constituídas de saliências e reentrâncias que ocasionam interação e intertravamento superficial.

Até os dias de hoje, têm-se encontrado muitas dificuldades no estudo do atrito, e o que se faz é definir alguns modelos de atrito e realizar ensaios simplificados de fabricação para determinar coeficientes de atrito relativos às condições de processamento próximas àquelas encontradas nos processos de conformação. Schey [1970] afirma que, apesar de ainda não ter sido desenvolvida uma teoria de trefilação suficientemente rigorosa, foram propostas algumas soluções aproximadas que são adequadas para explicar os efeitos do atrito na trefilação. A expressão do coeficiente de atrito (μ), expressão (2.1), extraído do método do limite superior, desenvolvido por Avitzur [1983], é o que melhores resultados tem apresentado. Um sumário dos métodos para determinação do coeficiente de atrito no processo de trefilação de arames encontra-se em Gerbase [1976] e Klein [1979].

$$\mu = \frac{\sigma_0 \left(\frac{\sigma_{xb}}{\sigma_0} + 2f(\beta) \ln \frac{R_0}{R_f} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\beta}{\sin^2 \beta} - \cot \beta \right) \right) - \sigma_{xf}}{2 \left(\left(\frac{L}{R_f} \sigma_{xf} \right) - \left(\sigma_0 \left\{ (\cot \beta) \left[1 - \frac{\sigma_{xb}}{\sigma_0} - \ln \frac{R_0}{R_f} \right] \ln \frac{R_0}{R_f} + \frac{H_c}{R_f} \right\} \right) \right)} \quad (2.1)$$

2.2 Tribologia

Os fenômenos que ocorrem na interface fio-matriz durante a trefilação podem ser considerados analisando-se fatores como:

- contato macrogeométrico;
- carga;
- velocidade;
- propriedades do lubrificante;
- contato microgeométrico.

Esses fatores acentuam o número de falhas mecânicas atribuídas a problemas de desgaste. Jost [1990] mostra os danos causados pela prática de lubrificação inadequada, desgaste desnecessário e atrito muito elevado. Como consequência, Centros de Tribologia foram fundados em 1968 na Grã-Bretanha. A palavra Tribologia vem do grego "tribein", que significa atritar. A Tribologia é uma área de estudo científico [Yust, 1985] que trata da interação entre superfícies sólidas em contato com movimento relativo.

Segundo Yust [1985], o estudo tribológico é extremamente complexo, por envolver:

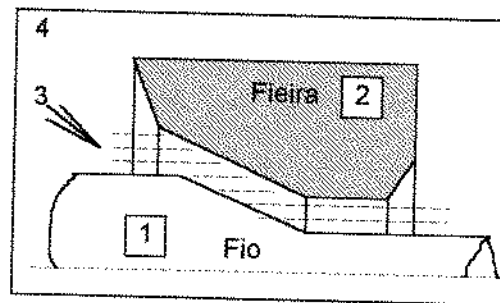
- a natureza dos sólidos em contato, que compreende a composição e microestrutura dos materiais;
- solicitações como pressão, velocidade e temperatura;
- a microtopografia, isto é, a natureza geométrica das superfícies;
- as reações químicas e de adsorção;
- a presença de filmes lubrificantes: gases, líquidos e sólidos.

Do ponto de vista tecnológico, a importância da tribologia é relacionada ao seu impacto e seu potencial para poupar energia e material através da redução do atrito e do desgaste [Czichos,1995].

2.3 Parâmetros tribológicos da trefilação

Na trefilação o material a conformar é deformado por meio de contato com a ferramenta. A pressão necessária para deformação gera uma tensão normal à superfície da ferramenta, e o movimento relativo do material a conformar com a superfície da ferramenta gera uma tensão tangencial na interface. Assim, uma clássica situação tribológica surge com atrito na interface ferramenta-material a conformar e com potencial para desgaste de ambas. Para aliviar estes efeitos utiliza-se um lubrificante [Lange,1985].

A figura 2.1 mostra os elementos do tribo-sistema que são objeto deste capítulo. Os diferentes fatores que afetam os tribo-elementos de trefilação serão melhor detalhados no decorrer do texto, neste e nos capítulos seguintes.



- | | |
|--------------------------------|----------------|
| 1. Tribo-elemento móvel | - Fio |
| 2. Tribo-elemento estacionário | - Fieira |
| 3. Tribo-elemento interfacial | - Lubrificante |
| 4. Tribo-elemento meio | - Atmosfera |

Figura 2.1 - Elementos básicos de um tribo-sistema de trefilação

2.3.1 Tribo-elemento móvel - Fio

O fio é o tribo-elemento móvel, composto normalmente por uma estrutura metálica policristalina que tem origem na laminação a quente. A qualidade da superfície do

material após a laminação a quente é caracterizada por diversos critérios: a presença de defeitos (lasca, marcas, dobras, etc.), a rugosidade superficial (altura de microrrugosidades, seu espaçamento, direções diferentes do microrrelevo), o estado estrutural da superfície (microestrutura de camadas de metal de superfície, nível de tensões residuais, orientação cristalográfica). Estas propriedades de superfície são formadas principalmente durante a laminação a quente e posterior resfriamento acelerado [Mazur, Goncharov, 1991]. Há algumas mudanças durante o tratamento térmico e subsequente decapagem. A remoção da escama permite o controle dos defeitos da superfície e a avaliação dos parâmetros de rugosidade superficial. A magnitude e caráter da rugosidade da superfície do material depois da decapagem depende de sua estrutura cristalina.

A condição superficial inicial do material a ser trefilado é um dos fatores mais importantes a influenciar a trefilação [Sargent, Tsao, 1980], pois determina o regime de lubrificação na zona de deformação, pelo carregamento de lubrificante e manutenção do lubrificante durante a trefilação.

Segundo Wilson [1977], a magnitude do efeito da rugosidade aumenta com o aumento da viscosidade e da velocidade de deformação.

Schey [1983] afirma que superfícies com rugosidades paralelas à direção de escoamento permitem uma maior possibilidade de fuga do lubrificante, se comparado às rugosidades perpendiculares. Assim, a rugosidade do fio influencia o mecanismo de lubrificação e, conseqüentemente, a rugosidade do produto.

A qualidade superficial do produto acabado é uma das principais exigências do mercado e a sua obtenção e controle tem sido a preocupação de diversos pesquisadores, como Tripp [1983], Wilson [1979], Baker, Wright [1992], entre outros. Nakamura et al. [1980] introduziram uma metodologia que possibilita o controle da qualidade superficial, denominada "Razão de alisamento", que é a relação entre a área lisa da superfície da amostra e a área total da superfície da amostra. A figura 2.2 mostra a relação de alisamento, espessura da película lubrificante residual e a pressão de lubrificante. Nesta figura pode ser visto que a relação de alisamento torna-se menor

com a redução na espessura da película lubrificante residual e com o aumento na pressão de lubrificação. A razão de alisamento tem um relacionamento muito próximo com a capacidade do lubrificante de manter as áreas lubrificadas.

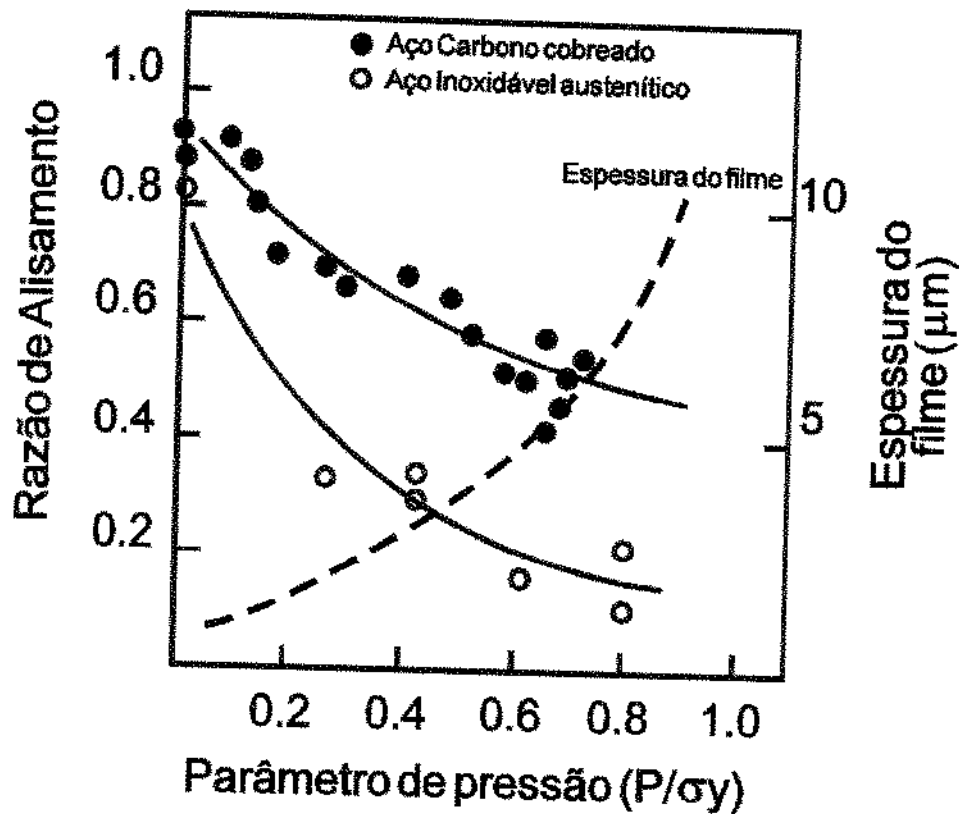


Figura 2.2 - Efeito da rugosidade do material [Nakamura et al., 1980]

2.3.2 Tribo-elemento estacionário - Fieira

A ferramenta apropriada para realizar convenientemente o processo de trefilação é o tribo-elemento estacionário denominado fieira, que é constituída de regiões distintas ao longo do furo interno, como visto na figura 2.3. A fieira é fabricada com materiais de extrema resistência ao desgaste, empregando-se comumente metal duro (carboneto de tungstênio), diamante (natural ou policristalino) e também alguns materiais cerâmicos (óxido de zircônio, carboneto-nitreto de titânio, etc.). Qualquer que seja o material usado na fabricação das ferramentas para trefilação, são exigidas as seguintes características [Bresciani, 1991]:

- permitir a trefilação de grande quantidade de fios sem que ocorra um desgaste acentuado da fieira;

- permitir a trefilação a altas velocidades para produzir elevadas quantidades por unidade de tempo;
- permitir a adoção de elevadas reduções de secção;
- conferir calibração constante do diâmetro do fio;
- conferir longa vida à ferramenta, sem necessidade de paradas da máquina de trefilar para controle de dimensões e substituição da ferramenta.

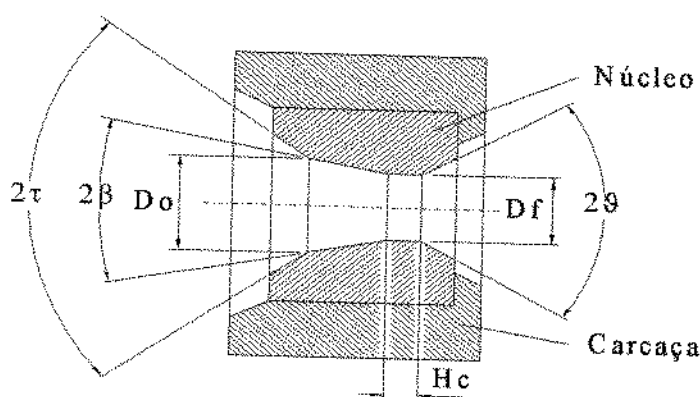


Figura 2.3 - Representação das partes de uma fiação [Bresciani, 1991].

Como visto, as exigências feitas sobre a ferramenta são grandes e voltadas à sua durabilidade, que somente poderá ser obtida pelas condições de baixo atrito e desgaste. Logo, a durabilidade da fiação depende diretamente dos regimes de lubrificação presentes no processo que, por sua vez, dependem da rugosidade da ferramenta e do material a conformar, com a complicação adicional que a aspereza da superfície do material a conformar muda no curso da deformação. Assim, a rugosidade da peça e da ferramenta influenciam o mecanismo de lubrificação que, por sua vez, determina a aspereza do produto acabado [Schey, 1983].

Outro elemento de importância para a obtenção e manutenção do regime de lubrificação é a definição de uma geometria interna ótima. Como mencionado, a fiação é constituída de regiões distintas, sendo a de maior importância o ângulo onde ocorre a redução. Esta região é definida como ângulo de trabalho (2β); é a região onde é

aplicada ao fio o esforço de compressão e onde o atrito deve ser minimizado para reduzir, também ao mínimo, o desgaste da fieira. No ângulo de trabalho acontece a conformação, isto é, ocorre o processo de redução da secção transversal do fio. Aqui tem-se a transformação de parte da tensão de tração em tensão de compressão induzida pela conicidade da fieira. Bonzel [1935] afirma que a associação de um ângulo ótimo, que é o ângulo ideal para a mínima força de trefilação, com um regime ótimo de lubrificação permite a obtenção de alta qualidade superficial do fio trefilado e menor desgaste da fieira. Segundo Rowe [1965], um regime ótimo de lubrificação é mais facilmente obtido através do uso de pequeno ângulo de trabalho e uma grande velocidade. O tipo de material a ser trefilado e a porcentagem de redução da secção transversal são outros dois fatores que influenciam na definição do ângulo 2β [Koner, 1992].

O melhor sistema para se determinar experimentalmente o ângulo ótimo de trabalho [Frascio, 1970] é através do controle da variação da tensão de tração, em função da variação do cone de trabalho, fixando outros parâmetros, como: qualidade e rugosidade da fieira utilizada, diâmetro e qualidade do fio, tipo de lubrificante e velocidade de trefilação.

Vários trabalhos foram publicados com o objetivo de desenvolver uma expressão que atenda plenamente a definição do ângulo ótimo 2β , como os de Cristescu [1980], Maxwell [1991] e Henninger [1994], que apresentam também alternativa para uma dificuldade adicional que é a fabricação de fieiras com pequeno ângulo de cone de trabalho.

Outra região, existente na ferramenta de trefilação, se destaca pela sua função de auxiliar o ângulo 2β a manter uma película espessa na interface de deformação e principalmente na calibração ou ajuste do diâmetro do fio. Esta região é denominada como região cilíndrica de calibração (Hc). A função de Hc na ferramenta de trefilação é o controle final do diâmetro do fio trefilado para garantir a sua retilidade, concentricidade e acabamento superficial [Maxwell, 1991]. Por esta razão, a superfície

deve ter um acabamento espelhado e tolerância dimensional fechada. É geralmente dividida em classes [Eder, 1981]:

pequeno - quando tem de 0 a 20 % do diâmetro;

médio - de 20 a 30 % do diâmetro;

longo - quando tem de 30 a 50 % do diâmetro.

Segundo Frascio [1970], ao cilindro de calibração não basta ser exato e liso, como o cone de trabalho, mas seu comprimento deve ser proporcional ao diâmetro e à redução de secção a ser efetuada. Se for longo, pode ocasionar uma resistência ao movimento do material trabalhado e, se for curto, pode determinar um alargamento prematuro do cilindro. Keebler [1990] afirma que, para prevenir o rápido desgaste da ferramenta acima das medidas toleráveis, o comprimento do cilindro de calibração deve ser de 35 a 66% do diâmetro final.

2.3.3 Tribo-elemento interfacial - Lubrificante

O tribo-elemento interfacial é o lubrificante. Ele tem a função de manter separadas as superfícies da ferramenta e do material a conformar, sendo a sua viscosidade o principal indicador de eficiência.

Lubrificante é todo ou qualquer material sólido, líquido ou gasoso de baixa resistência ao cisalhamento interposto entre dois corpos. O objetivo do lubrificante é impedir o contato direto de dois corpos (figura 2.4), evitando assim o cisalhamento e arrancamento de partes microscópicas dos materiais envolvidos. Isto significa substituir uma condição de atrito sólido de deslizamento, de conseqüências danosas ao processo, por um atrito fluido.

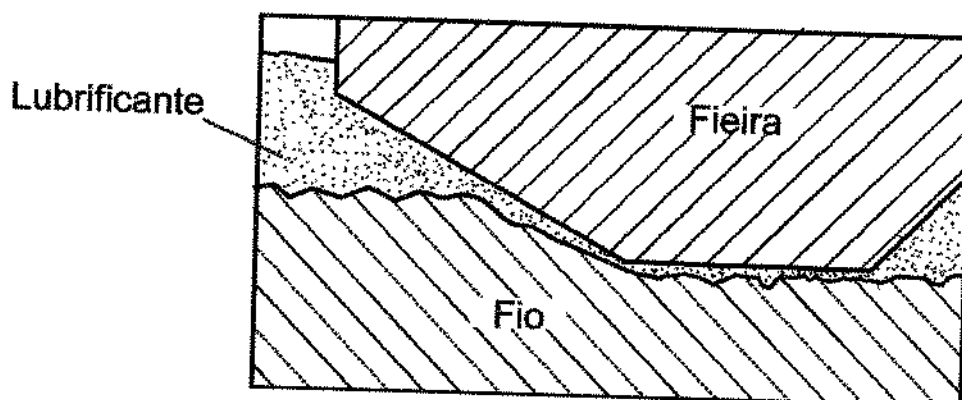


Figura 2.4 - Lubrificante no processo de trefilação [Nakamura et al., 1980]

O conhecimento da lubrificação se baseia nas experiências desenvolvidas por Navier-Stokes, Beauchamp Tower, entre outros e nas interpretações dadas por Osborne Reynolds. Este verificou a existência de duas espécies de escoamento de fluidos: o escoamento turbulento, onde a resistência do fluido varia com o quadrado da velocidade, e o escoamento laminar onde a resistência ao escoamento varia diretamente com a velocidade. Tem especial interesse neste trabalho o comportamento de escoamento laminar dos líquidos denominados Newtonianos, que são aqueles onde o grau de cisalhamento é proporcional à tensão de cisalhamento. A expressão 2.2 define o modelo da tensão de cisalhamento viscoso, proposto por Newton para fluidos denominados newtonianos [Cameron, 1966].

$$\tau = \frac{\eta \cdot v}{h} \quad (2.2)$$

A escolha correta do lubrificante é uma das grandes dificuldades existentes em qualquer processo [Alkire, Huey, Kajuch, 1989]. Esta escolha baseia-se em parâmetros como os materiais usados na ferramenta e na peça, a temperatura e a velocidade de processo. A eficiência do lubrificante está relacionada à sua capacidade de formar uma película estável sob as condições de processo, que previna o contato entre as superfícies [Button, 1990]. Duas características do processo de trefilação têm grande influência na escolha correta do lubrificante: a temperatura de trabalho (figura 2.5), que atua de forma direta na viscosidade do lubrificante [Flanders, Alexander, 1979], e a pressão de trabalho que é constante e diretamente proporcional à redução de secção

transversal do material. Logo, no caso específico da trefilação o lubrificante deve satisfazer às seguintes propriedades:

- (1) ser capaz de manter separadas a superfície da fieira e do material trefilado durante todo o processo de trefilação;
- (2) manter-se estável perante a mudança de temperatura;
- (3) não reagir quimicamente com as superfícies metálicas;
- (4) manter limpas as superfícies lubrificadas.

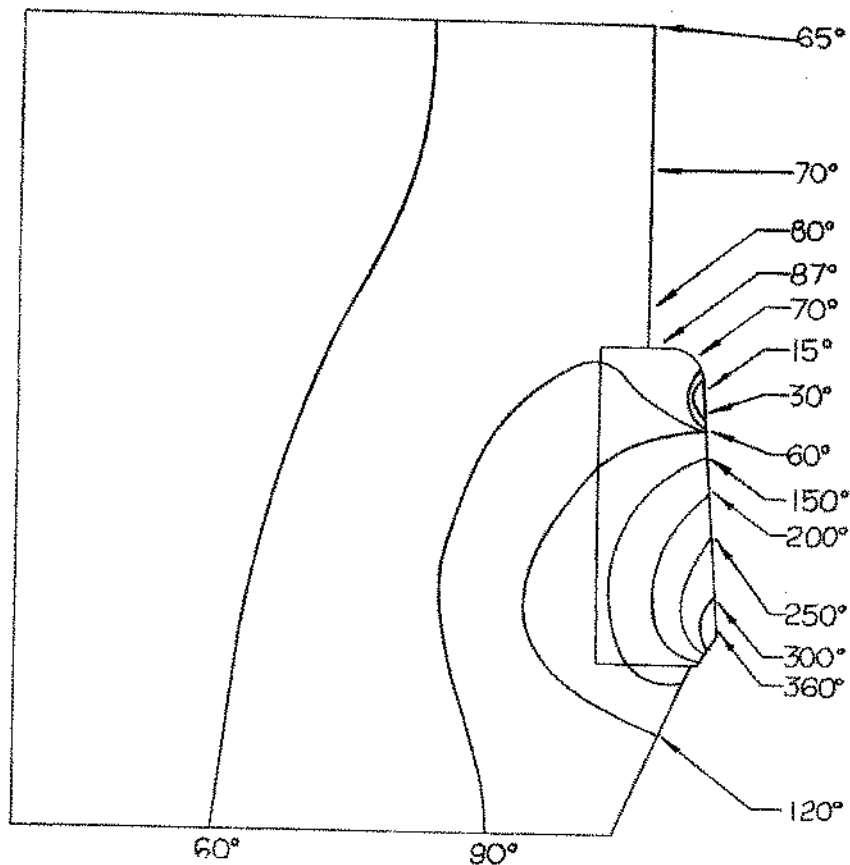


Figura 2.5 – Distribuição de temperaturas na fieira em °C [Dove, 1969]

Cetlin, Helman [1983] confirmam a necessidade dessas propriedades, afirmando que as funções de um lubrificante são múltiplas e complexas, e acrescentam outras propriedades :

- (a) cumprir a missão dupla de lubrificante e agente refrigerante;
- (b) não deixar resíduos ao se tratar termicamente o material processado;

- (c) ser de fácil remoção da superfície do produto nas operações e acabamento.

Hoje, a importância da lubrificação nos processos de conformação de metais é baseado, não somente em fatores técnicos, mas, principalmente, em fatores econômicos. Cockcroft [1967] justifica esta importância afirmando que a melhoria das condições da lubrificação resultam em diversas vantagens para o processo de conformação, como:

- a - Redução de atrito: valores elevados do atrito conduzem a perdas de potência e aumento das cargas de trabalho das máquinas de conformação; isto também é importante pois uma carga elevada conduz a tensões elevadas no fio trefilado, que podem provocar a sua fratura.

- b - Redução do desgaste: a redução do desgaste da ferramenta reflete no custo da operação e nas tolerâncias dimensionais e nos acabamentos superficiais do produto; a presença do lubrificante, além de reduzir o contato metal-ferramenta, em alguns casos, atua como refrigerante.

- c - Controle da deformação: na medida em que o lubrificante controla o atrito e, conseqüentemente, as tensões atuantes nos diversos pontos da peça de trabalho, ela condiciona também a distribuição das deformações no sentido de homogeneizar essas deformações e minimizar o aparecimento de defeitos.

A mais vantajosa condição de lubrificação é a hidrodinâmica, que ocorre quando um filme de fluido lubrificante se desenvolve entre duas superfícies em relativo movimento. Nesse caso, a resistência ao movimento das superfícies é somente dependente da viscosidade do fluido [Hondros, 1971]. Não há, teoricamente, desgaste, uma vez que as superfícies lubrificadas nunca entram em contato.

A trefilação de arame a altas velocidades requer boa lubrificação superficial do material e da ferramenta [Golis et al., 1997], objetivando-se a separação total e permanente das superfícies de modo a reduzir o contato entre elas.

Segundo Wilson [1979] a separação total das superfícies atinge-se somente quando da interposição de uma espessura de camada de lubrificante de, no mínimo, três vezes o valor da soma das rugosidades superficiais dos tribo-elementos fio e fiação.

Quanto à espessura do filme de lubrificação existente entre as superfícies, Wilson [1979] define os regimes de lubrificação que podem estar presentes nos processos de conformação, como: regime de filme pleno (espesso e fino), regime de filme limite e regime misto, conforme descritos a seguir:

a. Regime de filme espesso (figura 2.6.a): nesse regime, a película do lubrificante é contínua e tem uma espessura maior do que dez vezes a rugosidade quadrática média das superfícies envolvidas. O coeficiente de atrito é pouco útil nesse caso, porém, de modo grosseiro, são medidos coeficientes menores que 0,05. A resistência ao movimento é definida pelas propriedades físicas do lubrificante. Neste regime não ocorre desgaste metálico, mas podem surgir defeitos ocasionados pela corrosão do tipo erosão.

b. Regime de filme fino (figura 2.6.b), onde a espessura do filme apresenta-se entre três a dez vezes o valor da rugosidade superficial média das superfícies. A espessura do filme é sempre maior que o tamanho molecular do lubrificante e, desta forma, a interação entre as saliências é responsável por uma pequena parcela da carga atuante na interface.

c. No regime de camada limite (figura 2.6.c), o filme que separa as superfícies apresenta espessuras da ordem de algumas vezes o tamanho molecular do lubrificante. O desgaste é maior do que nos outros regimes e a rugosidade da peça tende a decrescer desde que não ocorra a ruptura do filme.

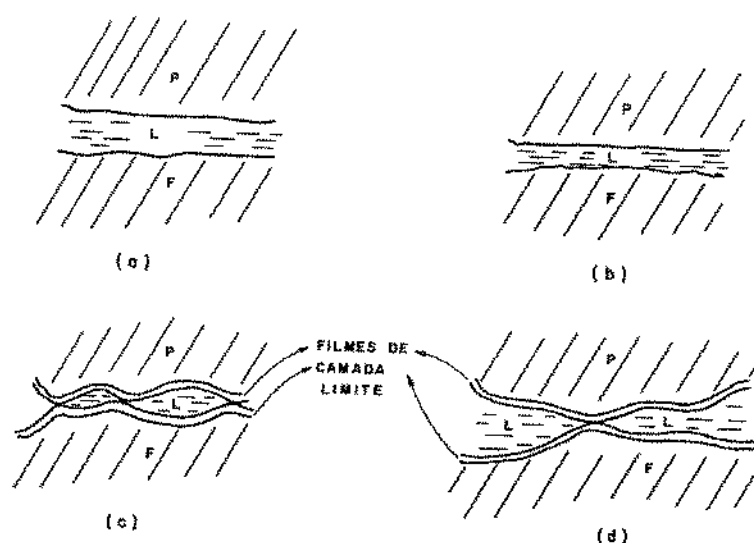


Figura 2.6 - Representação dos regimes de lubrificação em processos de conformação [Wilson, 1979]

d. Regime de lubrificação mista (figura 2.6.d), onde a espessura do filme é menor que três vezes o valor da rugosidade média das superfícies. Os coeficientes de atrito podem variar de valores abaixo de 0,05 (regime de filme espesso) a valores acima de 0,4 (regime de camada limite).

O estabelecimento de um ou mais regimes de lubrificação, durante o processo de trefilação, está relacionado a fatores como a velocidade do processo, a viscosidade do lubrificante e a força aplicada nas superfícies. Os regimes podem sofrer modificações de um tipo para o outro, em diferentes pontos da peça ou num mesmo ponto durante o processamento.

Pelo apresentado por Wilson [1979], fica claro que a espessura da camada de lubrificante é fundamental para obtenção de uma lubrificação adequada, mas, para que espessuras ideais possam ser obtidas, é preciso considerar o aumento de velocidade e sua influência sobre a temperatura e, conseqüentemente, sobre a viscosidade e a continuidade do filme lubrificante.

A figura 2.7 apresenta a curva de Stribeck [Wright, 1997] onde se verifica a relação da variação da espessura do filme lubrificante com os diversos regimes de lubrificação.

A baixas velocidades, a quantidade de lubrificante carregada para a região de contato é mínima; somente algumas poucas camadas atômicas de lubrificante aderem às superfícies, caracterizando o regime de camada limite; a possibilidade de contato metálico é grande, bem como o coeficiente de atrito.

Com o aumento da velocidade, assumindo que a viscosidade e força permaneçam constantes, uma maior quantidade de lubrificante é trazida à região de contato, preenchendo os vales, separados por passagens estreitas entre picos. Com o decorrer do processo, mais e mais lubrificante é trazido para os vales até que se estabelece um regime misto. As camadas de filme lubrificante são continuamente supridas pelo lubrificante existente nos vales.

O regime hidrodinâmico representa a presença de um filme contínuo entre as superfícies. A existência desse filme é possível graças à deformação provocada nos picos, que, ao torná-los mais planos, faz com que o lubrificante existente nos vales seja distribuído ao longo das superfícies, separando-as totalmente. A queda do coeficiente de atrito é facilmente explicada pela crescente separação das superfícies. Já o aumento do coeficiente, após atingir-se o regime hidrodinâmico, pode ser explicado observando-se a quantidade de lubrificante presente entre as superfícies, bem como a pressão a que estará submetido o filme.

Um dos principais elementos para possibilitar uma camada fina ou espessa de lubrificante é o mecanismo de arraste. Este mecanismo (figura 2.8), obtido da inter-relação velocidade do fio e ângulo 2β da fieira, permite que o filme lubrificante seja levado para a zona de conformação por um efeito de "cunha" [Cheng, 1992].

2.4 Formação e influência do regime hidrodinâmico na trefilação

Desde Christopherson, Naylor [1955], muitos trabalhos foram publicados com o objetivo de conhecer e possibilitar a trefilação com uma fina ou espessa, mas contínua, camada de lubrificante que caracteriza a condição de trefilação hidrodinâmica.

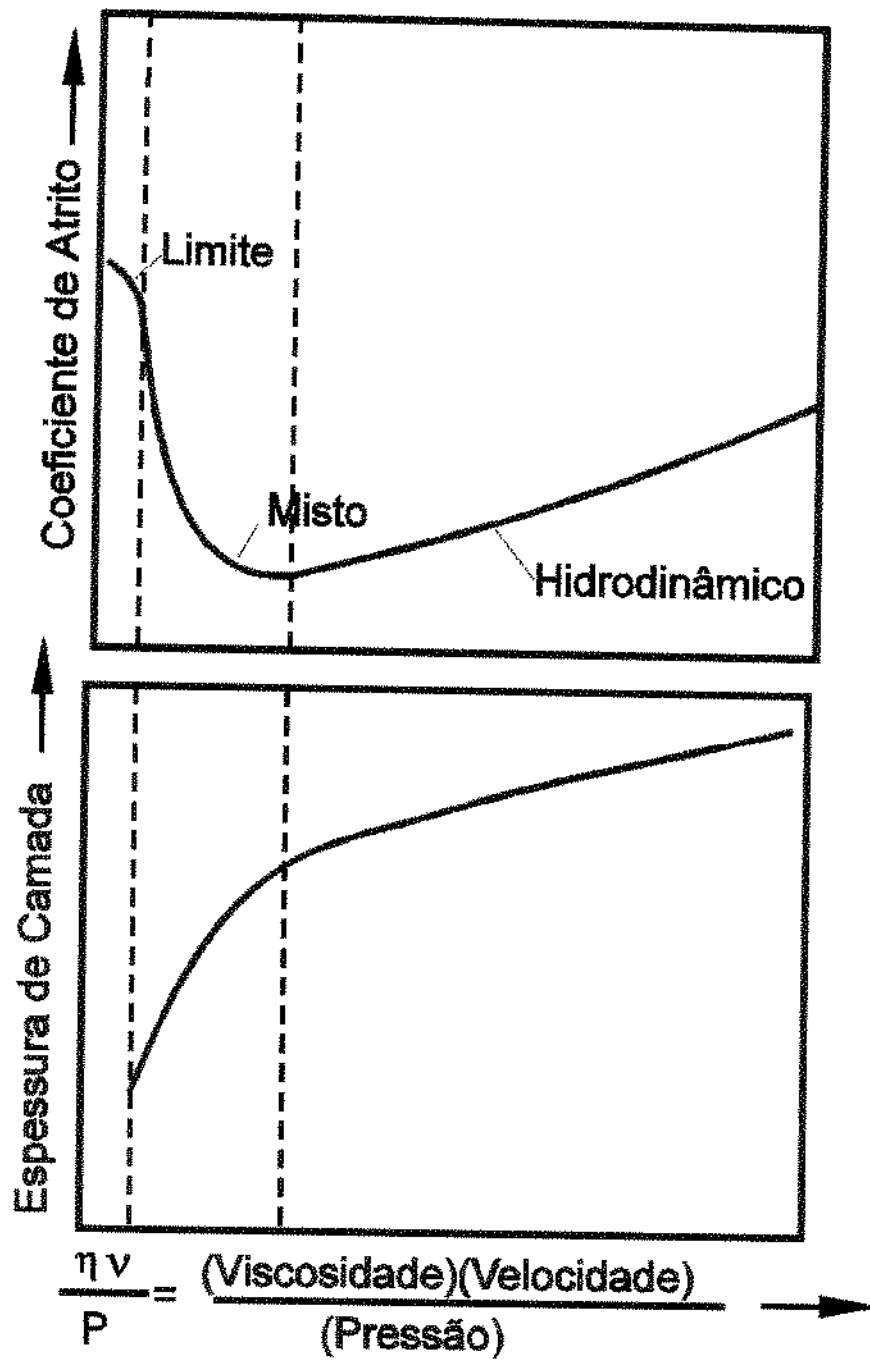


Figura 2.7 - Curva de Stribeck [Wright, 1997]

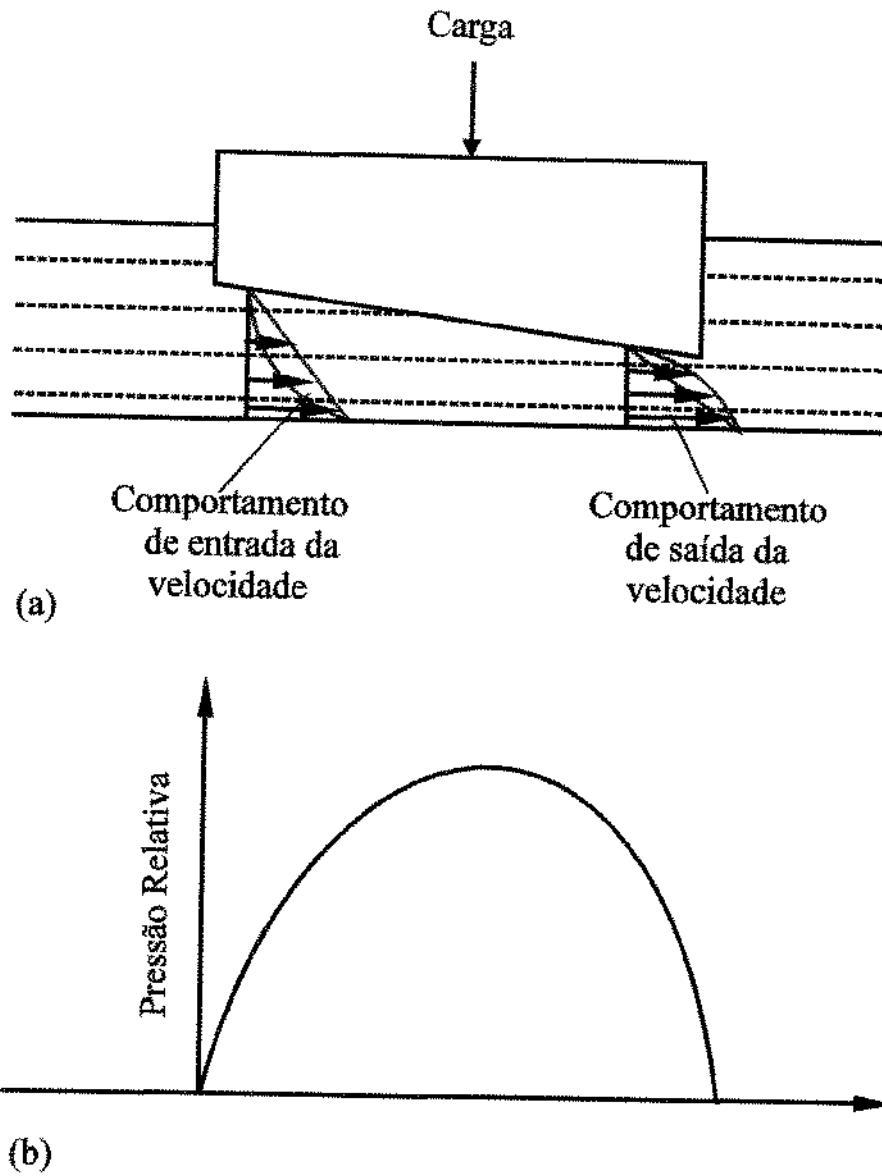


Figura 2.8 - Escoamento em cunha do fluido [Cheng, 1992].

- (a) Perfil de velocidade na entrada e saída da região de deformação.
(b) Distribuição de pressão na região de deformação.

Orlov [1967] desenvolveu um dos primeiros projetos de sistema de fieira de pressão que garante a lubrificação hidrodinâmica sob condições normais de produção industrial. Com o uso da fieira de pressão obteve-se um aumento da vida da fieira e da velocidade.

Weinhold, Pössnecker, Eickemeyer [1993] estudaram a influência do sistema de fieira de pressão na obtenção da condição hidrodinâmica na trefilação do aço inoxidável com o uso de lubrificante sólido. Os resultados mostram que a pressão de lubrificante sofre influência da fieira de pressão e da fieira de trabalho e pouca ou nenhuma influência do comprimento da câmara de pressão (figura 2.9).

Sarver, Sarver [1994] apresentam um modelo simples de sistema de fieira de pressão; mostram também os principais problemas que ocorrem no uso do sistema:

- dificuldade na dissipação da temperatura;
- concentração de contaminantes na câmara de pressão;
- falta de controle da pressão na câmara.

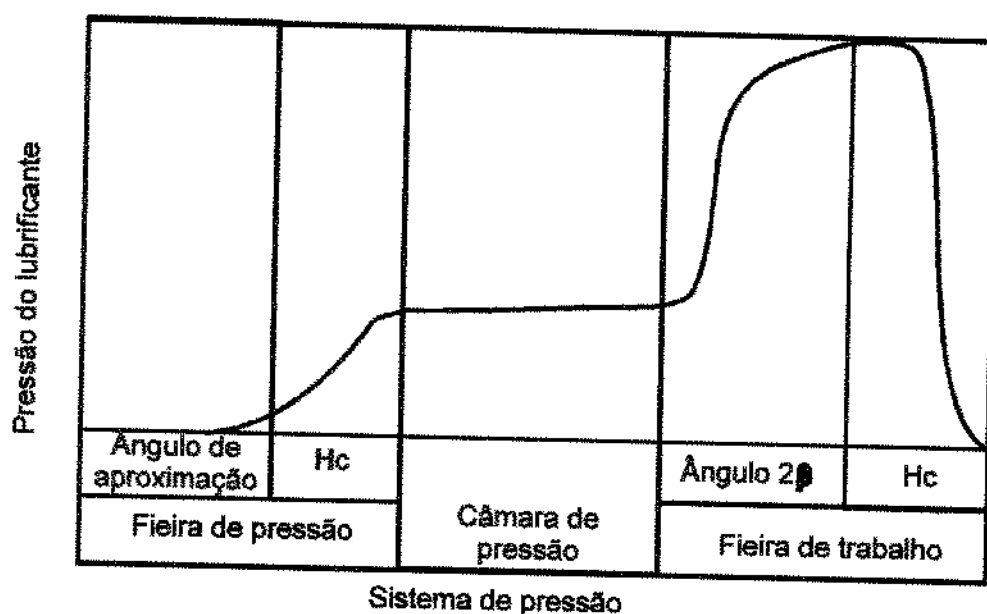


Figura 2.9 – Comportamento da pressão - esquemático [Weinhold, 1993]

Golis et al. [1997] estudaram a influência do uso de feiras de pressão na trefilação de aços, com teores de carbono de 0,1 a 1,0 %, mostrada através do comportamento das propriedades mecânicas na trefilação hidrodinâmica (figura 2.10).

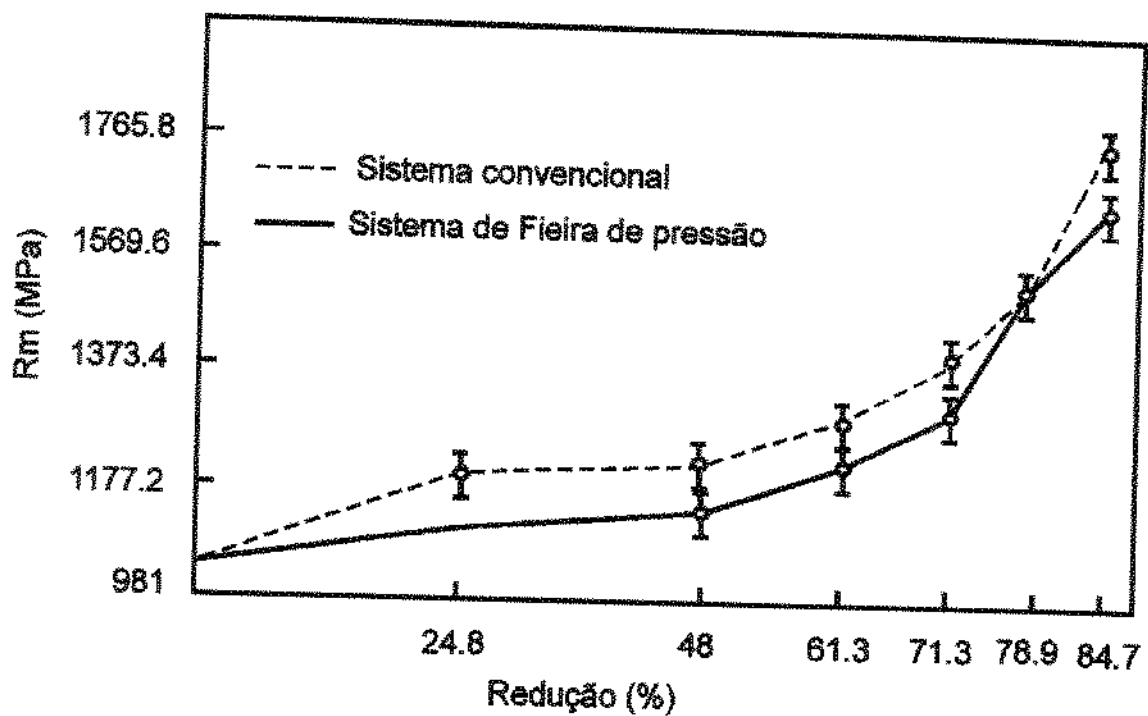


Figura 2.10 - Limite de resistência a tração [Golís et al., 1997]

Aernoudt [1989], Hajare [1991] e Pilarczyk [1997] estudaram a influência da trefilação hidrodinâmica na melhoria das características ASTRO (análise, estrutura, textura, tensão, superfície) dos aços. A figura 2.11 apresenta a redução da rugosidade conseguida com o uso de fieiras de pressão.

Shima, Watanabe, Oyane [1985] estudaram a influência do comprimento da região de deformação na lubrificação. Foi observado que a lubrificação é afetada pelo tamanho do comprimento de contato, se outras condições, como ângulo de trabalho e velocidade, se mantiverem inalteradas.

Grudev et al. [1984] desenvolveram um procedimento experimental para determinar a espessura média de lubrificante na região de deformação. Eles verificaram que a camada de lubrificante na região de deformação aumenta com a velocidade e diminui à medida que aumenta o número de passes de redução da secção transversal.

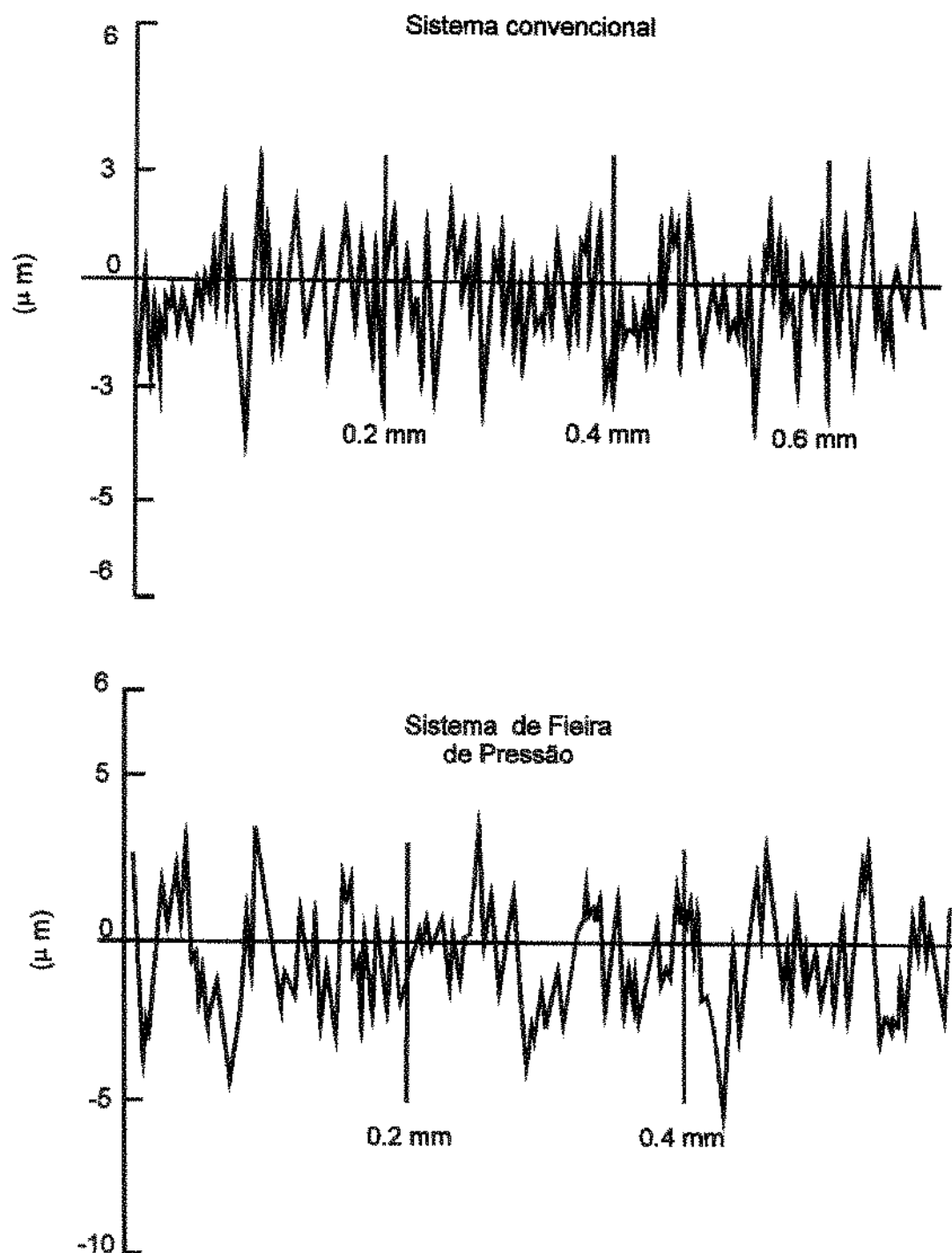


Figura 2.11 – Rugosidade superficial na trefilação convencional e trefilação hidrodinâmica [Pilarczyk, 1997].

Felder [1978] e Kaplanov et al. [1991] estudaram a formação da lubrificação hidrodinâmica e sua dependência de parâmetros como geometria da fleira, propriedades reológicas do lubrificante e porcentagem de redução.

Capítulo 3

Modelagem do Tribo-elemento Interfacial

Como visto nos capítulos anteriores, o uso de lubrificantes na trefilação de fios reveste-se de grande importância. Principalmente quando atingem-se valores elevados de velocidades de processo como 20 m/s. Isto porque altas velocidades alteram as condições de deformação, as condições de lubrificação, e, portanto, de atrito, e provocam sensíveis alterações nas temperaturas do fio através de sua seção transversal que pode conduzir a alterações sensíveis da estrutura e das propriedades mecânicas, em particular, da ductilidade e, ainda, criando condições para o aparecimento de tensões residuais.

A previsão do regime de lubrificação sob as diferentes condições resultantes da variação da velocidade é primordial para a continuidade do processo e, conseqüentemente, na escolha adequada do lubrificante.

Obter um modelo matemático razoavelmente preciso que represente os aspectos essenciais do regime de lubrificação que ocorre no processo de trefilação a altas velocidades é o objetivo deste capítulo.

Existem diversos métodos analíticos, baseados ou não em experiências, que conduzem a expressões com validade limitada às condições impostas pelos ensaios e pela necessidade de simplificar o modelo físico-matemático para encontrar uma solução do problema. Além disso, as experiências são conduzidas a velocidades muito baixas, ao contrário das velocidades adotadas no processo industrial.

O método científico consiste em quatro etapas:

- a. observação do sistema físico;
- b. formulação de um modelo matemático que explique as observações do tribo-sistema;
- c. execução de experimentos para determinar alguns parâmetros a serem utilizados no modelo;
- d. análise matemática para prever o comportamento do tribo-sistema, obtendo soluções para o modelo.

O modelo físico-matemático desenvolvido apresenta-se multidisciplinar; apesar disso, mantemos o compromisso entre a simplicidade do modelo desenvolvido e a precisão dos resultados objetivando a facilidade de sua utilização no processo industrial. As hipóteses simplificadoras assumidas relacionam-se ao processamento de fios, diretamente relacionado aos objetivos deste trabalho.

3.1 Análise do escoamento do fluido lubrificante

A lubrificação na trefilação ocorre pelo carreamento do fluido lubrificante pelo movimento quase-estacionário próprio do processo. No caso da trefilação, o escoamento do fluido lubrificante é facilitado pela formação de uma cunha entre a superfície da fieira e do fio trefilado (figura 2.8), onde o primeiro é fixo e o segundo move-se com uma velocidade U paralela ao eixo x (figura 3.1).

A análise desse escoamento pode ser feita com o uso da equação 3.1 desenvolvida por Reynolds [Cameron, 1966], obtendo-se as pressões e conseqüentes espessuras atingidas pelo fluido. Muitas hipóteses foram assumidas por Reynolds a fim de tornar tratável matematicamente o seu modelo para o caso tridimensional.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6 \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[(U_1 + U_2) h \right] + \frac{\partial}{\partial y} (V_1 + V_2) h + 2(w_1 - w_2) \right\} \quad (3.1)$$

Hipóteses assumidas:

- a pressão é constante através da espessura do filme;
- a curvatura da superfície é muito grande em relação à espessura do filme;
- não há componente de velocidade em relação à curvatura;
- a velocidade do fluido nas adjacências do corpo é a mesma do corpo. Não há deslizamento;
- o lubrificante é newtoniano, isto é, a tensão de cisalhamento do material da interface (τ_i) é proporcional à tensão normal (σ). O escoamento é laminar;
- a viscosidade do fluido é constante através da espessura do filme.

Com as simplificações, particulares à trefilação, feitas sobre a equação genérica,

$$\begin{aligned}
 w_1 = w_2 = 0 & & V_1 = V_2 = 0 \\
 U_1 = U & \quad U_2 = 0 & 2(w_1 - w_2) = 0 \\
 \frac{\partial}{\partial y}(V_1 + V_2)h = 0 & & \frac{\partial}{\partial x}[(U_1 + U_2)h] = \frac{\partial}{\partial x}[(U)h] = U \frac{\partial h}{\partial x} \\
 \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y}\right) = 0 & &
 \end{aligned}$$

ela se reduz a uma expressão dependente somente da direção x , com orientação em sentido contrário à diminuição do filme, como mostrado na figura 3.1:

$$\frac{d}{dx}\left(\frac{h^3}{\eta} \frac{d}{dx}\right) = 6U \frac{dh}{dx} \quad (3.2)$$

Integrando-se a expressão (3.2) obtém-se a equação básica da lubrificação hidrodinâmica de fios:

$$h^3 \frac{dp}{dx} = 6\eta U h + C \quad (3.3)$$

Para se aplicar a expressão (3.3) às condições da trefilação, com o objetivo de se prever a espessura do filme lubrificante, mais algumas hipóteses são necessárias:

- a - a fieira é rígida;
- b - o material é elasto-plástico, obedece a critérios de escoamento de von Mises;
- c - existe a condição isotérmica [Wilson, Walomit, 1971].

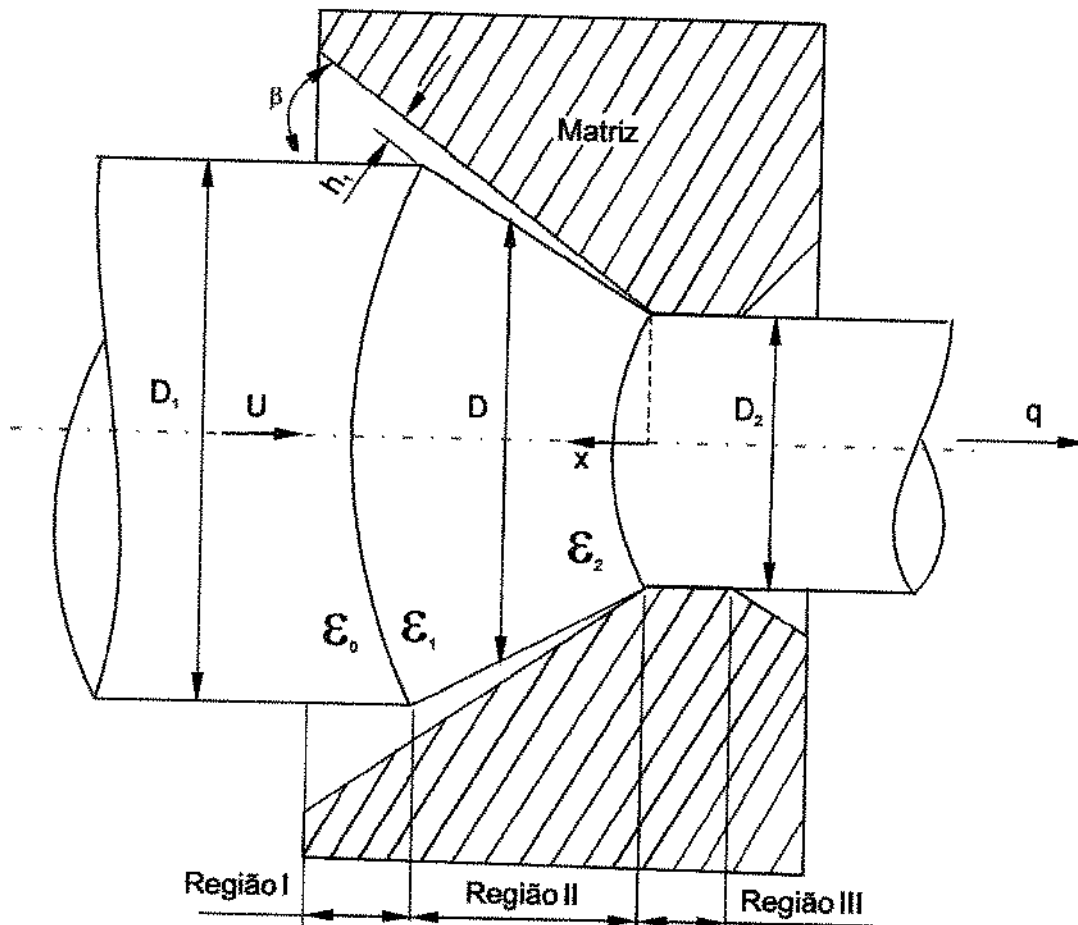


Figura 3.1 – Regiões da fieira

3.2 Análise na região de entrada

O estudo da lubrificação para a região de entrada é realizado com a finalidade de determinar a espessura do filme (h_1) e a pressão atuante sobre o fluido no primeiro instante de deformação.

Observando-se a figura 2.8, que representa o escoamento em cunha do fluido, e a expressão (3.3), verifica-se que:

$$h_1 \Rightarrow \frac{dp}{dx} = 0 \quad (3.4)$$

por se tratar de um escoamento com distribuição linear de velocidade, conhecido como escoamento de Couette [Schiozer, 1990], que substituindo na expressão (3.3), obtém-se o valor da constante de integração C:

$$C = -6.\eta.U.h \quad (3.5)$$

Introduzindo a expressão (3.5) na expressão (3.3), obtem-se a expressão final para a variação da pressão em função de x:

$$\frac{dp}{dx} = -6\eta U \left(\frac{h_1 - h}{h^3} \right) \quad (3.6)$$

A expressão (3.6) tem duas soluções:

(a) a condição em que a variação de temperatura no filme lubrificante é inexpressiva, o que permite resolver a expressão (3.6), considerando-se somente a dependência de η em relação a p . Assim, utiliza-se a expressão de Cameron [Chu, Cameron, 1962]:

$$\eta = \eta_0 . e^{\alpha . p} \quad (3.7)$$

resultando

$$e^{-\alpha . p} \frac{dp}{dx} = -6\eta U \left(\frac{h_1 - h}{h^3} \right) \quad (3.8)$$

Como a espessura h pode ser relacionada a x de forma geométrica

$$h = x . \text{tg} \beta \quad (3.9)$$

integrando-se a expressão (3.8) e adicionando a expressão (3.9), tem-se:

$$e^{-\alpha . p} = \frac{-6\alpha U \eta_0}{x . \text{tg}^2 \beta} \left(1 - \frac{h_1}{2x . \text{tg} \beta} \right) + A \quad (3.10)$$

O valor de A é obtido aplicando-se as condições de contorno:

$$p = \sigma_0 \quad x = x_i$$

$$A = 1 + \frac{-6\alpha U \eta_0}{x_i \cdot \text{tg}^2 \beta} \left(1 - \frac{h_1}{2x_i \cdot \text{tg} \beta} \right) \quad (3.11)$$

Pelo critério de escoamento de von Mises para coordenadas cilíndricas de tensão nos quais σ_0 é a tensão limite de escoamento do material a trefilar e, adicionando-se a expressão (3.10), encontra-se a espessura do filme na região de entrada (figura 3.1)

$$h_1 = \frac{3 \cdot U \cdot \eta_0 \cdot \alpha}{\left(1 - e^{-\alpha \cdot \sigma_0} \right) \cdot \text{tg} \beta} \quad (3.12)$$

(b) a condição em que a variação de temperatura no filme lubrificante é expressiva, o que nos leva a resolver a expressão (3.6) considerando-se que o calor gerado pela redução da secção do fio é dissipado no filme por condução. Esse aumento de temperatura é responsável pela queda da viscosidade do filme lubrificante. Para determinar a variação da viscosidade, que depende da pressão (p) e da variação de temperatura (ΔT) no filme lubrificante, utilizaremos a expressão obtida por Crook [Snidle, Parsons, Dowson, 1973]:

$$\eta = \eta_0 e^{(\alpha \cdot p - b \cdot \Delta T)} \quad (3.13)$$

resultando a expressão (3.14), do qual se obtém a espessura do filme na região de entrada para esta segunda condição:

$$h_1 = \frac{3 \cdot U \cdot \eta_0 \cdot \alpha \cdot e^{-b \cdot \Delta T}}{\left(1 - e^{-\alpha \cdot \sigma_0} \right) \cdot \text{tg} \beta} \quad (3.14)$$

3.3 Análise da região II

Nesta região ocorre a deformação plástica do material, isto é, a redução da secção transversal do fio. Vários são os fatores que influenciam o estabelecimento de um ou mais regimes de lubrificação, como por exemplo:

- a natureza do metal a ser trefilado;
- as suas propriedades mecânicas, principalmente a tensão limite de escoamento;
- a natureza química do lubrificante;
- as propriedades físicas e reológicas do lubrificante, principalmente a sua viscosidade.

Para determinar os valores da pressão e da espessura do filme nessa região, assume-se as seguintes hipóteses:

- o material a deformar é isotrópico, incompressível, contínuo, uniforme e encruável. Eder [1981] apresenta a seguinte expressão para a tensão de escoamento (3.15), em função da deformação:

$$\sigma_y = A \cdot \varepsilon^k \quad (3.15)$$

- para determinar a variação da viscosidade, que depende da pressão (p) e da variação de temperatura (ΔT), utiliza-se a expressão 3.13.

3.3.1 Análise da temperatura do fio

O valor da temperatura do fio (θ_b) é obtido considerando-se a quantidade de calor gerada pela deformação, descontada a transferência de calor entre a superfície do arame e o filme lubrificante. Segundo a expressão abaixo [Snidle, Parsons, Dowson, 1973]:

$$\theta_b = \theta_i + \frac{\sigma_y}{\rho \cdot c} \cdot l_n \left[\left(\frac{D_1}{D} \right)^2 \right] + \frac{1}{(k_b \cdot \rho \cdot c \cdot \pi)^{0,5}} \cdot \int_0^T k_l \left(\frac{d\theta}{dz} \right)_{z=0} \cdot \frac{dt}{(T-t)^{0,5}} \quad (3.16)$$

O valor de T da expressão acima pode ser calculado considerando-se que

$$U = \frac{dx}{dt} \text{ ou } dt = \frac{dx}{U} \quad (3.17)$$

como x é paralelo à direção de escoamento do filme lubrificante, tem-se:

$$\begin{array}{ll} x = 0 & \text{quando } D = D_2 \\ x = x_{\max} & \text{quando } D = D_1 \end{array}$$

O diâmetro do fio num dado instante D na região de deformação é obtido de forma geométrica

$$\operatorname{sen} \beta = \frac{\frac{D - D_2}{2}}{x}$$

$$2x \operatorname{sen} \beta = D - D_2$$

$$D = 2x \operatorname{sen} \beta + D_2 \quad (3.18)$$

Seguindo o mesmo critério, obtém-se a velocidade U relativa ao diâmetro D na região II

$$U = \left(\frac{D_1}{D} \right)^2 \cdot U_1 \cdot \cos \beta \quad (3.19)$$

logo

$$U = \left(\frac{D_1}{2x \operatorname{sen} \beta + D_2} \right)^2 U_1 \cos \beta \quad (3.20)$$

substituindo

$$dt = \frac{dx}{\left(\frac{D_1}{2x \operatorname{sen} \beta + D_2} \right)^2 U_1 \cos \beta}$$

integrando

$$\int_0^{T(x)} dt = \int_{x_1}^x \frac{1}{U_1 \cos \beta} \left(\frac{2x \operatorname{sen} \beta + D_2}{D_1} \right)^2 dx$$

$$T(x) = \frac{1}{U_1 \cos \beta D_1^2} \int_{x_1}^x \left[4x^2 \operatorname{sen}^2 \beta + 4x \operatorname{sen} \beta \cdot D_2 + D_2^2 \right] dx$$

$$T(x) = \frac{1}{U_1 \cos \beta D_1^2} \left[4 \operatorname{sen}^2 \beta \frac{x^3}{3} \Big|_{x_1}^x + 4 \operatorname{sen} \beta D_2 \frac{x^2}{2} \Big|_{x_1}^x + D_2^2 x \Big|_{x_1}^x \right]$$

$$T_{(x)} = -\frac{\sec \beta}{U_1 D_1^2} \cdot \left\{ \frac{4}{3} \cdot \sin^2 \beta (x^3 - x_1^3) + 2 \cdot D_2 \cdot \sin \beta (x^2 - x_1^2) + D_2^2 (x - x_1) \right\} \quad (3.21)$$

A expressão (3.21), integrada agora tendo T conhecido, fica:

$$\theta_b = \theta_i + \frac{\sigma_y}{\rho \cdot c} \cdot l_n \left[\left(\frac{D_1}{D} \right)^2 \right] + \frac{1}{(k_b \cdot \rho \cdot c \cdot \pi)^{0.5}} \frac{1}{h} \left(\frac{\eta \cdot U^2}{2} - k_l (\theta_b - \theta_f) \right) 2\sqrt{T} \quad (3.22)$$

3.3.2 Determinação da pressão no filme na região II

A determinação da pressão no filme na região II será baseada no modelo desenvolvido por von Karman [1925] para cálculo das tensões (figura 3.2) envolvidas no processo de conformação plástica. O modelo baseia-se no método da divisão e equilíbrio de elementos, corrigido para considerar a energia de trabalho redundante e adaptado para o caso da trefilação de fios.

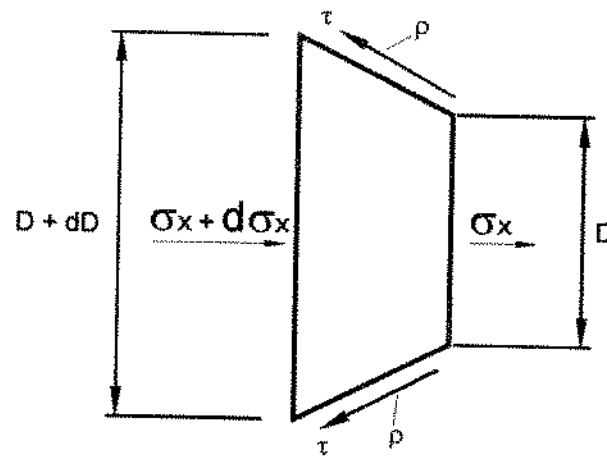


Figura 3.2 - Representação das tensões atuantes num elemento infinitesimal na região de deformação

$$\frac{\pi \cdot D^2}{4} \sigma_x - \frac{\pi \cdot (D + dD)^2}{4} (\sigma_x + d\sigma_x) - \tau \cdot \cos \beta \frac{dx}{\cos \beta} \pi \cdot D - p \cdot \pi \cdot D \cdot \sin \beta \frac{dx}{\cos \beta} = 0$$

dividindo por π e por D fica

$$\frac{D \cdot \sigma_x}{4} - \frac{D^2 + 2D \cdot dD + dD^2}{4} \frac{1}{D} (\sigma_x + d\sigma_x) - \tau \cdot dx - p \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot dx = 0$$

$$\frac{dp}{dD} = -\frac{4p}{D} - \frac{d\sigma_y}{dD} - \frac{2}{D} \left(\sigma_y + \frac{\tau}{\operatorname{tg} \beta} \right) \quad (3.23)$$

Na expressão (3.23) acima verifica-se a introdução da tensão de cisalhamento que atua no filme dada por

$$\tau = \frac{\eta \cdot U}{h} \quad (3.24)$$

onde a viscosidade do fluido depende da pressão (p) e da variação de temperatura no filme (expressão 3.13), e a velocidade U obtida pela hipótese de fluxo constante, como visto anteriormente, onde

$$U = \left(\frac{D_1}{D} \right)^2 \cdot U_1 \cdot \cos \beta$$

Introduz-se também, na expressão (3.23), a variação ou aumento da tensão de escoamento devido à deformação plástica dada por

$$\sigma_y = A \cdot \varepsilon^k$$

onde as deformações provocadas nas diversas regiões são [Pugh, 1964]:

$$\varepsilon_0 = 0$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{\beta}{\sin^2 \beta} - \frac{1}{\operatorname{tg} \beta} \right)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + 2 \cdot \ln \frac{D_1}{D}$$

Temos, então, a expressão (3.23) na sua forma definitiva

$$\tau = \frac{\eta_o \cdot e^{(\alpha \cdot p - b \cdot \Delta T)}}{h} \left(\frac{D_1}{D} \right)^2 U_1 \cdot \cos \beta$$

$$\sigma_y = A \cdot \left(\varepsilon_1 + 2 \cdot \ln \frac{D_1}{D} \right)^k$$

$$\frac{d\sigma_y}{dD} = A \cdot K \left(\varepsilon_1 + 2 \cdot \ln \frac{D_1}{D} \right)^{k-1} \left(2 \frac{D}{D_1} \right) \frac{d}{dD} \left(\frac{D_1}{D} \right)$$

$$\frac{d\sigma_y}{dD} = -\frac{2 A \cdot K}{D} \left(\varepsilon_1 + 2 \cdot \ln \frac{D_1}{D} \right)^{k-1}$$

a forma de uma equação diferencial ordinária de primeira ordem não linear, como apresentada abaixo

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dD} = & -\frac{4p}{D} + \frac{2 \cdot A \cdot K}{D} \left(\varepsilon_1 + 2 \cdot \ln \frac{D_1}{D} \right)^{k-1} - \\ & -\frac{2}{D} \left[A \left(\varepsilon_1 + 2 \cdot \ln \frac{D_1}{D} \right)^k + \frac{\eta_o \cdot e^{(\alpha \cdot p - b \cdot \Delta T)}}{h} \left(\frac{D_1}{D} \right)^2 U_1 \cdot \cos \beta \right] \end{aligned} \quad (3.25)$$

A solução será através do método de Runge-Kuttar [Bronson, 1977] de terceira ordem.

3.4 Expressões finais utilizadas nas rotinas computacionais

- Análise na região de entrada

viscosidade

- sem variação de temperatura

$$\eta = \eta_o \cdot e^{\alpha \cdot p}$$

- com variação de temperatura

$$\eta = \eta_o e^{(\alpha \cdot p - b \cdot \Delta T)}$$

espessura do filme na região de entrada

- sem variação de temperatura

$$h_1 = \frac{3.U.\eta_0.\alpha}{(1 - e^{-\alpha.\sigma_0}).\operatorname{tg}\beta}$$

- com variação de temperatura

$$h_1 = \frac{3.U.\eta_0.\alpha.e^{-b.\Delta T}}{(1 - e^{-\alpha.\sigma_0}).\operatorname{tg}\beta}$$

- Análise da região II

tensão de escoamento em função da deformação

$$\sigma_y = A.\varepsilon^k$$

viscosidade

$$\eta = \eta_0 e^{(\alpha.p - b.\Delta T)}$$

Análise da condução térmica

- velocidade

$$U = \left(\frac{D_1}{2.x.\operatorname{sen}\beta + D_2} \right)^2 . U_1 . \cos\beta$$

- tempo de processo

$$T = -\frac{\sec\beta}{U_1.D_1^2} \cdot \left\{ \frac{4}{3} . \operatorname{sen}^2\beta (x^3 - x_1^3) + 2.D_2.\operatorname{sen}\beta (x^2 - x_1^2) + D_2^2(x - x_1) \right\}$$

- temperatura do fio

$$\theta_b = \theta_i + \frac{\sigma_y}{\rho.c} \cdot I_n \left[\left(\frac{D_1}{D} \right)^2 \right] + \frac{1}{(k_b \cdot \rho.c \cdot \pi)^{0.5}} \frac{1}{h} \left(\frac{\eta \cdot U^2}{2} - k_l (\theta_b - \theta_f) \right) 2\sqrt{T}$$

Determinação da pressão do filme

$$\frac{dp}{dD} = -\frac{4p}{D} + \frac{2 \cdot A \cdot K}{D} \left(\varepsilon_1 + 2 \cdot \ln \frac{D_1}{D} \right)^{k-1} -$$

$$-\frac{2}{D} \left[A \left(\varepsilon_1 + 2 \cdot \ln \frac{D_1}{D} \right)^k + \frac{\eta_o \cdot e^{(a \cdot p - b \cdot \Delta T)}}{h} \left(\frac{D_1}{D} \right)^2 U_1 \cdot \cos \beta \right]$$

Capítulo 4

Procedimento Experimental

Neste capítulo apresenta-se o desenvolvimento experimental, que tem por objetivo comprovar as afirmações dos diversos pesquisadores aqui referenciados e fornecer dados necessários para introdução no modelo matemático, possibilitando a sua avaliação e aplicabilidade.

A seguir faz-se a descrição das diversas etapas do procedimento experimental.

4.1 Tribo-elementos

O material a ser retrefilado é um fio de aço inoxidável austenítico com 0,026 % de carbono denominado ABNT 304 L. O material encontra-se no estado recozido e não decapado ou no estado encruado com composição química, como mostrado na tabela 4.1. Ambos totalmente isentos de qualquer tratamento superficial. Corpos-de-prova foram ensaiados a tração, antes e após a trefilação, para a determinação da variação das propriedades mecânicas ocasionada pela redução de 19% da secção transversal do fio. O equipamento utilizado é uma máquina de tração MTS 810.23M da MTS, pertencente ao Departamento de Engenharia de Materiais-DEMAR-FAENQUIL.

Foi também verificada a variação da rugosidade superficial do material de partida e dos produtos, em termos de Ra (rugosidade média aritmética), com o objetivo de observar a variação da qualidade superficial. Foram realizadas três medidas ao longo de cada corpo de prova de 70 mm de comprimento, utilizando uma pick-up RTH 6-50

série 43157 com raio de ponta de 6 μm e resolução vertical de 50 μm . O equipamento empregado foi um rugosímetro modelo Perthometer S8P pertencente ao Centro de Tecnologia da Unicamp.

Tabela 4.1 - Composição Química do Aço Inoxidável ABNT 304 L [%]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.026	0.510	1.860	0.038	0.005	18.350	9.960

Outro aspecto importante, verificado a cada experimento, foi a qualidade do material trefilado, em termos de aspecto superficial. Com essa finalidade foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV) do DEMA-UNICAMP. A qualidade dimensional dos produtos foi verificada através da medição de seus diâmetros.

Como lubrificante, foram utilizados dois óleos: MJF 5 e HONILO 171. O lubrificante da classe MJF é um lubrificante à base de óleos vegetais e minerais combinados com cloridrinas de alto peso molecular, contendo aditivos para pressões elevadas. O lubrificante da classe Honilo é um lubrificante à base de óleos minerais, ácidos graxos animais e aditivação de extrema pressão a base de enxofre. A viscosidade desses óleos foi avaliada no Departamento de Petróleo da Unicamp através de um viscosímetro rotativo (Haake - CV 20N) de placas ($\varnothing$ 45 mm) paralelas, e os resultados digitalizados com o uso do Rheocontroller RC-20.

As fieiras utilizadas nos ensaios são de diamante e apresentam geometria interna (figura 2.3) composta por 2β de 10°, 14° e 18°, 2θ igual a 60° e Hc com 20, 35 e 50 % de Df. As fieiras tinham em comum as dimensões: Do = 0,5 mm; Df = 0,45 mm. A escolha da geometria acima foi baseada na faixa de dimensões de uso comum na indústria brasileira de trefilação de aço inoxidável. O controle da geometria das fieiras foi feito através de um aparelho perfilográfico Taylor-Hobson da empresa Quality Die.

4.2 Ensaios de trefilação

Como ferramenta de pesquisa experimental foi utilizada uma trefiladora monobloco de passe simples (figura 4.2) e velocidade variável montada e instalada no

Departamento de Engenharia de Materiais-DEMAR-FAENQUIL. Optou-se por este tipo de equipamento pela possibilidade de se ter uma máquina compacta, barata e fácil de acoplar os diversos instrumentos de aquisição necessários para este trabalho.

A sequência de trefilação tem início na fixação de um carretel plástico ABNT 125, contendo aproximadamente 3 kg de aço inoxidável, em um desenrolador horizontal que trabalha sobre dois mancais de rolamento. Na sequência, o fio entra na caixa de fieira onde encontra o óleo lubrificante e a fieira de trefilação. A fieira totalmente imersa em óleo é fixa em um suporte, que, por sua vez, está parafusada na célula de carga. A célula de carga, alinhada com o raio de entrada do cabrestante, é sustentada por um suporte de aço rígido. Finalmente, na saída da caixa de fieira tem-se o cabrestante, que traciona o fio forçando a sua passagem pela fieira. O cabrestante é movido por um motor de corrente contínua de 20 CV e 2000 rpm de velocidade angular máxima.

A velocidade de trefilação variou de 1 a 22 m/s, sendo controlada por um tacômetro digital. A variação da temperatura da fieira e do óleo lubrificante é monitorada através de dois termopares tipo K (modelos TPK01 e TPK03), fornecido com certificado de calibração. Para a medição da força de trefilação utilizou-se uma célula de carga com capacidade nominal de 50 kgf e sensibilidade 2,0 mV/V. Todos os sensores mencionados estão interligados ao condicionador de sinais MCS 1000-8 que através de cabos, envia os sinais para a placa do conversor CAD 12/36 (A/D e D/A) instalada dentro de um microcomputador 486 DX-2-66. A coleta de dados dos ensaios é realizada por um programa de sinais denominado AqDados. A calibração do dispositivo de medição foi realizada utilizando-se pesos com valores conhecidos.

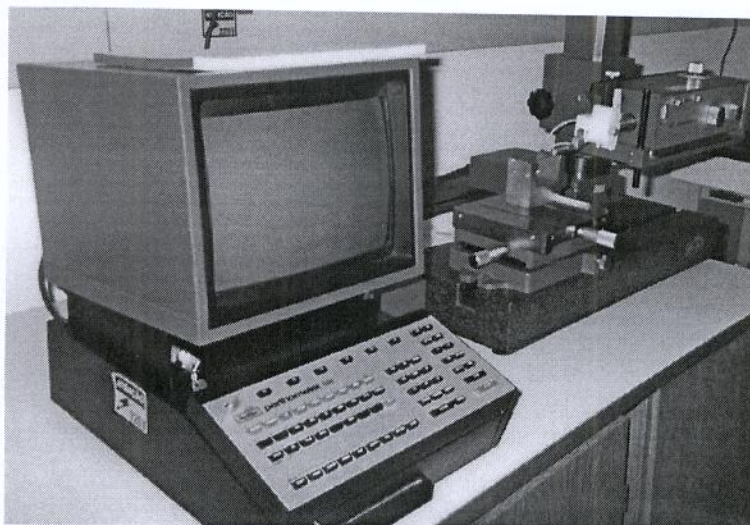


Figura 4.1 - Rugosímetro

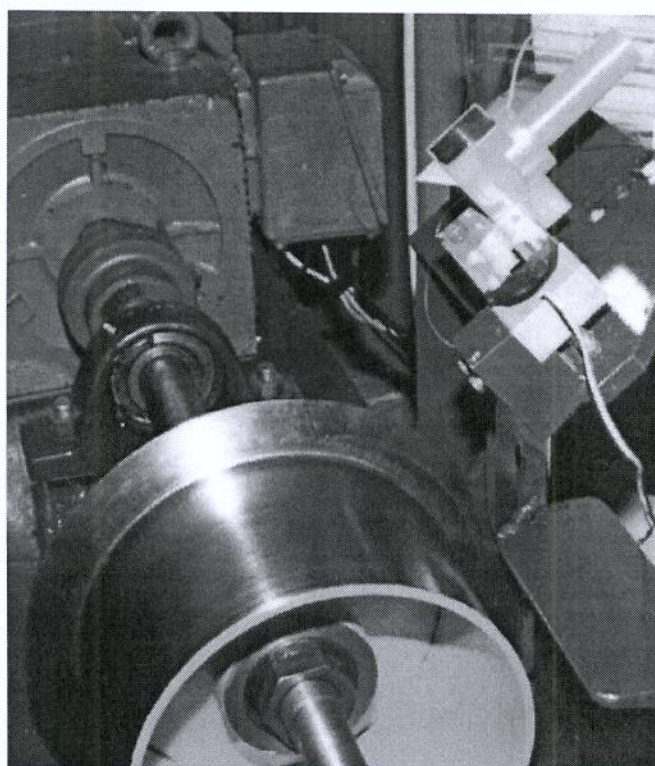


Figura 4.2 - Trefila monobloco

Os ensaios de trefilação foram divididos em 2 grupos de ensaios, como descritos abaixo:

- a - o primeiro conjunto de ensaios tem como objetivo definir a influência da geometria da fieira no carreamento de lubrificante com duas diferentes viscosidades a velocidades de 1 a 23 m/s (tabelas 4.2 e 4.3);
- b - o segundo conjunto de ensaios tem a finalidade de verificar a influência da temperatura em duas condições diferentes de velocidade.

Optou-se por iniciar a aquisição de dados de força e temperatura após decorrido um minuto do início do ensaio. Este procedimento foi seguido em todos os ensaios de trefilação.

Tabela 4.2 - Parâmetros de processamento utilizados nos ensaios de trefilação.

Diâmetro inicial (D_1):	0,50 mm
Diâmetro do produto (D_2):	0,45 mm
Redução de seção:	19 %
Ângulo 2β :	10, 14 e 18°
Hc:	Entre 20 a 50 % de Df
Lubrificantes:	Honilo 171 MJF 5
Velocidade:	1 a 23 m/s

Tabela 4.3 - Programa de ensaios experimentais

Material:	recozido	Encruado
Óleo:	Honilo 171	Honilo 171
	MJF 5	MJF 5
2β :	10, 14 e 18°	10, 14 e 18°
Hc:	20, 35 e 50 % de Df	35 e 50 % de Df
Velocidade:	1 a 23 m/s	1 a 23 m/s

As características dimensionais das fieiras empregadas estão mostradas na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Características dimensionais

Fieira	2β (°)	Hc/Df (%)
1	10	20
2	10	35
3	10	50
4	14	20
5	14	35
6	14	50
7	18	20
8	18	35
9	18	50

Capítulo 5

Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados, primeiramente, os resultados obtidos do desenvolvimento experimental descrito no capítulo 4. Na sequência, os dados obtidos na melhor condição de trefilação serão introduzidos no modelo matemático desenvolvido no capítulo 3. Da associação dos resultados experimentais e do modelo poder-se-á definir a aplicabilidade do modelo proposto e determinar as melhores condições de processamento e lubrificação.

5.1 Análise da rugosidade superficial e da espessura do filme lubrificante

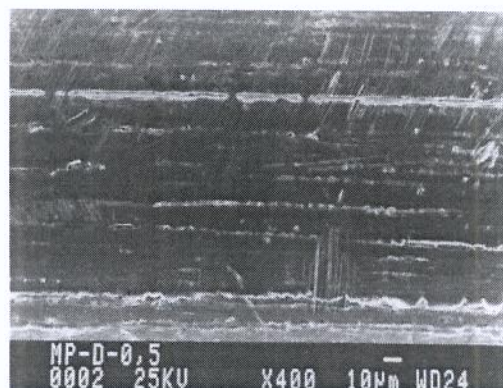
Como visto no capítulo 2, a condição superficial inicial do fio a ser retrefilado tem influência direta no regime de lubrificação alcançado na zona de deformação (2β). A figura 5.1 mostra o estado superficial do fio $\varnothing 0,50$ mm recozido e encruado utilizado nos experimentos. O material apresenta uma textura superficial com direção predominante definida pelas reduções anteriores, compostas por riscos e marcas diversas.

As figuras 5.2 e 5.3 apresentam graficamente a variação de rugosidade superficial dos corpos-de-prova do material de partida e dos produtos.

A tabela 5.1 apresenta os valores de rugosidade superficial do material de partida e dos produtos retrefilados medidos em R_a .



(a) recozido



(b) encruado

Figura 5.1 - Qualidade superficial do fio $\varnothing$ 0,50 mm (aumento 400 x)

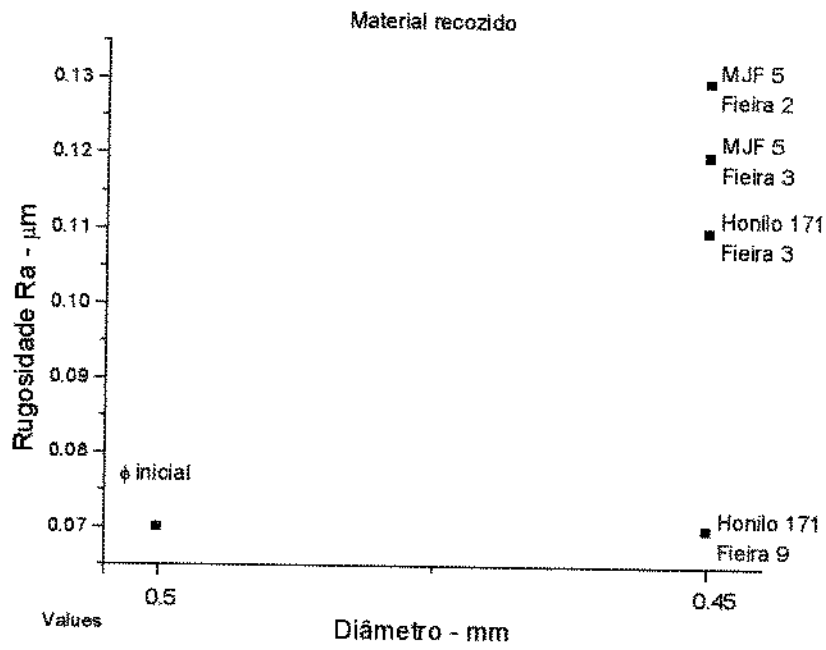


Figura 5.2 - Variação da rugosidade superficial (Ra) do material de partida e dos produtos retrefilados

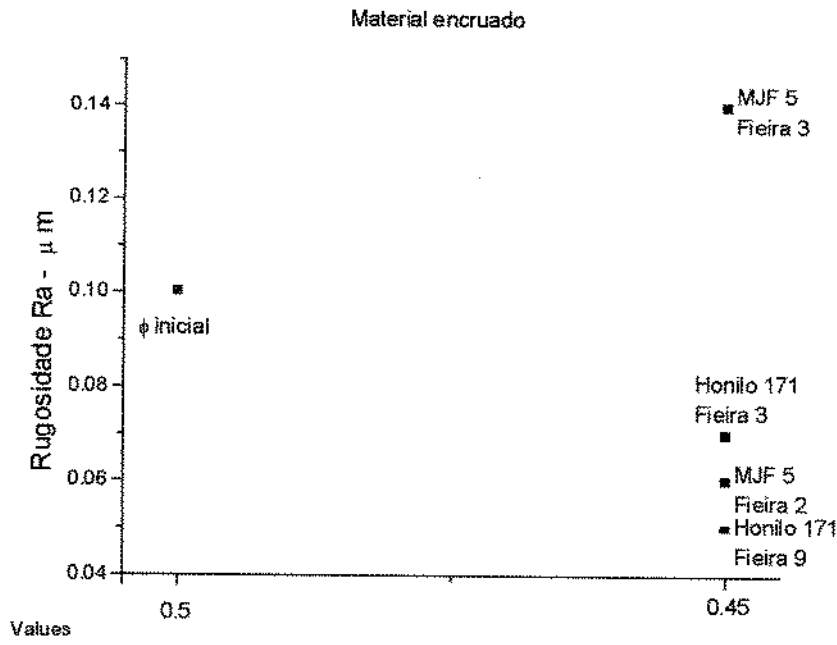


Figura 5.3 - Variação de rugosidade superficial (Ra) do material de partida e dos produtos retrefilados

Para a determinação do regime de lubrificação utilizou-se os critérios apresentados por Wilson [1979] (item 2.3.3). Devido à dificuldade de obtenção do valor real da rugosidade da fieira por causa das suas dimensões internas, assumiu-se o valor de $9,0 \times 10^{-8}$ m, igual à média dos valores obtidos em todas as medições efetuadas nos produtos.

Tabela 5.1 – Variação da rugosidade superficial dos materiais de partida e dos produtos retrefilados

Diâmetro (mm)	Fieira nº	Rugosidade Ra (m)		Óleo
		Recozido	Encruado	
0,50	material de partida	$7,0 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-7}$	----
0,45	7	$9,0 \times 10^{-8}$	-----	Honilo 171
	8	$8,0 \times 10^{-8}$	-----	
	9	$7,0 \times 10^{-8}$	$5,0 \times 10^{-8}$	
	5	$9,0 \times 10^{-8}$	-----	
	6	$6,0 \times 10^{-8}$	-----	
	2	$9,0 \times 10^{-8}$	-----	
	3	$1,1 \times 10^{-7}$	$7,0 \times 10^{-8}$	MJF 5
	7	$1,0 \times 10^{-7}$	-----	
	8	$1,0 \times 10^{-7}$	-----	
	9	$9,0 \times 10^{-8}$	-----	
	4	$6,0 \times 10^{-8}$	-----	
	5	$1,8 \times 10^{-7}$	-----	
	6	$1,2 \times 10^{-7}$	-----	
	2	$1,3 \times 10^{-7}$	$6,0 \times 10^{-8}$	
	3	$1,2 \times 10^{-7}$	$1,4 \times 10^{-7}$	

Somando-se o valor da rugosidade da fieira ($9,0 \times 10^{-8}$ m) aos valores da tabela 5.1 e multiplicando por três, tem-se os valores mínimos de espessura do filme lubrificante para se atingir uma condição de regime de filme fino (tabela 5.2). Seguindo-se o mesmo critério mas, multiplicando por dez, tem-se os valores mínimos de espessura para se atingir uma condição de regime de filme espesso (tabela 5.3).

Tabela 5.2 – Espessura mínima (h) – regime de filme fino

Fieira nº	Valores mínimos de espessura (m)		Óleo
	Recozido	Encruado	
7	$5,4 \times 10^{-7}$	-----	Honilo 171
8	$5,1 \times 10^{-7}$	-----	
9	$4,8 \times 10^{-7}$	$4,2 \times 10^{-7}$	
5	$5,4 \times 10^{-7}$	-----	
6	$4,5 \times 10^{-7}$	-----	
2	$5,4 \times 10^{-7}$	-----	
3	$6,0 \times 10^{-7}$	$4,8 \times 10^{-7}$	

Fieira nº	Valores mínimos de espessura (m)		Óleo
	Recozido	Encruado	
7	$5,7 \times 10^{-7}$	-----	MJF 5
8	$5,7 \times 10^{-7}$	-----	
9	$5,4 \times 10^{-7}$	-----	
4	$4,5 \times 10^{-7}$	-----	
5	$8,1 \times 10^{-7}$	-----	
6	$6,3 \times 10^{-7}$	-----	
2	$6,6 \times 10^{-7}$	$4,5 \times 10^{-7}$	
3	$6,3 \times 10^{-7}$	$6,9 \times 10^{-7}$	

Tabela 5.3 – Espessura mínima (h) – regime de filme espesso

Fieira nº	Valores mínimos de espessura (m)		Óleo
	Recozido	Encruado	
7	$1,9 \times 10^{-6}$	-----	MJF 5
8	$1,9 \times 10^{-6}$	-----	
9	$1,8 \times 10^{-6}$	-----	
4	$1,5 \times 10^{-6}$	-----	
5	$2,7 \times 10^{-6}$	-----	
6	$2,1 \times 10^{-6}$	-----	
2	$2,2 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$	
3	$2,1 \times 10^{-6}$	$2,3 \times 10^{-6}$	

A tabela 5.4 mostra a variação do limite de resistência e do alongamento antes e após a retrefila, obtido nos ensaios de tração.

Tabela 5.4 – Limite de resistência do aço inoxidável ABNT 304 L

Ø (mm)	Recozido		Encruado	
	σ_r (MPa)	δ (%)	σ_r (MPa)	δ (%)
0,50	678	49,1	1554	5,3
0,45	908	9,5	1612	4,8

A viscosidade dinâmica dos óleos Honilo 171 e MJF 5 foi avaliada e os resultados são apresentados na tabela 5.5. O apêndice I apresenta os dados complementares referentes a cada um dos óleos utilizados.

Tabela 5.5 – Viscosidade dinâmica dos lubrificantes [Pa.s]

Temperatura (° C)	Viscosidade	
	Honilo 171	MJF 5
25	0,01073	1,001
50	0,009522	0,255
75	0,00336	0,1036
90	fora da faixa de medição do instrumento	0,06453

5.2 Análise dos esforços e das temperaturas nos ensaios de trefilação

A seguir, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de trefilação, como descritos no capítulo 4.

Para todas condições ensaiadas (figuras 5.4 a 5.9) comprovou-se a queda de esforço de trefilação com o aumento da velocidade que pode ser explicada pela maior eficiência do lubrificante, como representado pela curva de Stribeck [Wright, 1997] como mostrado na figura 2.7

Os experimentos efetuados com óleo de baixa viscosidade (Honilo 171) apresentaram os seguintes resultados (figuras 5.4 a 5.6):

- 1 - A primeira análise será feita sobre cada um dos três conjuntos de fieira (18, 14 e 10°):
 - a - No conjunto de fieira com 2β igual a 18° (figura 5.4) o melhor resultado é obtido pela ferramenta com Hc longo (50% de Df). O comprimento longo de Hc trabalha como um obstáculo para a saída de lubrificante, favorecendo a presença de um filme contínuo e reduzindo a força necessária.
 - b - No conjunto com 2β de 14° (figura 5.5) a fieira 4 apresentou o melhor resultado em toda a faixa de velocidade. O elemento preponderante na geometria desta fieira é o fato de ter um pequeno ângulo de trabalho [Rowe, 1965] que permite o carregamento de uma grande quantidade de lubrificante para a interface metal-ferramenta. Neste caso, um comprimento médio ou longo de Hc torna-se prejudicial [Frascio, 1970], pois ocasiona um acúmulo excessivo de lubrificante na interface. Logo, os maiores valores de força apresentados pelas fieiras 5 e 6 correspondem a uma maior pressão acarretada pelo excesso de lubrificante.
 - c - As geometrias utilizadas nos experimentos com 2β igual a 10° (figura 5.6) apresentaram resultados muito próximos. A fieira 2 apresenta melhores resultados nas velocidades 2,5 e 5 m/s, e a fieira 3 é a que melhor resultado alcançou a 20 m/s. Isto é devido à alta temperatura alcançada a 20 m/s. Neste ponto, a viscosidade é baixa e um duto longo (Hc) possibilita a retenção de óleo na interface metal-ferramenta.

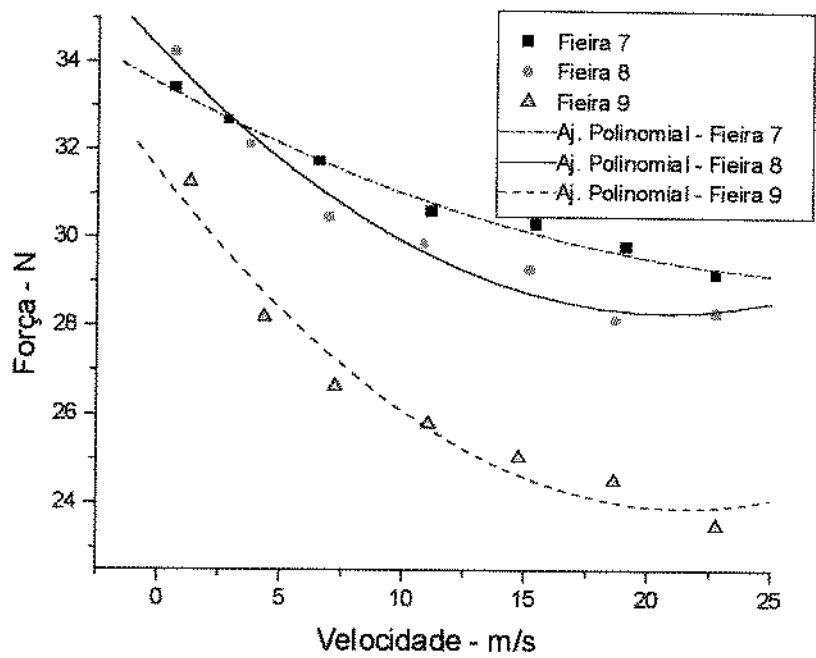


Figura 5.4 – Força x Velocidade com óleo Honilo 171 e material recozido

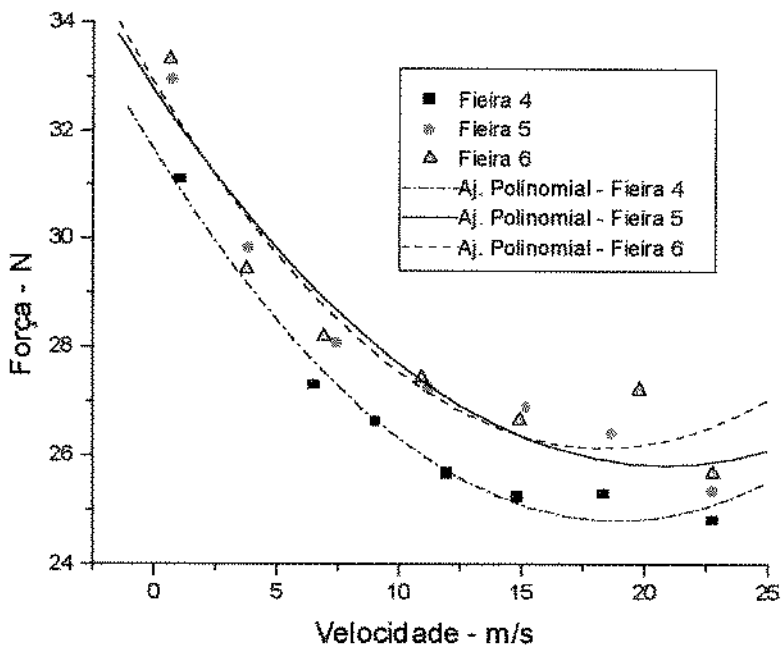


Figura 5.5 - Força x Velocidade com óleo Honilo 171 e material recozido

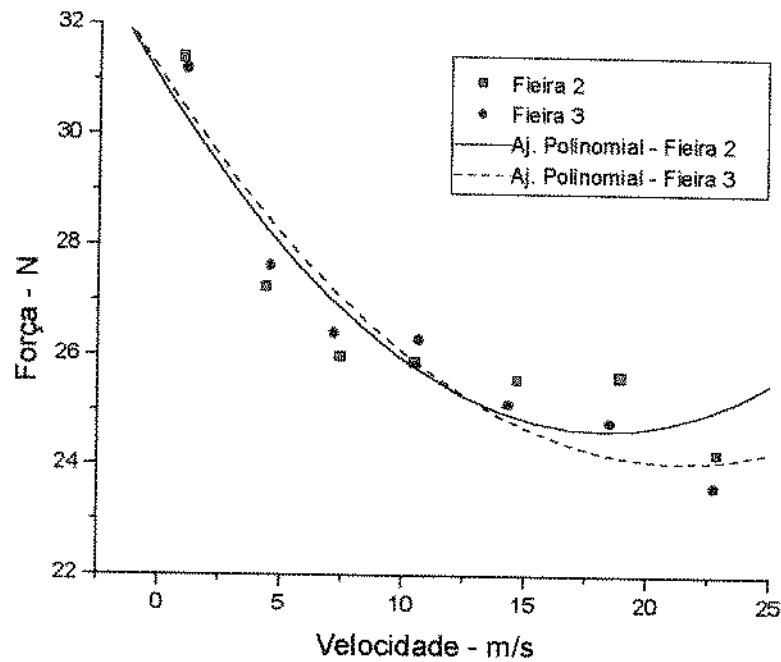


Figura 5.6 - Força x Velocidade com óleo Honilo 171 e material recozido

- 2 - O segundo tipo de análise é feito em três velocidades distintas: 2,5, 10 e 20 m/s (tabela 5.6)
 - a - A fieira 2 apresenta melhores resultados nas velocidades 2,5 (29,3 N) e 10 m/s (25,9 N). Esta fieira tem ângulo 2β pequeno (10°) e H_c médio (35% de D_f).
 - b - A 20 m/s a fieira 9 solicita o menor esforço de trefilação. Esta fieira tem ângulo 2β grande (18°) e H_c grande (50% de D_f).
- 3 - Para cada geometria de fieira utilizada nos experimentos foi encontrado um ponto ótimo de trefilação (tabela 5.7). Os pontos ótimos indicam a maior velocidade com menor solicitação de esforço de trefilação para cada uma das fieiras utilizadas.
- 4 - Na partida do processo, o principal elemento é o ângulo 2β . A medida que 2β diminui, o esforço de trefilação solicitado também diminui. Isto é explicado pelo efeito de cunha [Cheng, 1992]

ocasionado pelo movimento relativo (figura 2.8) entre o fio (móvel) e a fieira (estacionária).

Tabela 5.6 – Comportamento da geometria da fieira

Fieira	Força (N)		
	2,5 m/s	10 m/s	20 m/s
2	29,3	25,9	24,6
3	29,5	26,0	24,1
4	29,9	26,3	24,8
5	31,1	27,6	25,8
6	31,1	27,5	26,2
7	32,7	31,0	29,5
8	32,9	29,9	28,3
9	29,8	26,1	23,9

Tabela 5.7 – Ponto ótimo – Honilo 171

Fieira	Velocidade (m/s)	Força (N)
7	24,9	29,1
8	20,8	28,3
9	22,2	23,9
4	19,4	24,8
5	20,8	25,8
6	18,0	26,1
2	18,1	20,8
3	24,6	24,0

Os experimentos efetuados com óleo de alta viscosidade (MJF 5) apresentaram os seguintes resultados (figura 5.7 a 5.9):

- 1 - A primeira análise será feita sobre cada um dos três conjuntos de fieira (18, 14 e 10°):
 - a - No conjunto de fieira com 2β igual a 18° (figura 5.7) a fieira 9 (Hc longo) apresentou o melhor comportamento em todas as faixas de velocidade, repetindo o comportamento observado para o lubrificante Honilo 171.

- b - No conjunto com 2β de 14° (figura 5.8) a fieira 6 apresentou o pior resultado na faixa de velocidade de 1 a 7 m/s. A fieira 5 tem um melhor comportamento de 1 a 2 m/s e, a fieira 4 apresenta o melhor resultado na faixa de velocidade de 2 a 20 m/s. As fieiras 4 e 5 se alternam como as melhores em algumas faixas de velocidades devido à influência do comprimento de H_c associado à variação da viscosidade ocasionada pela temperatura gerada pelo processo.
- c - As geometrias utilizadas nos experimentos com 2β igual a 10° (figura 5.9) apresentaram resultados muito próximos. A fieira 2 apresentou melhores resultados nas velocidades até 18 m/s e, a fieira 3 é a que melhor resultado alcançou acima de 20 m/s. Isto deve-se a alta temperatura alcançada a 20 m/s. Neste ponto, a viscosidade é baixa e um duto (H_c) longo (fieira 3) possibilita a retenção de óleo na interface metal-ferramenta.

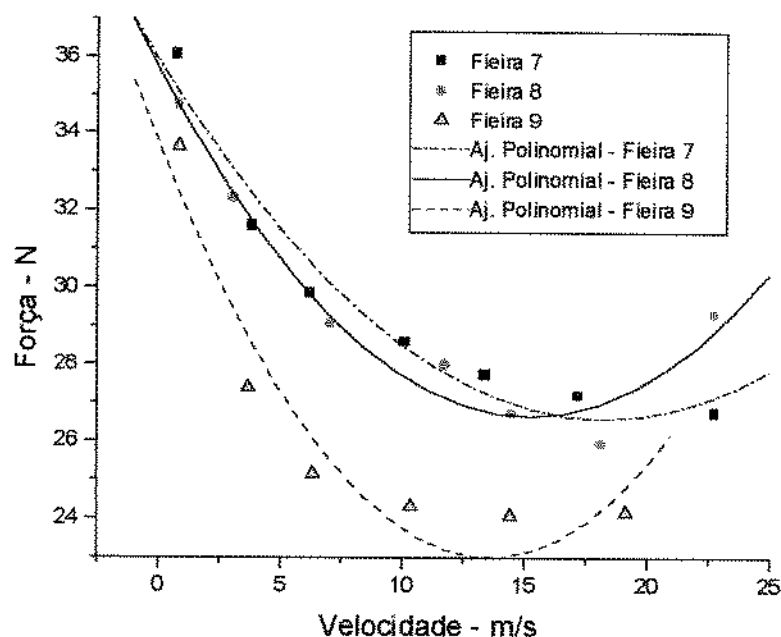


Figura 5.7 - Força x Velocidade com óleo MJF 5 e material recozido

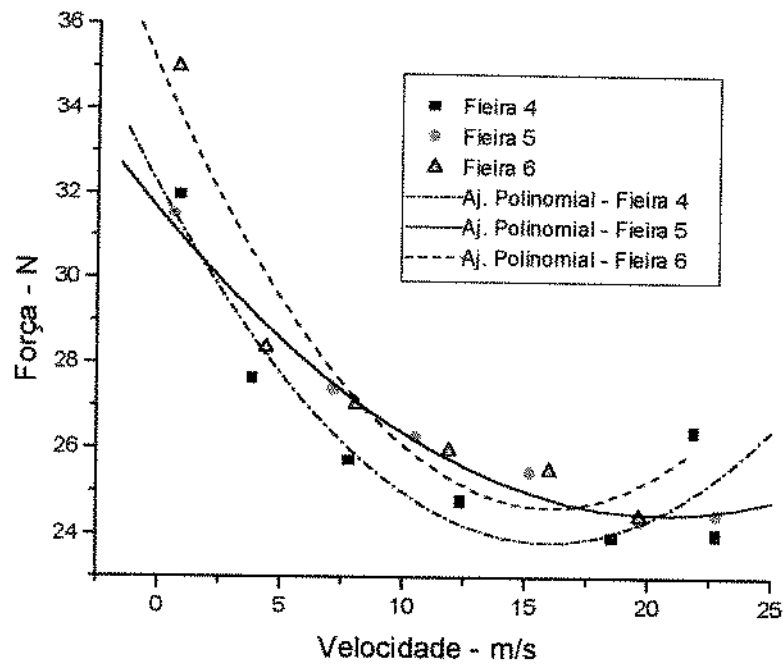


Figura 5.8 - Força x Velocidade com óleo MJF 5 e material recozido

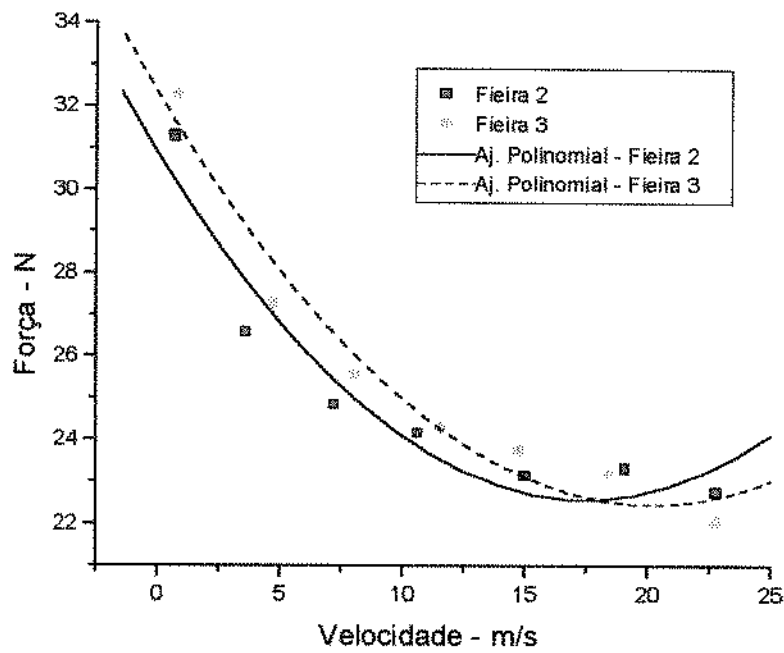


Figura 5.9 - Força x Velocidade com óleo MJF 5 e material recozido

- 2 - O segundo tipo de análise é feito em três velocidades distintas: 2,5, 10 e 20 m/s (tabela 5.8):
- a - A fieira 2 apresenta melhor resultado na velocidade 2,5 (28,6 N). Esta fieira tem ângulo 2β pequeno (10°) e Hc médio (35% de Df).
 - b - A 10 m/s a fieira 9 solicita o menor esforço de trefilação. Esta fieira tem ângulo 2β grande (18°) e Hc grande (50% de Df).
 - c - A 20 m/s a fieira 3 solicita o menor esforço de trefilação. Esta fieira tem ângulo 2β pequeno (10°) e Hc grande (50% de Df).
- 3 - Como nos ensaios com o óleo Honilo 171, para cada geometria de fieira utilizada nos experimentos foi encontrado um ponto ótimo de trefilação (tabela 5.9).

Tabela 5.8 – Comportamento da geometria da fieira

Fieira	Força (N)		
	2,5 m/s	10 m/s	20 m/s
2	28,6	24,1	22,7
3	30,0	24,9	22,4
4	29,6	24,9	24,3
5	29,9	26,4	24,5
6	31,9	26,1	25,2
7	33,5	28,5	26,6
8	33	27,7	27,5
9	30,1	23,7	25,3

Tabela 5.9 – Ponto ótimo – MJF 5

Fieira	Velocidade (m/s)	Força (N)
7	18,0	26,5
8	15,2	26,6
9	14,0	23
4	15,2	23,8
5	20,8	24,4
6	15,5	24,6
2	18,0	22,5
3	20,8	22,4

- 4 - O óleo de maior viscosidade (MJF 5) exige forças menores a velocidades mais baixas. Isto é devido à menor influência da temperatura sobre a viscosidade do lubrificante.

Comparativamente, ambos os óleos apresentam a mesma faixa de solicitação de esforço na partida do processo de trefilação. À medida que a velocidade aumenta, o óleo de maior viscosidade tem um melhor comportamento. Isto fica bem nítido quando da análise da figura 5.10, onde pode se visualizar o ajuste polinomial para as duas feiras com os melhores resultados para cada óleo.

Da análise da figura 5.10 verifica-se que as feiras 3 e 9 com óleo Honilo 171 solicitam maior força de trefilação em toda a gama de velocidade. As feiras 2 e 3 com óleo MJF 5 são as que menor força de trefilação apresentam, acima de 5 m/s, concluindo-se que a maior viscosidade favorece o estabelecimento de um regime hidrodinâmico e a conseqüente redução do atrito.

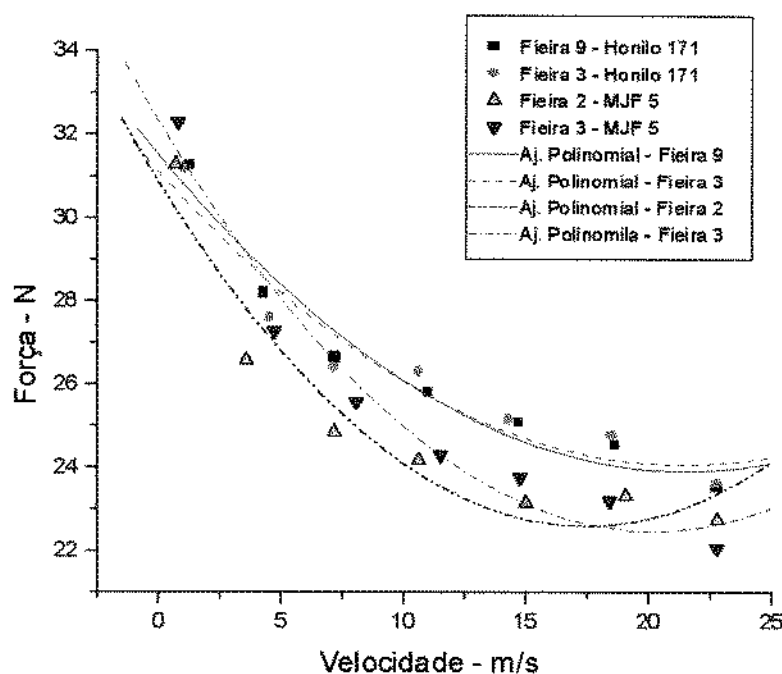


Figura 5.10 - Melhores resultados com material recozido

Com o objetivo de verificar a influência da tensão de escoamento do material no processo de trefilação, foram feitos ensaios com as fieiras 2, 3 e 9 e os óleos Honilo 171 e MJF 5. A figura 5.11 mostra os resultados:

- a - Na partida do processo, as melhores fieiras são a de número 2, com óleo MJF 5, e número 3, com Honilo 171. Mesmo resultado foi obtido na trefilação do arame recozido (figura 5.10).
- b - De 5 a 20 m/s, novamente se repetem os resultados obtidos na trefilação do arame recozido.
- c - A melhor fieira é a de número 2, que tem ângulo 2β pequeno e H_c médio.
- d - Diferentemente do que ocorre com a trefilação do material recozido, neste caso, a influência da geometria da fieira, assim como da viscosidade do lubrificante, é significativa.

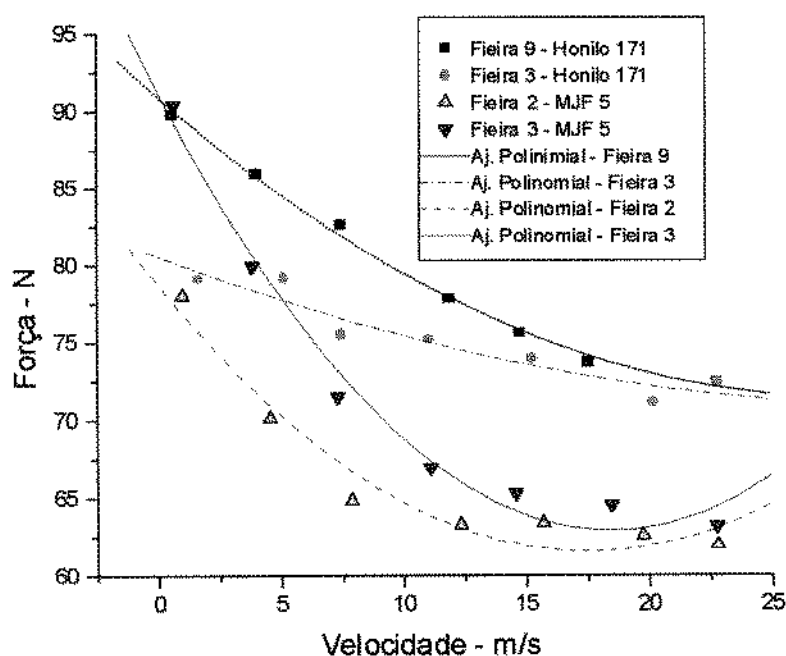


Figura 5.11 - Melhores resultados com material encruado

Os resultados experimentais apresentados até este ponto demonstram que uma condição ideal de processo pode ser obtida através:

- da utilização de lubrificantes de maior viscosidade;
- do uso de altas velocidades de processo;
- de ângulos 2β menores.

Verificou-se também que o aumento da tensão de escoamento do material influencia de forma negativa o processo de trefilação.

O apêndice II mostra o estado superficial dos produtos recozidos e encruados obtidos nos experimentos. Os mesmos apresentam uma textura superficial com direção predominante, composta por marcas diversas.

Definidas as melhores fieiras, na seqüência analisa-se com maior atenção a influência da temperatura no processo de trefilação e sua influência na viscosidade do óleo lubrificante.

A primeira bateria de ensaios relaciona a variação de temperatura com a velocidade e o tempo. Neste conjunto de ensaios (figuras 5.12 e 5.13), utilizou-se um tempo relativamente longo (30 minutos) e velocidade baixa e constante (0,67 m/s). Nessas condições, a velocidade relativa metal-ferramenta propicia um pequeno carregamento de óleo lubrificante para a interface e o número de asperezas que penetram o filme aumenta, o que ocasiona maior atrito. A taxa de deformação constante imposta ao material durante o processo tende a um regime térmico estável, ficando as variações de temperatura dependentes somente do atrito.

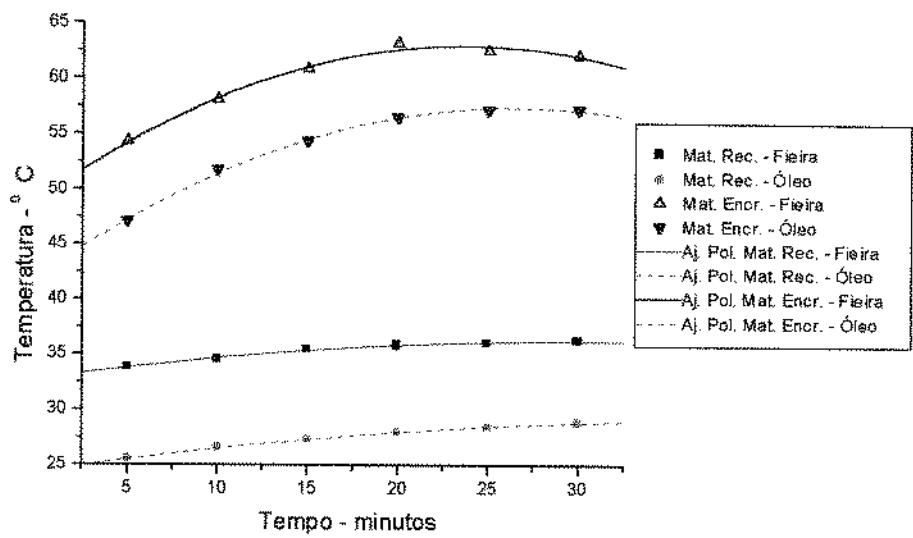


Figura 5.12 – Variação da temperatura
óleo MJF 5 – fieira 1

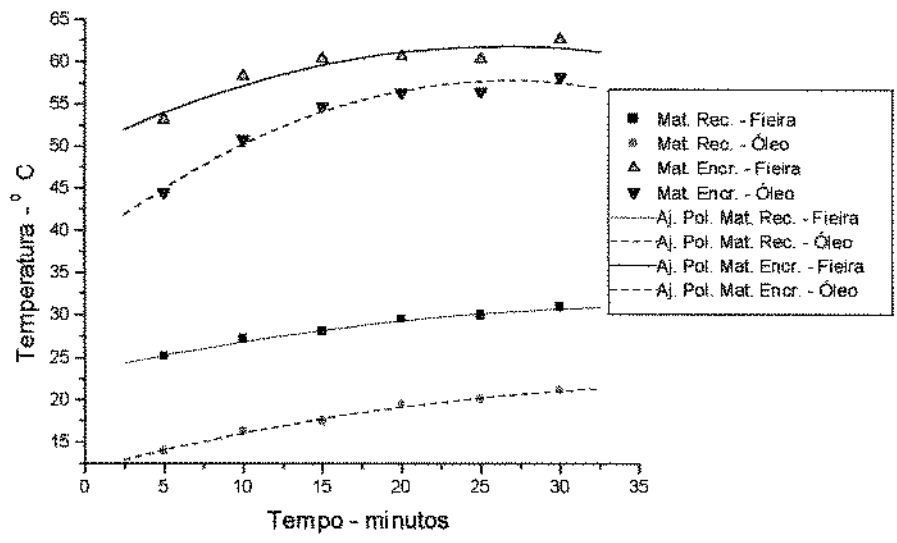


Figura 5.13 – Variação da temperatura
óleo Honilo 171 – fieira 1

Da comparação do comportamento do óleo de baixa viscosidade (Honilo 171) com o óleo de alta viscosidade (MJF 5), observa-se:

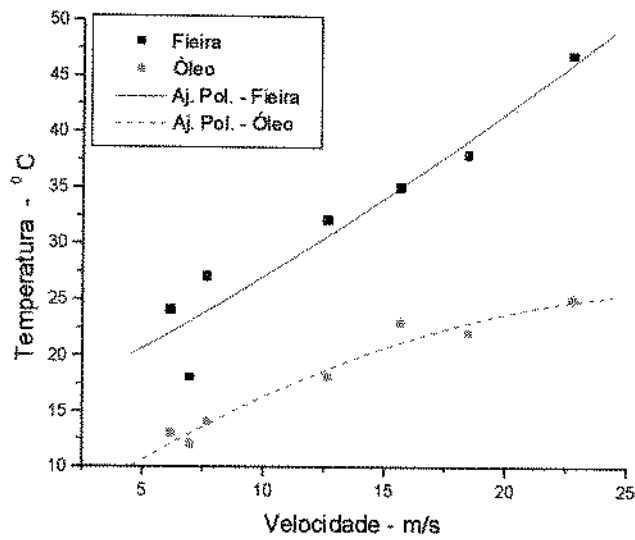
- a - A variação de temperatura da fieira na trefilação com o óleo de alta viscosidade foi de 7,4 % para o material recozido e 14,6 % para o material encruado.
- b - A variação de temperatura da fieira na trefilação com o óleo de baixa viscosidade foi de 22,9 % para o material recozido e 18,1 % para o material encruado.
- c - Óleo de alta viscosidade teve uma variação de temperatura de 13,2% na trefilação do material recozido e 21,9 % para o material encruado.
- d - Óleo de baixa viscosidade teve uma variação de temperatura de 51,2 % na trefilação do material recozido e 31,2 % para o material encruado.
- e - A maior temperatura foi alcançada no uso do óleo de maior viscosidade.
- f - A variação de temperatura, no processo, é maior quando do uso do óleo de baixa viscosidade.

A segunda bateria de ensaios tem como objetivo verificar o comportamento da temperatura no processo de trefilação com o aumento sucessivo da velocidade.

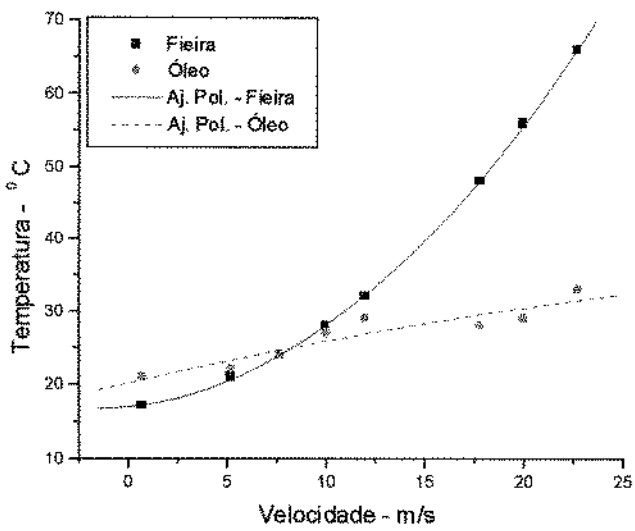
- a - Como visto no conjunto de experimento anterior, a tensão do material tem grande influência no processo.
- b - O maior aporte de temperatura verificado nestes ensaios confirmam a grande influência da taxa de deformação.
- c - O calor gerado pela redução da secção do fio é dissipado no óleo por condução.
- d - A retenção inicial de calor é maior no óleo de maior viscosidade, como pode ser observado na comparação entre os dois óleos, na faixa que atinge até a velocidade média.

- e - A grande diferença observada entre as temperaturas das figuras 5.14 (a , b) e as figuras 5.12 e 5.13 é explicada pelo reduzido tempo em que se alcançou a velocidade de 22 m/s.
- f - As figuras 5.15 a 5.18 mostram a grande influência do aumento sucessivo da velocidade na temperatura do óleo.
- g - Da comparação das figuras 5.15 com 5.17 e 5.16 com 5.18 verifica-se a variação significativa da temperatura no óleo, o que mostra a dependência de η somente de p para materiais recozidos (expressão 3.7) e a introdução da variação de temperatura (ΔT) em η para materiais encruados (expressão 3.13).

Esta segunda bateria de ensaios mostra a importância do controle da temperatura da fieira através da refrigeração direta quando do uso de trefila a seco ou da refrigeração do tanque lubrificante quando do uso de trefila de múltiplos passes.



(a) óleo Honilo 171



(b) óleo MJF 5

Figura 5.14 – Temperatura x Velocidade
fieira 1 - recozido

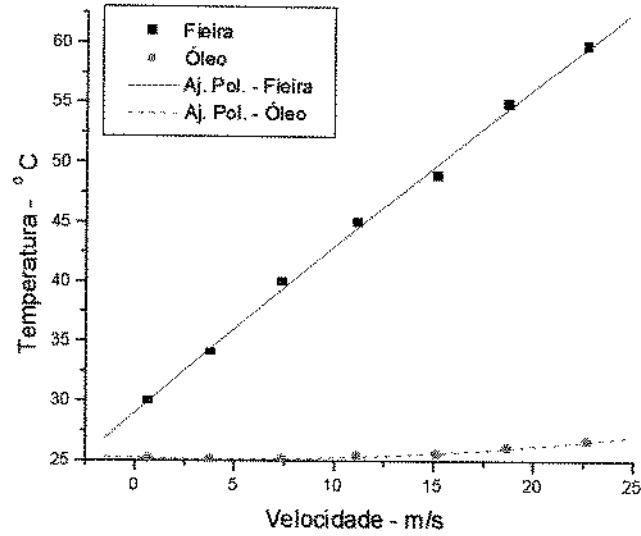


Figura 5.15 – Temperatura x Velocidade
fieira 5 – óleo Honilo 171 – recozido

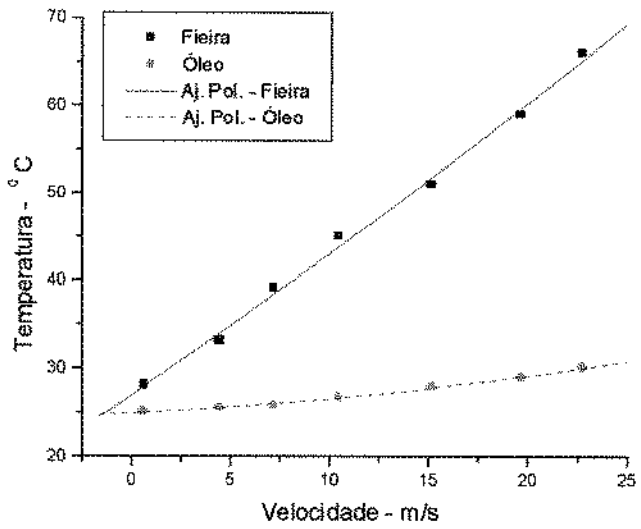


Figura 5.16 – Temperatura x Velocidade
fieira 5 – óleo MJF 5 - recozido

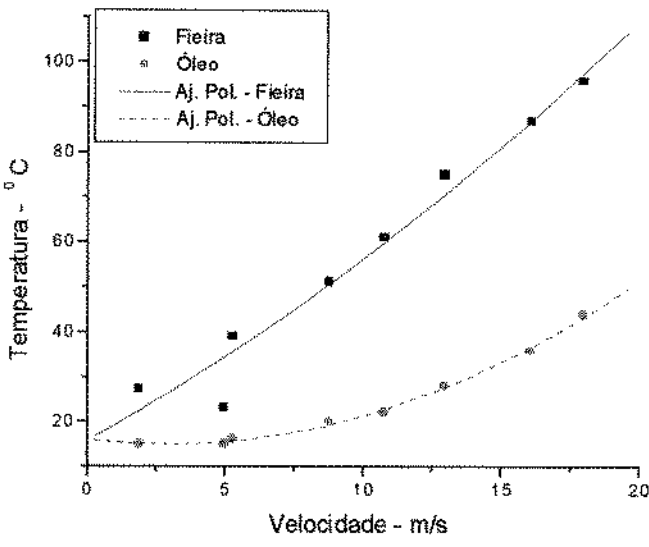


Figura 5.17 – Temperatura x Velocidade
fieira 5 – óleo Honilo 171 - encruado

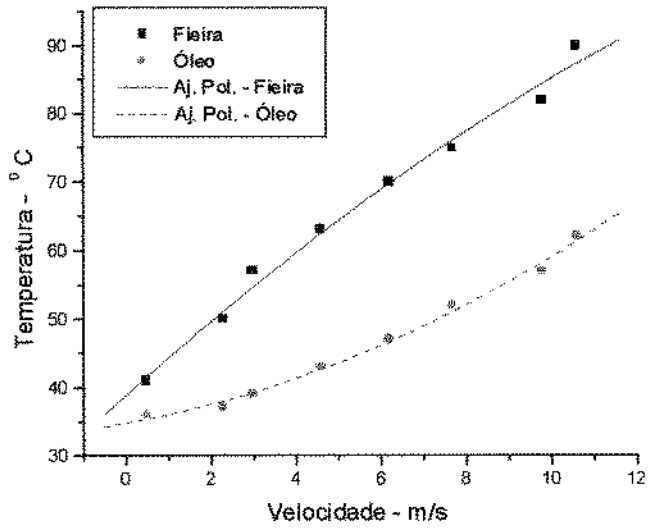


Figura 5.18 – Temperatura x Velocidade
fieira 5 – óleo MJF 5 - encruado

5.3 Análise das simulações com o modelo físico-matemático

Através da execução de rotinas computacionais, para os modelos do capítulo 3, obtiveram-se resultados relativos às seguintes variáveis de processo:

- Espessura do filme lubrificante para diversos ângulos 2β e várias velocidades.
- Regime de lubrificação para os ensaios experimentais efetuados.
- Variação da pressão (p) no filme lubrificante.
- Variação da temperatura do fio.

Os valores teóricos associados aos resultados obtidos experimentalmente serão utilizados para definir as melhores condições de lubrificação para trefilação do aço inoxidável ABNT 304 L a altas velocidades.

A seguir, apresentam-se as diversas tabelas e figuras relacionadas com os resultados obtidos através das simulações realizadas.

Empregaram-se para a simulação, os parâmetros de processamento apresentados na tabela 5.10.

A tabela 5.11 apresenta os valores complementares assumidos para os parâmetros de trefilação

A tabela 5.12 apresenta os valores obtidos por simulação (expressão 3.12) para a espessura do filme lubrificante na entrada da região de deformação, utilizando os dados obtidos no procedimento experimental, na trefilação de fio recozido.

A tabela 5.13 apresenta os valores obtidos por simulação (expressão 3.14) para a espessura do filme lubrificante na entrada da região de deformação, utilizando os dados obtidos no procedimento experimental, na trefilação de fio encruado.

Tabela 5.10 – Espessura do filme – condições utilizadas para simulação

Material recozido $\sigma_0= 6,78 \times 10^8 \text{ Pa}$	Material encruado $\sigma_0= 1,554 \times 10^9 \text{ Pa}$
$h_1 = \frac{3.U.\eta_0.\alpha}{\left(1 - e^{-\alpha.\sigma_0}\right).tg\beta}$	$h_1 = \frac{3.U.\eta_0.\alpha.e^{-b.\Delta T}}{\left(1 - e^{-\alpha.\sigma_0}\right).tg\beta}$
	$\Delta T \neq 0$
	b ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) – MJF 5: 0.107 Honilo 171: 0.0625
U (m/s): 1, 7, 13, 19, 25	
$2\beta(^{\circ})$: 10 a 18	
$\eta_0 \text{ (N.s/m}^2\text{)} - \text{MJF 5: 1.001}$ Honilo 171: 0.01073	
$\alpha \text{ (m}^2\text{/N)} - \text{MJF 5: } 2.0 \times 10^{-8}$ Honilo 171: 0.7×10^{-8} [Button, 1994]	

Tabela 5.11 – Valores complementares assumidos para os parâmetros de trefilação

Coeficiente de encruamento – K [Askeland,1985]	0,52
Condutibilidade térmica do lubrificante - K_l	0,17 W/m $^{\circ}\text{C}$
Condutibilidade térmica do material do fio - K_b [Askeland,1985]	30,096 W/m $^{\circ}\text{C}$
Densidade do material do fio - ρ [Silva, Mei,1988]	$7,9 \times 10^9 \text{ kg/m}^3$
Coeficiente de Poisson [Dieter, 1981]	0,28

Tabela 5.12 – Espessura do filme lubrificante (h_1) – material recozido

Óleo	Fieira	U (m/s)	h_1 (m)	Óleo	Fieira	U (m/s)	h_1 (m)
Honilo 171 η_0 0,01073	7	0,6	$8,6 \times 10^{-10}$	MJF 5 η_0 1,001	7	0,7	$2,6 \times 10^{-7}$
		11,1	$1,5 \times 10^{-8}$			10,1	$3,8 \times 10^{-6}$
		22,7	$3,2 \times 10^{-8}$			22,7	$8,6 \times 10^{-6}$
	8	0,6	$8,6 \times 10^{-10}$		8	0,8	$3,0 \times 10^{-7}$
		10,8	$1,5 \times 10^{-8}$			11,7	$4,4 \times 10^{-6}$
		22,7	$3,2 \times 10^{-8}$			22,7	$8,8 \times 10^{-6}$
	9	1,2	$1,7 \times 10^{-9}$		9	0,8	$3,0 \times 10^{-7}$
		11	$1,5 \times 10^{-8}$			10,3	$3,9 \times 10^{-6}$
		22,8	$3,2 \times 10^{-8}$			19,1	$7,2 \times 10^{-6}$
	5	0,7	$1,2 \times 10^{-9}$		4	0,8	$3,9 \times 10^{-7}$
		11,2	$2,0 \times 10^{-8}$			12,3	$6,0 \times 10^{-6}$
		22,7	$4,2 \times 10^{-8}$			22,7	$1,1 \times 10^{-5}$
	6	0,6	$1,1 \times 10^{-9}$		5	0,6	$2,9 \times 10^{-7}$
		10,9	$2,0 \times 10^{-8}$			10,4	$5,0 \times 10^{-6}$
		22,7	$4,2 \times 10^{-8}$			22,7	$1,1 \times 10^{-5}$
	2	0,9	$2,3 \times 10^{-9}$		6	0,7	$3,4 \times 10^{-7}$
		10,4	$2,7 \times 10^{-8}$			11,8	$5,7 \times 10^{-6}$
		22,9	$5,9 \times 10^{-8}$			19,6	$9,6 \times 10^{-6}$
	3	1,1	$2,8 \times 10^{-9}$		2	0,71	$4,8 \times 10^{-7}$
		10,6	$2,7 \times 10^{-8}$			10,6	$7,2 \times 10^{-6}$
		22,7	$5,9 \times 10^{-8}$			22,8	$1,5 \times 10^{-5}$
					3	0,8	$5,5 \times 10^{-7}$
						11,5	$7,9 \times 10^{-6}$
						22,7	$1,5 \times 10^{-5}$

Tabela 5.13 – Espessura do filme lubrificante (h_1) – material encruado

Óleo	Fieira	U (m/s)	h_1 (m)
Honilo 171 η_0 0,01073	9	0,6	8×10^{-10}
		11,9	$1,6 \times 10^{-8}$
		22,7	$3,0 \times 10^{-8}$
	3	1,6	$3,8 \times 10^{-9}$
		11	$2,6 \times 10^{-8}$
		22,7	$5,5 \times 10^{-8}$
MJF 5 η_0 1,001	2	1,0	$6,8 \times 10^{-7}$
		12,3	$8,4 \times 10^{-6}$
		22,7	$1,5 \times 10^{-5}$
	3	0,6	$4,1 \times 10^{-7}$
		11,1	$7,6 \times 10^{-6}$
		22,7	$1,5 \times 10^{-5}$

As figuras 5.19 a 5.22 apresentam os valores obtidos por simulação para a espessura do filme lubrificante na entrada da região de deformação, utilizando os parâmetros da tabela 5.10. Pode-se verificar que a espessura do filme lubrificante tende a aumentar com a redução do ângulo 2β e o aumento da velocidade relativa entre a ferramenta e o fio. Isto devido ao mecanismo de arrasto formado pelo efeito de cunha [Cheng, 1992].

Verifica-se também que o aumento de σ e a redução de η_0 diminui a espessura do filme na região de entrada, podendo-se afirmar que a espessura do filme lubrificante depende da geometria da fieira, da viscosidade do lubrificante e da velocidade do processo.

As figuras 5.23 a 5.30 permitem a comparação entre o valor mínimo (tabela 5.2 e 5.3) de espessura do filme lubrificante necessário [Wilson, 1979] para se manterem separados o fio a trefilar e a fieira, com os valores obtidos por simulação.

As figuras 5.23 a 5.25 apresentam a variação de espessura do filme na entrada da região de deformação em função da geometria da fieira e da velocidade, na trefilação de material recozido com óleo de baixa viscosidade (Honilo 171). A figura 5.29 mostra a variação de espessura na trefilação de material encruado (tabelas 5.12 e 5.13).

Da análise dessas figuras verifica-se que a espessura h_1 , obtida por simulação, utilizando a expressão 3.12 (item 3.2.a), é muitas vezes menor que o valor da espessura h , necessária [Wilson, 1979] para se manterem separados o fio a trefilar e a fieira. Experimentalmente, verificou-se um rápido desgaste da fieira quando da utilização de óleo de baixa viscosidade a altas velocidades de processo.

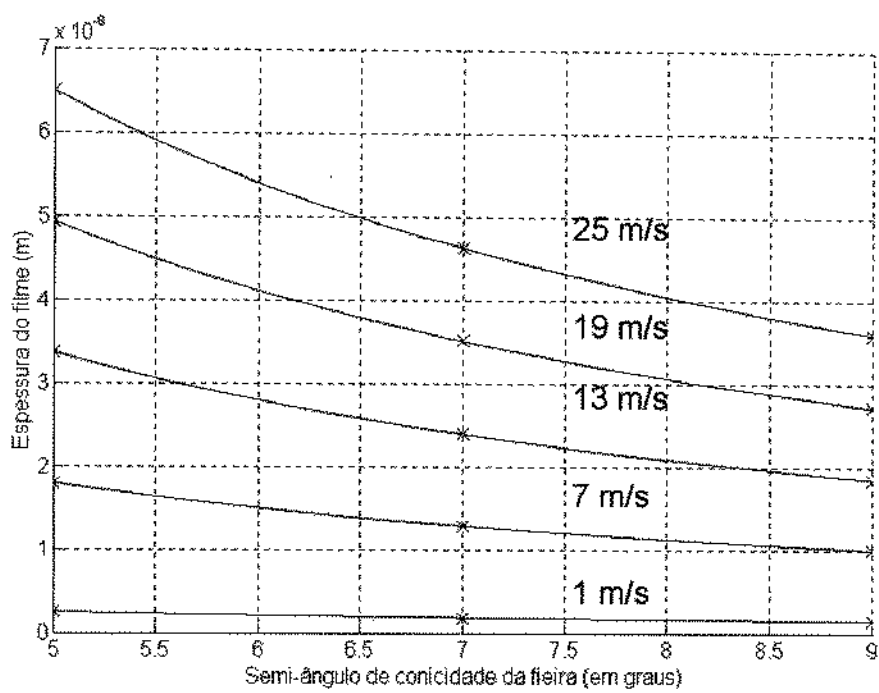


Figura 5.19 – Semi-ângulo (β) x Espessura do filme
óleo Honilo 171 - recozido

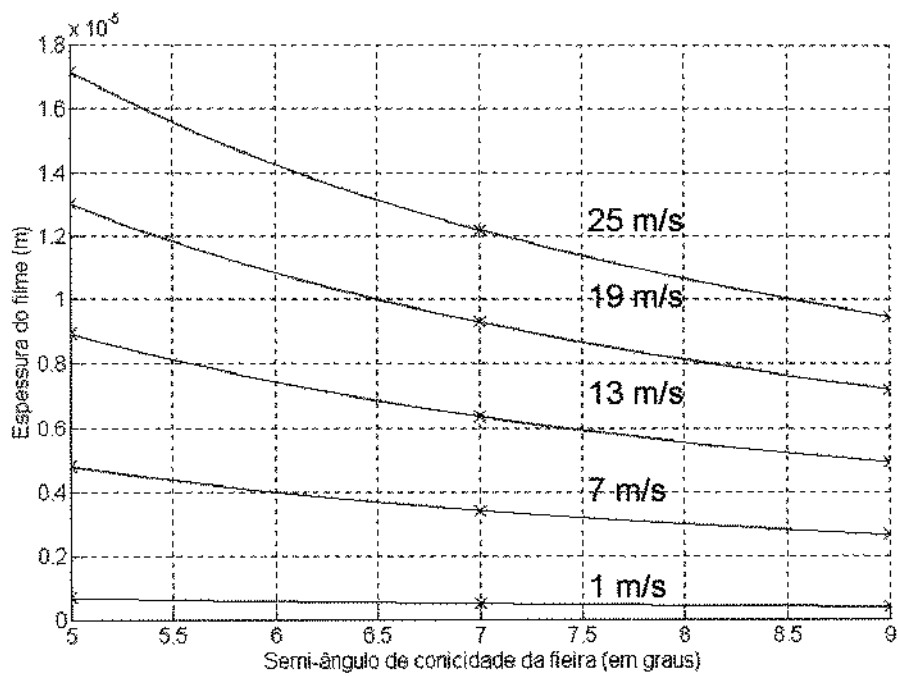


Figura 5.20 – Semi-ângulo (β) x Espessura do filme
óleo MJF 5 - recozido

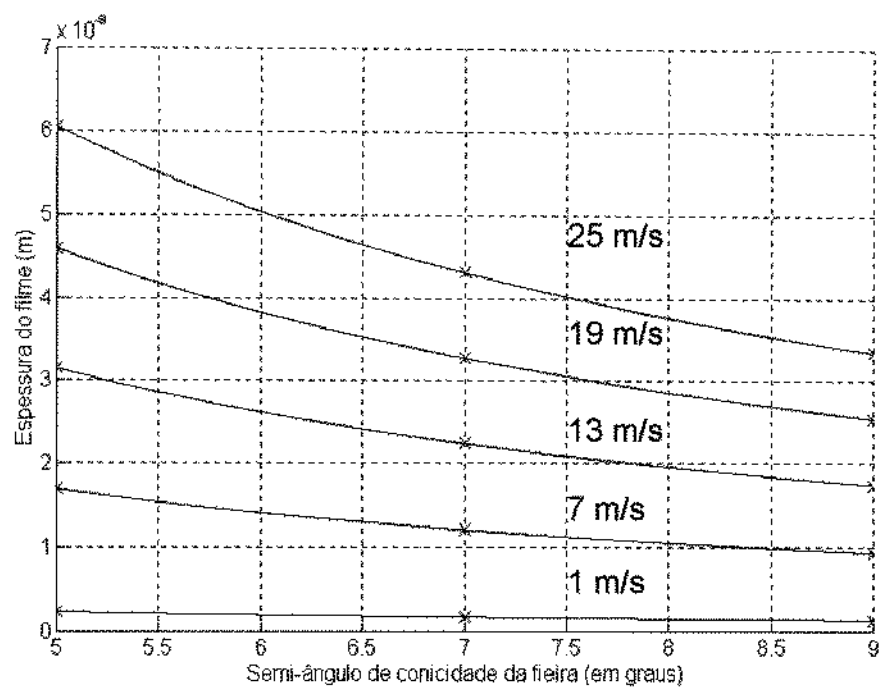


Figura 5.21 – Semi-ângulo (β) x Espessura do filme
óleo Honilo 171 – encruado

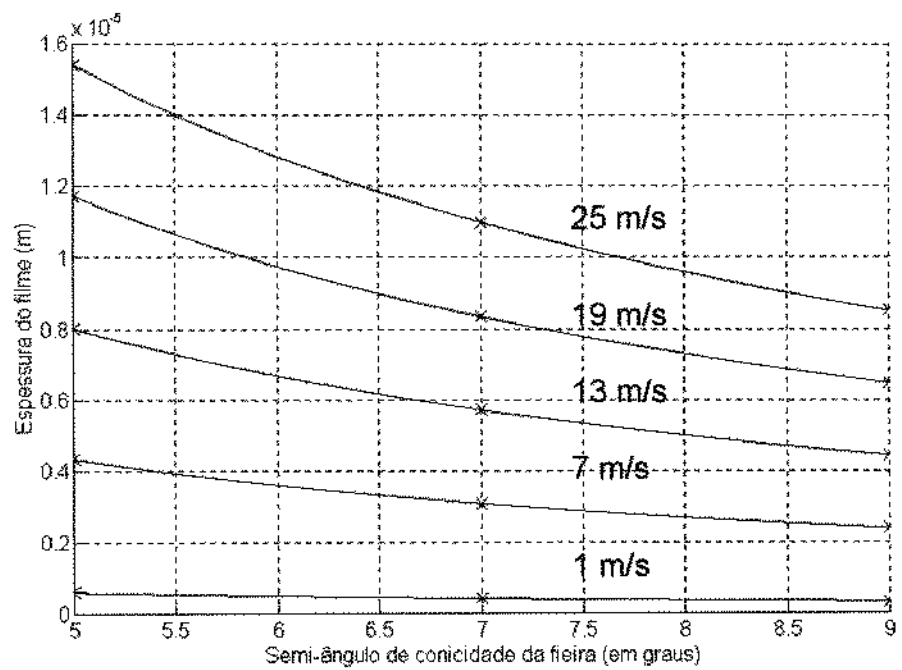


Figura 5.22 – Semi-ângulo (β) x Espessura do filme
óleo MJF 5 - encruado

Nas figuras 5.26 a 5.28 verifica-se que a espessura de filme lubrificante obtido durante o processo de trefilação, com óleo de alta viscosidade, é maior que o valor mínimo proposto por Wilson [1979] para a condição de regime de filme fino, assim como para a condição de regime de filme espesso. Esta situação se repete na trefilação de fio encruado, como visto na figura 5.30.

Como visto no capítulo 2 (item 2.33) e confirmado na simulação com o óleo de alta viscosidade, durante o processo de trefilação pode ocorrer um ou mais regimes de trefilação, motivo pelo qual é importante prever-se qual regime predomina nas diferentes condições de processo.

Devido à ocorrência de mais de um regime de lubrificação, é interessante se trabalhar no sentido de atingir a maior espessura de filme lubrificante possível, pois quanto maior a espessura, maior a possibilidade de se manterem separadas as superfícies em movimento relativo.

As figuras 5.31 a 5.36 apresentam os resultados obtidos na simulação do comportamento da distribuição de pressão (p) no filme lubrificante, em função da posição x na região de deformação, para dois materiais, com diferentes tensões de escoamento e óleo MJF 5.

Da análise das figuras verifica-se que o aumento de σ aumenta a pressão no filme lubrificante. Da comparação entre as figuras 5.31 e 5.35 e das figuras 5.32 e 5.36 verifica-se que o pico de pressão diminui com o aumento da velocidade.

As figuras 5.32, 5.34 e 5.36 mostram o deslocamento do pico de pressão no sentido inverso à diminuição da seção transversal do fio, acarretado pelo aumento progressivo da velocidade.

A pressão máxima associada a proximidade da saída da região de deformação e ao movimento relativo explicam a queda bruta de pressão no instante seguinte ao ponto máximo de pressão.

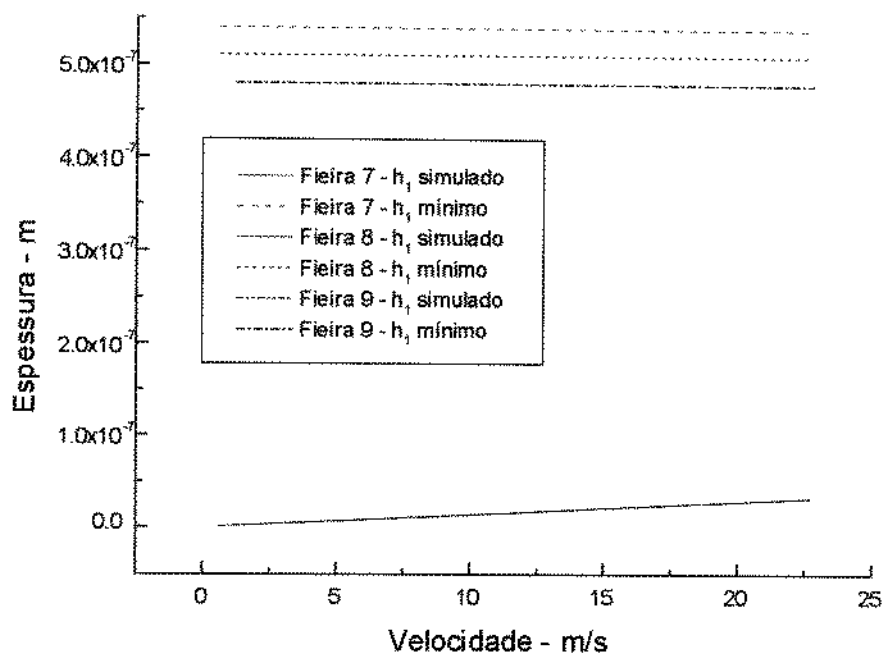


Figura 5.23 - Fieiras 7,8 e 9 – Honilo 171 - recozido

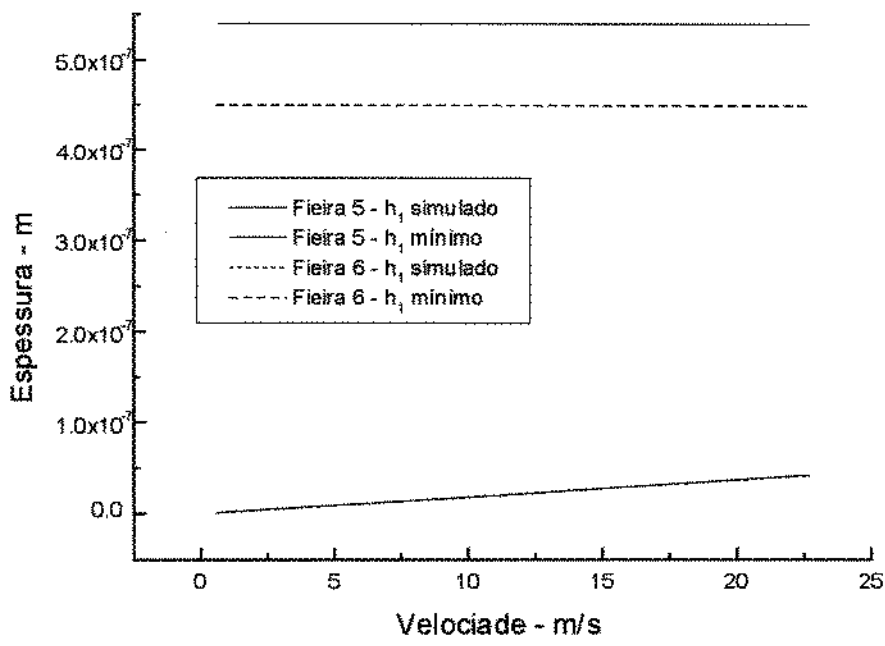


Figura 5.24 - Fieiras 5 e 6 – Honilo 171 – recozido

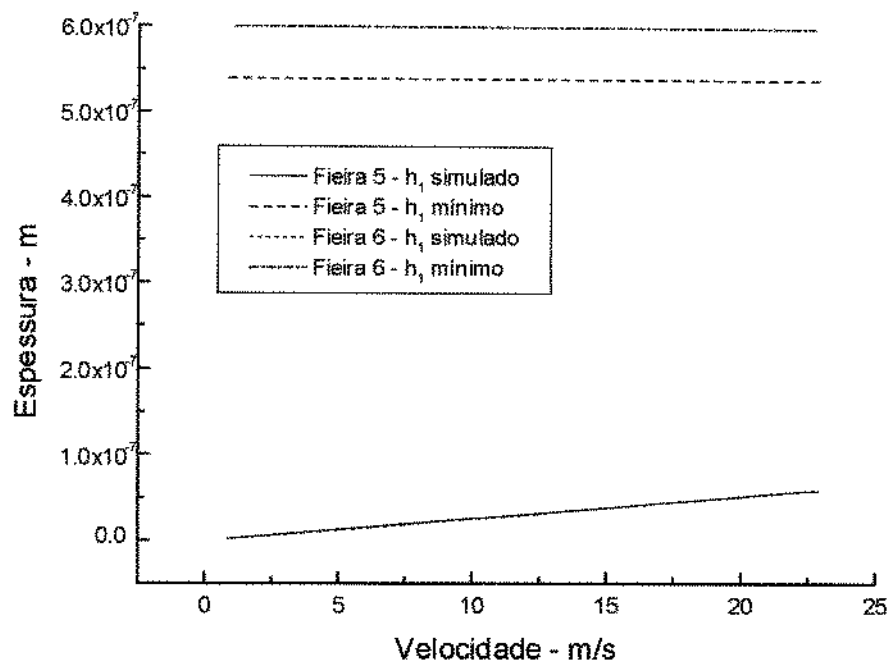


Figura 5.25 - Fieiras 2 e 3 – Honilo 171 – recozido

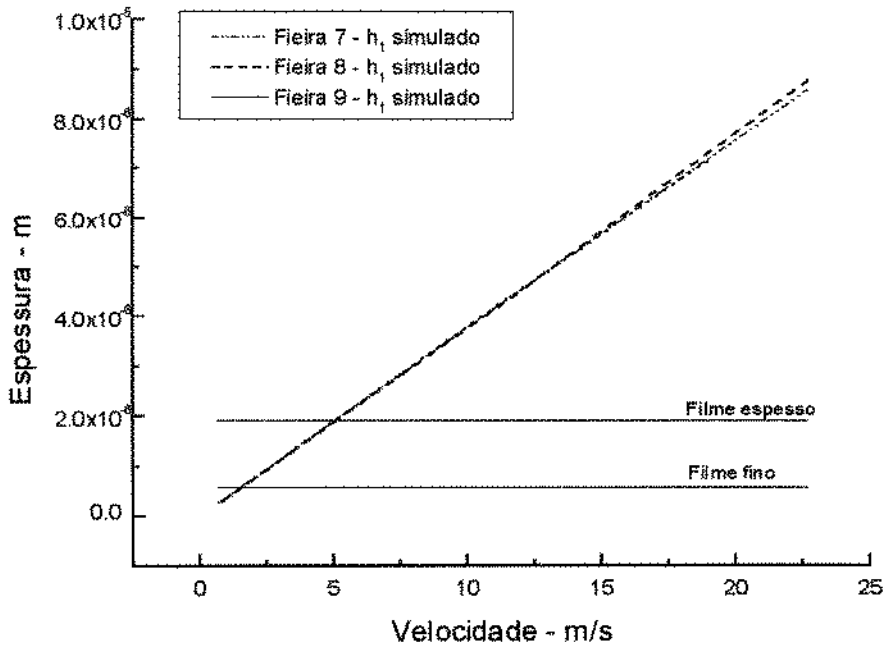


Figura 5.26 - Fieiras 7, 8 e 9 – MJF 5 – recozido

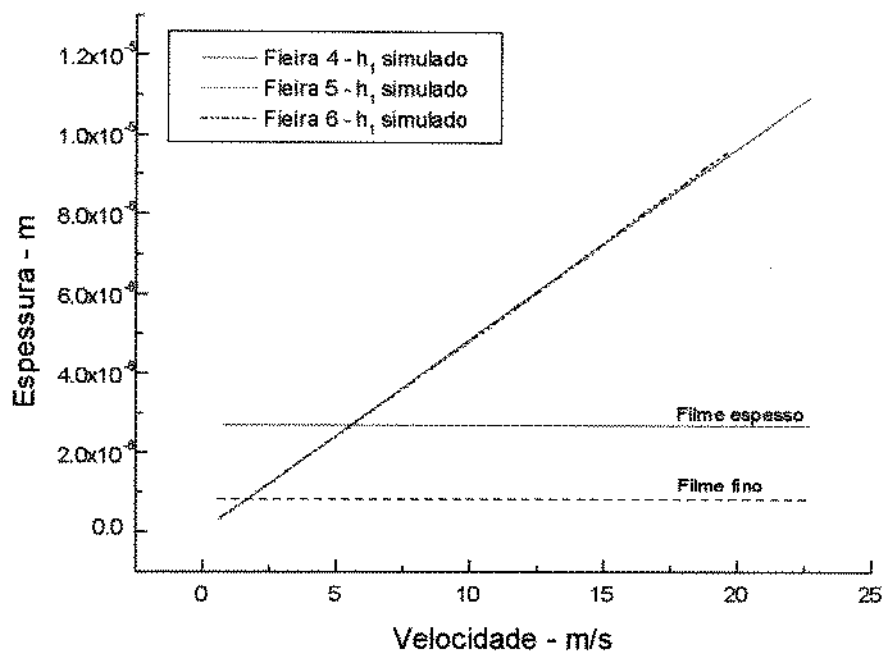


Figura 5.27 - Fieiras 4, 5 e 6 – MJF 5 – recozido

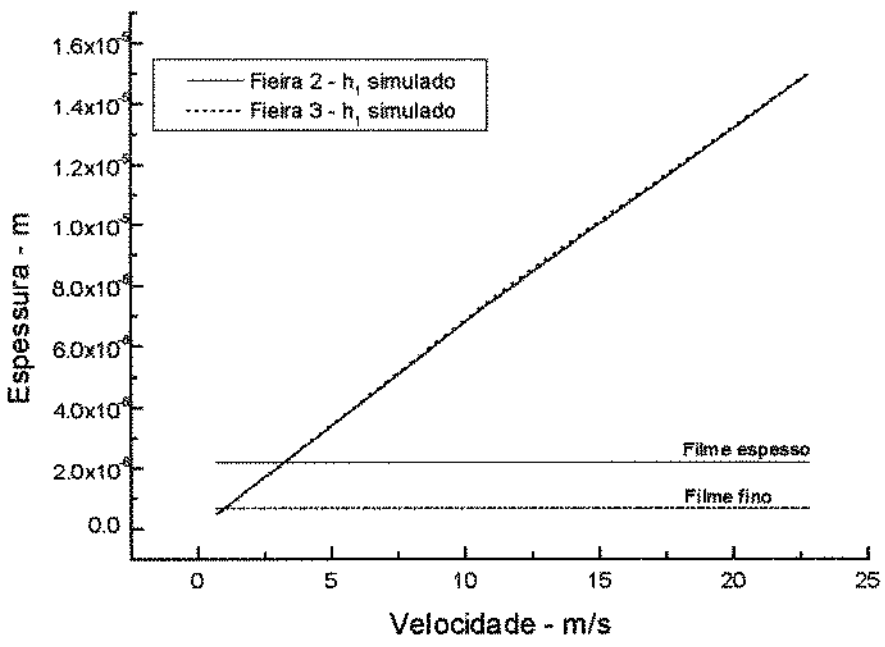


Figura 5.28 - Fieiras 2 e 3 – MJF 5 – recozido

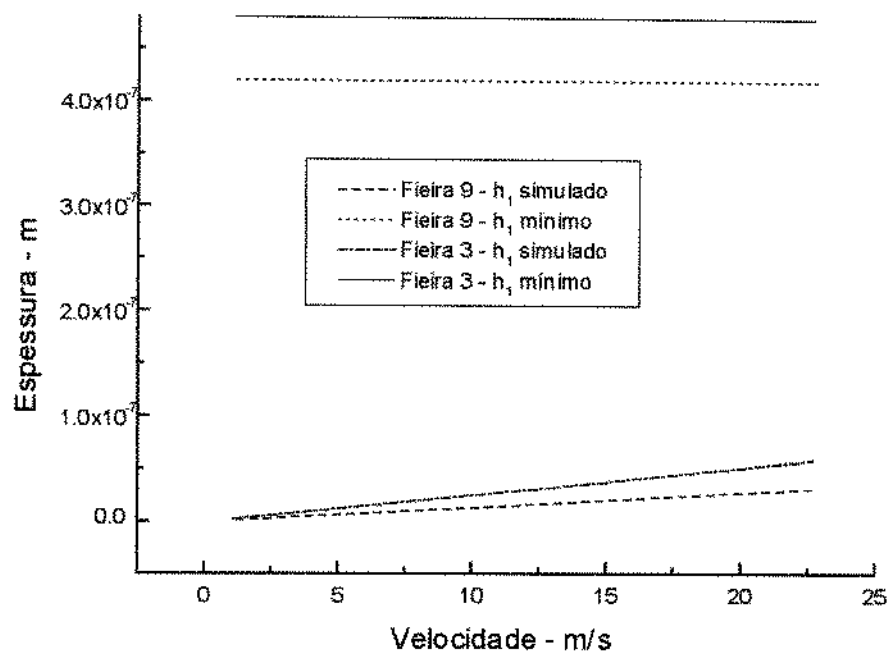


Figura 5.29 - Feiras 3 e 9 – Honilo 171 - encruado

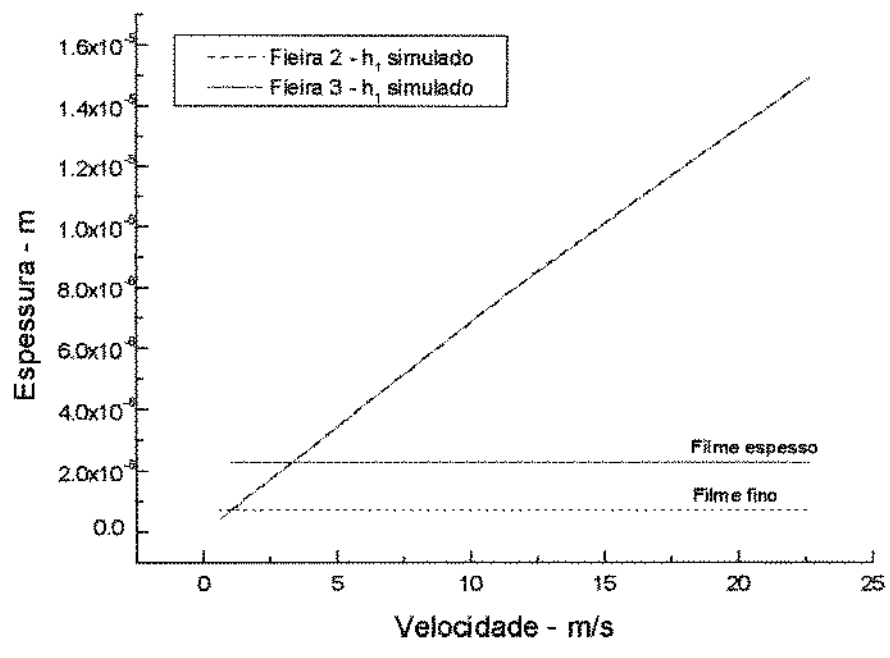


Figura 5.30 - Feiras 2 e 3 – MJF 5 - encruado

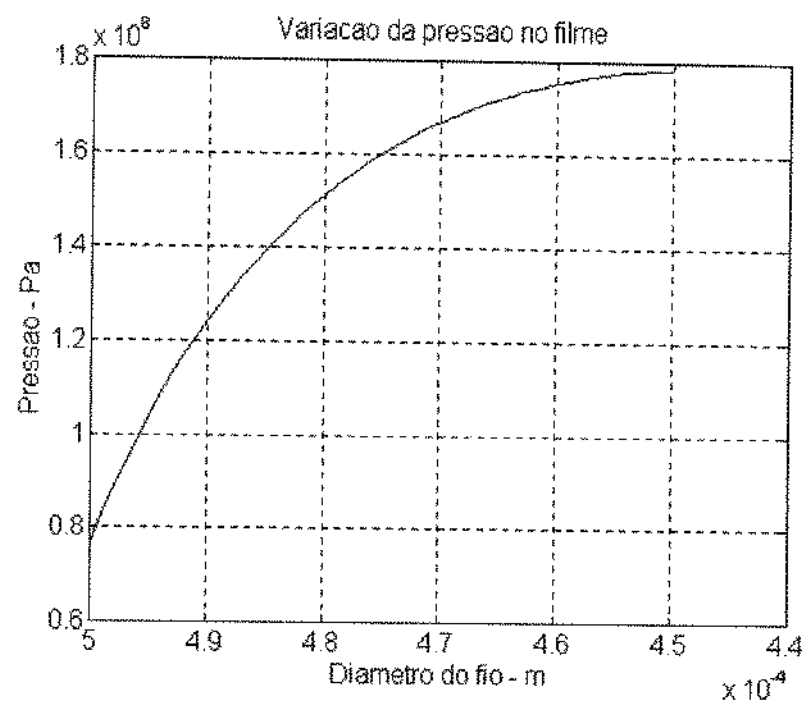


Figura 5.31 – Variação da pressão a 0.7 m/s
Material: recozido - fieira: 2 – óleo: MJF 5

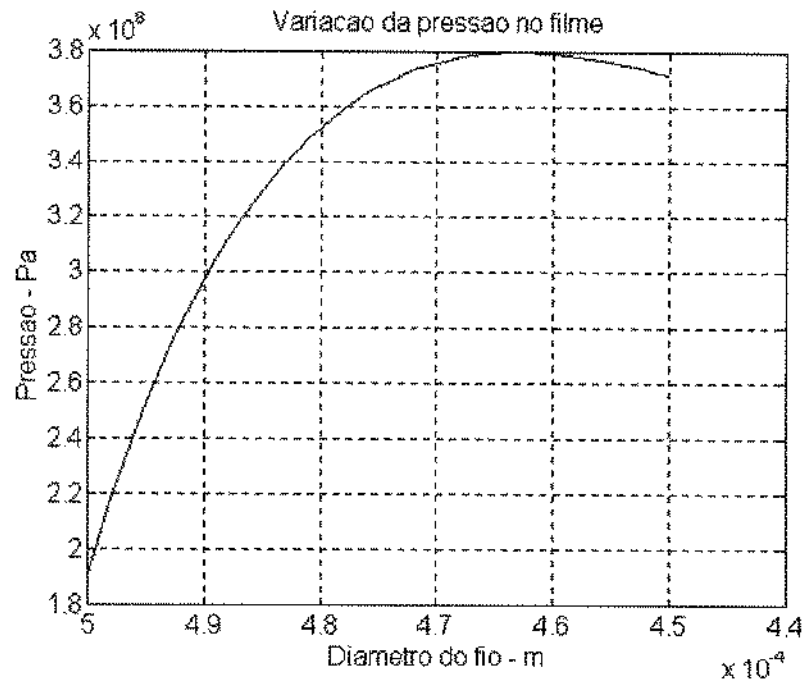


Figura 5.32 – Variação da pressão a 1 m/s
Material: encruado - fieira: 2 – óleo: MJF 5

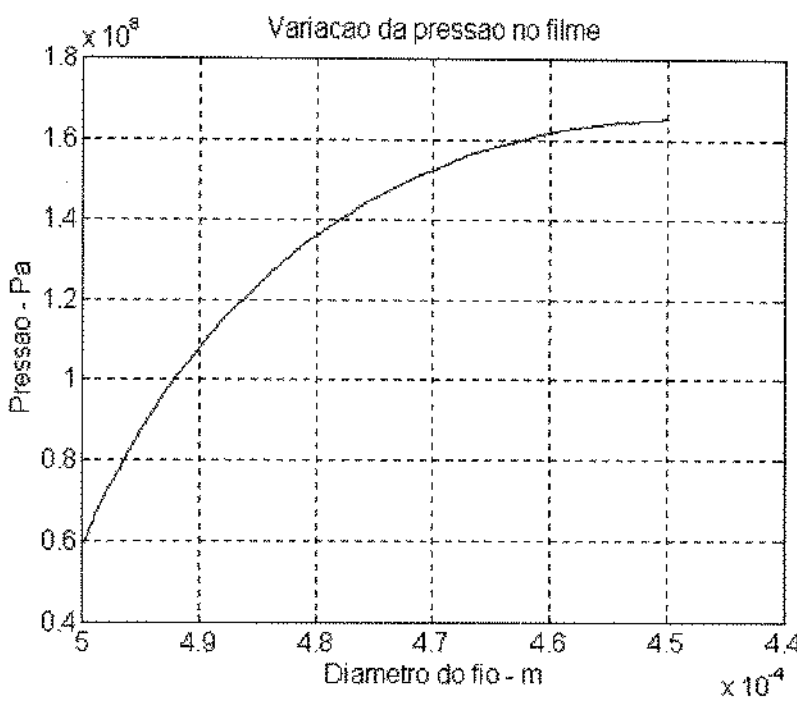


Figura 5.33 – Variação da pressão a 10.6 m/s
Material: recozido - fieira: 2 – óleo: MJF 5

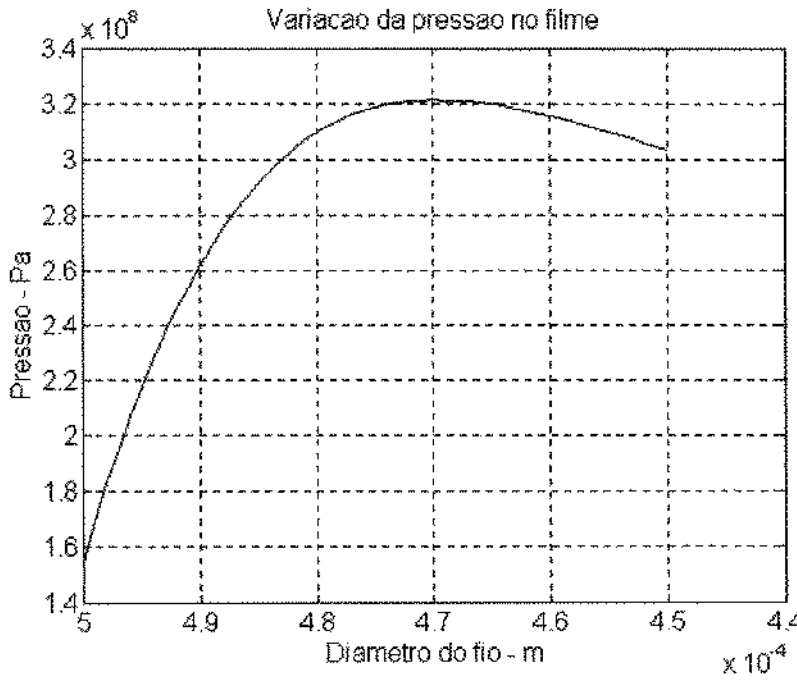


Figura 5.34 – Variação da pressão a 12.3 m/s
Material: encruado - fieira: 2 – óleo: MJF 5

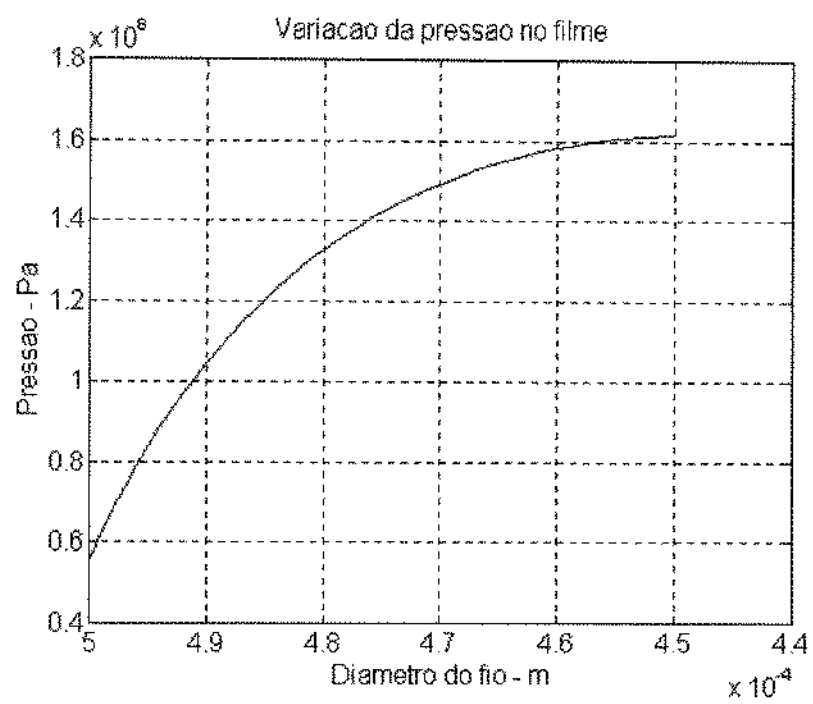


Figura 5.35 – Variação da pressão a 22.8 m/s
Material: recozido - fieira: 2 – óleo: MJF 5

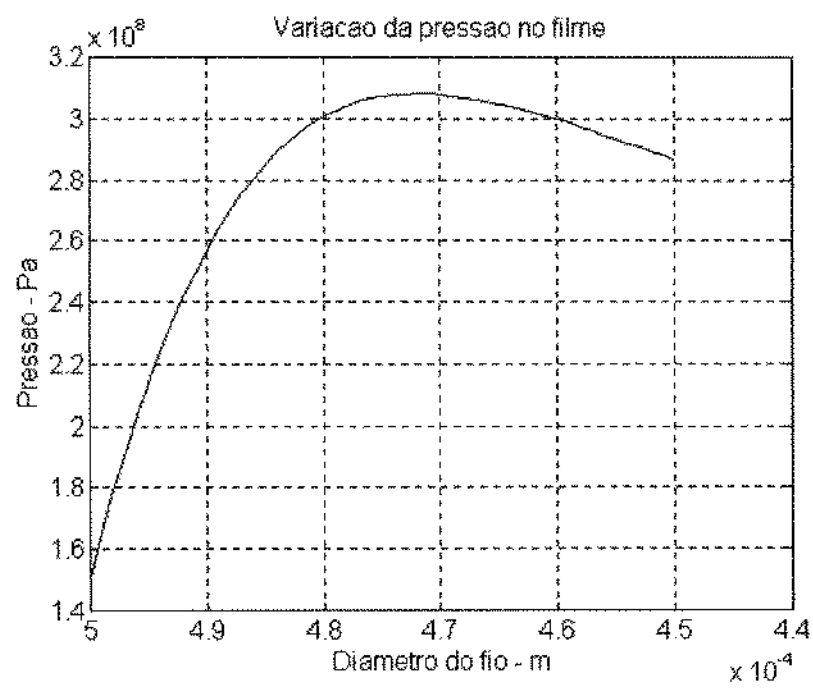


Figura 5.36 – Variação da pressão a 22.7 m/s
Material: encruado - fieira: 2 – óleo: MJF 5

A influência da temperatura é muito maior no comportamento da pressão na trefilação do material encruado em relação ao material recozido. Essas variações são ocasionadas pelo aumento da temperatura, acarretadas:

- pelo atrito – predominante no início do processo, tanto para o material recozido que apresenta uma variação de pressão inicial de 0.8 a 0.6×10^8 Pa (figuras 5.31 e 5.35) como para o material encruado com uma variação de pressão de 1.9 a 1.5×10^8 Pa (figuras 5.32 e 5.36);
- pela taxa de deformação – principal fonte geradora de calor;
- pelo cisalhamento viscoso – elemento gerador de calor a altas velocidades e principalmente na trefilação de material encruado.

Através dessas análises, verifica-se o efeito térmico da alta velocidade, que pode reduzir grandemente a espessura de lubrificante na região de entrada. Verifica-se também a variação da pressão a cada ponto x do fio, que aumenta com o aumento da velocidade e diminui com o aumento da temperatura.

Com o objetivo de melhor entender a influência da temperatura na variação da pressão na região de deformação, foram feitas algumas simulações utilizando os dados experimentais referentes às fieiras que melhores resultados apresentaram na trefilação de material recozido, conforme a figura 5.10.

As figuras 5.37 a 5.48 apresentam os resultados obtidos na simulação do comportamento da distribuição de pressão (p) no filme lubrificante e da distribuição de temperatura no fio (θ_b), em função da posição x na região de deformação.

Através dessas figuras (5.37 a 5.48), verifica-se que o aumento da velocidade provoca simultaneamente variações de pressão e de temperatura. Verifica-se também que a pressão sofre pouca variação quando da utilização de óleos de diferentes viscosidades, como visto nas figuras 5.40 a 5.45.

A influência da temperatura na viscosidade e a influência da velocidade na pressão sofrem mudanças ocasionadas pela geometria interna da ferramenta, como observado nas figuras 5.37 a 5.48 e descritos abaixo:

- fieira com menor ângulo 2β aumenta a pressão (figuras 5.37 a 5.42), o que confirma o efeito de cunha [Cheng, 1992];
- a variação da temperatura é menor quando da utilização de fieira com menor ângulo 2β ;
- para uma mesma geometria de fieira, a variação da viscosidade tem pouca influência no comportamento da pressão, como mostrado nas figuras 5.40 a 5.45;
- a região H_c tem pouca influência na variação da pressão, mantido o ângulo 2β constante, como visto nas figuras 5.43 a 5.48.

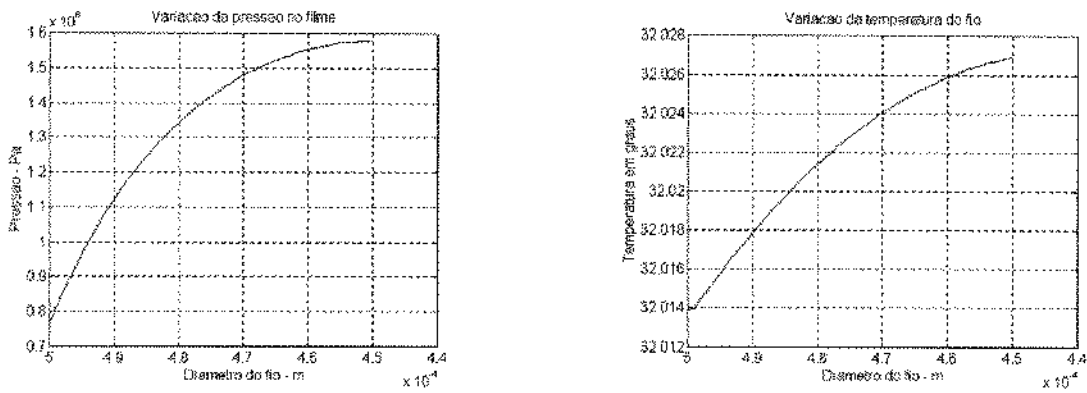


Figura 5.37 – Variação da pressão e temperatura a 1.2 m/s
Material: recozido - fieira: 9 – óleo: Honilo 171

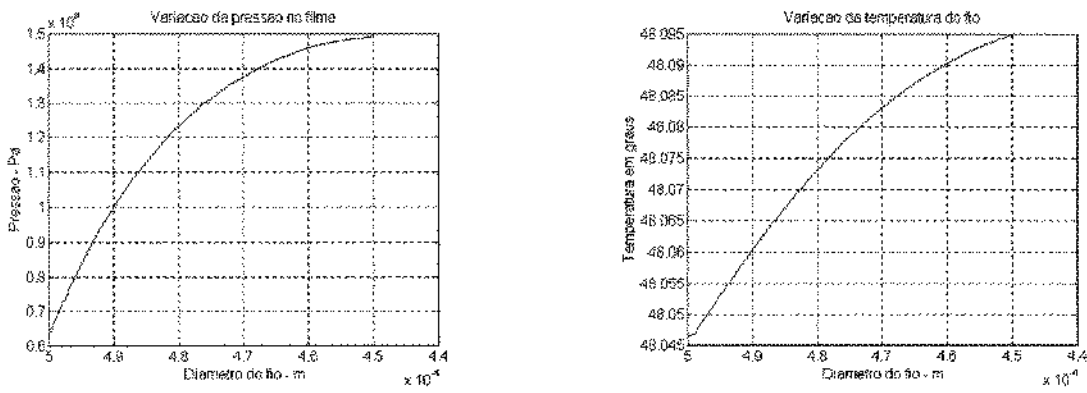


Figura 5.38 – Variação da pressão e temperatura a 11 m/s
Material: recozido - fieira: 9 – óleo: Honilo 171

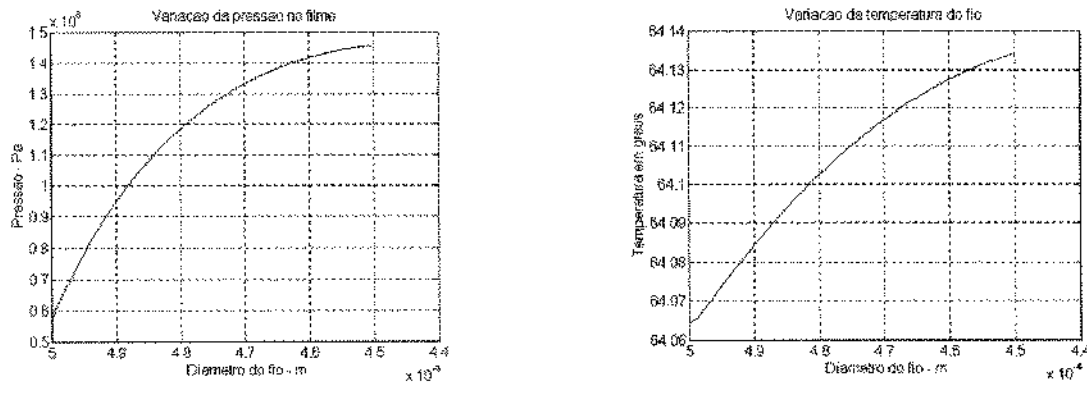


Figura 5.39 – Variação da pressão e temperatura a 22.8 m/s
Material: recozido - fieira: 9 – óleo: Honilo 171

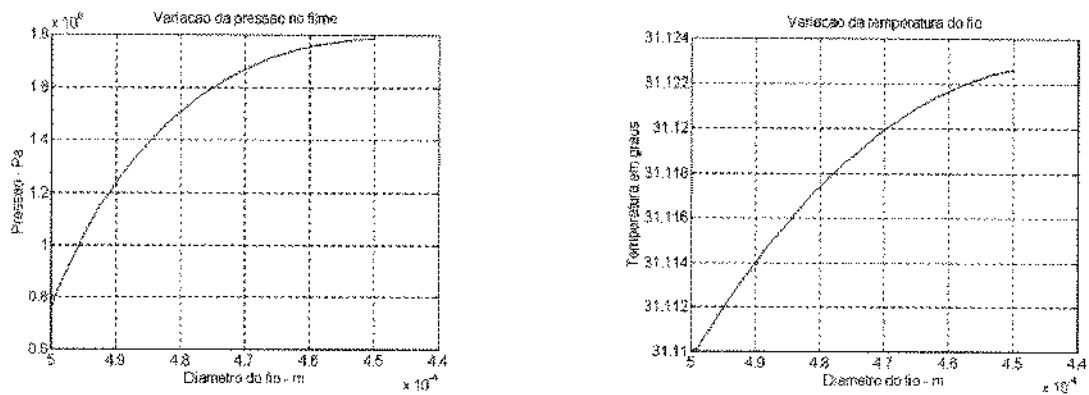


Figura 5.40 – Variação da pressão e temperatura a 1.1 m/s
Material: recozido - fieira: 3 – óleo: Honilo 171

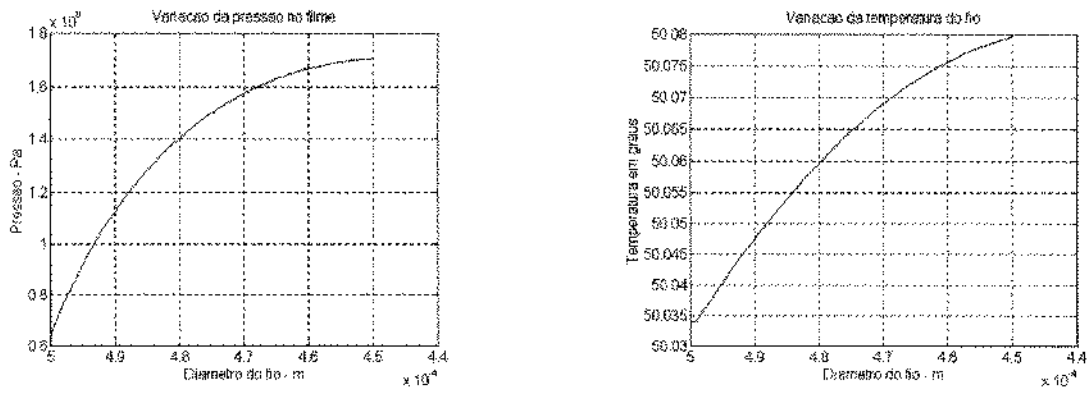


Figura 5.41 – Variação da pressão e temperatura a 10.6 m/s
Material: recozido - fieira: 3 – óleo: Honilo 171

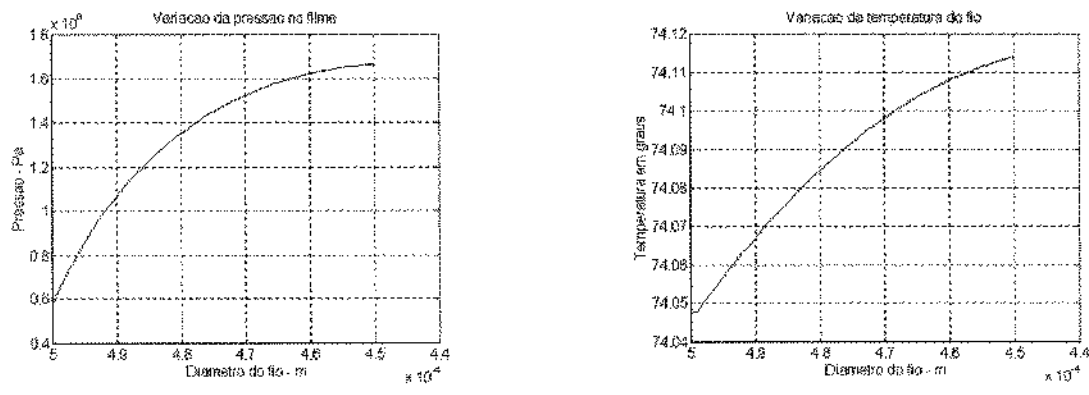


Figura 5.42 – Variação da pressão e temperatura a 22.7 m/s
Material: recozido - fieira: 3 – óleo: Honilo 171

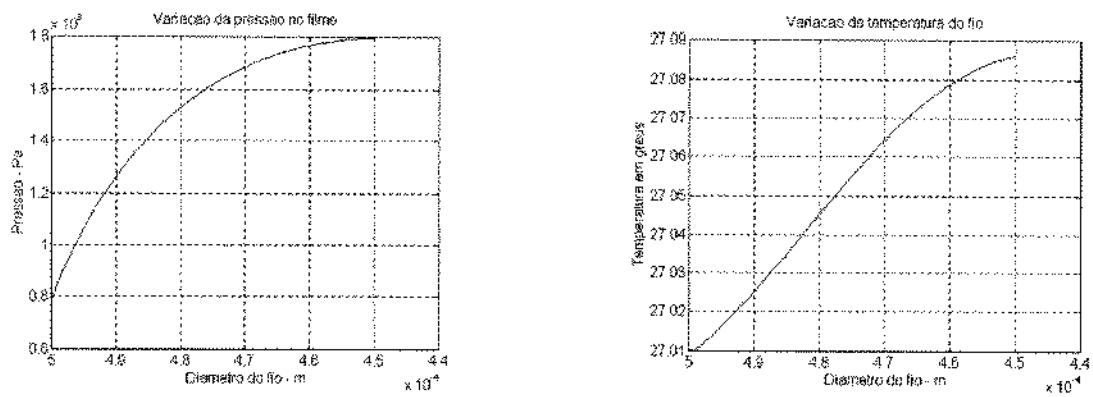


Figura 5.43 – Variação da pressão e temperatura a 0.8 m/s
Material: recozido - fieira: 3 – óleo: MJF 5

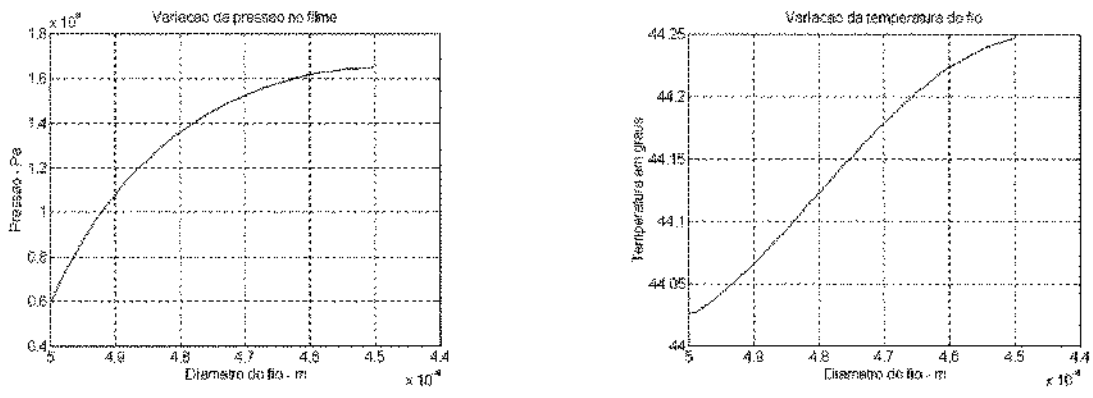


Figura 5.44 – Variação da pressão e temperatura a 11.5 m/s
Material: recozido - fieira: 3 – óleo: MJF 5

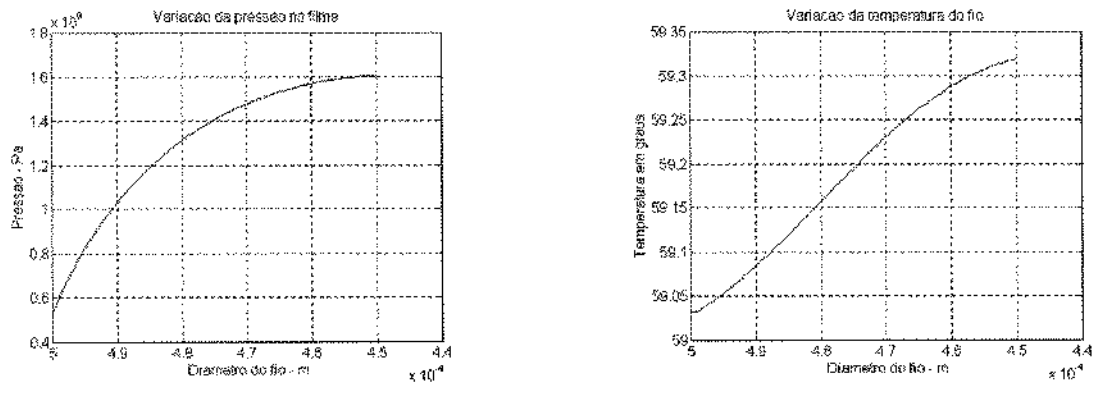


Figura 5.45 – Variação da pressão e temperatura a 22.7 m/s
Material: recozido - fieira: 3 – óleo: MJF 5

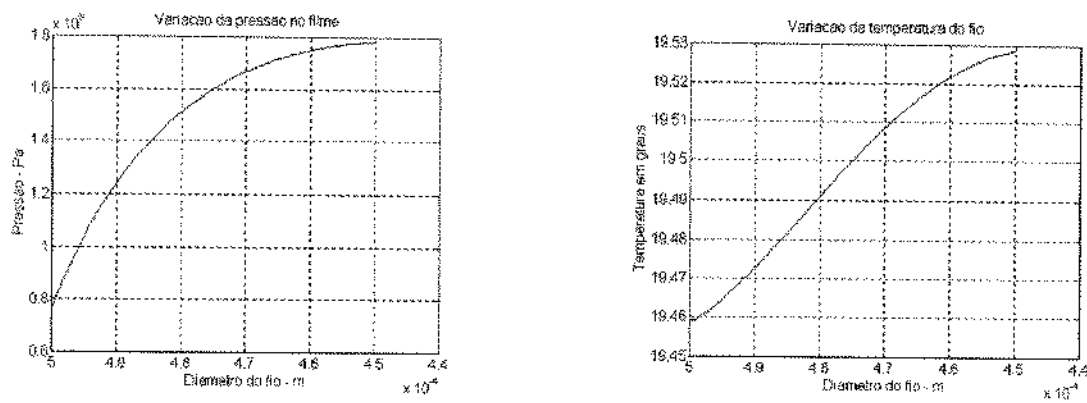


Figura 5.46 – Variação da pressão e temperatura a 0.7 m/s
Material: recozido - fieira: 2 – óleo: MJF 5

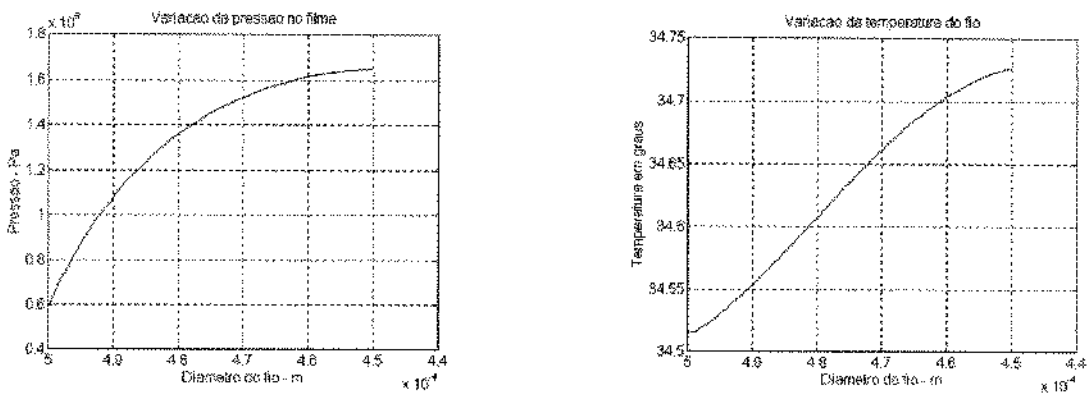


Figura 5.47 – Variação da pressão e temperatura a 10.6 m/s
Material: recozido - fieira: 2 – óleo: MJF 5

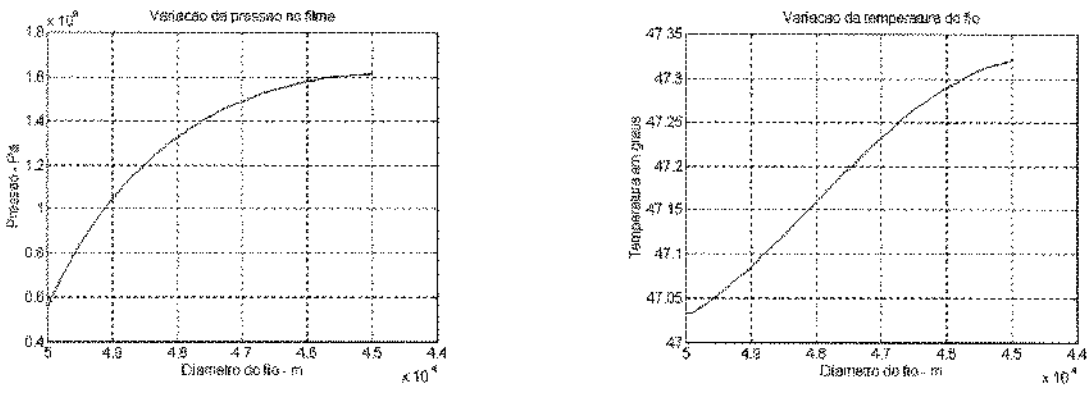


Figura 5.48 – Variação da pressão e temperatura a 22.8 m/s
Material: recozido - fieira: 2 – óleo: MJF 5

Capítulo 6

Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos

6.1 – Conclusões

Da análise dos resultados teóricos e experimentais apresentada chegou-se às seguintes conclusões:

- O efeito térmico na viscosidade do lubrificante desempenha um papel importante na espessura do filme hidrodinâmico, formada na região de entrada e na distribuição de pressão na região de trabalho.
- A influência das propriedades do lubrificante no desempenho do processo de trefilação a frio é significativo, sendo os óleos lubrificantes de elevada viscosidade os que apresentam um melhor comportamento a altas velocidades de trefilação.
- Um regime em particular ou regimes que acontecem em uma determinada situação são importantes e definidos pelo mecanismo de entrada e arrasto do lubrificante, mas o subsequente transporte e estiramento do filme lubrificante também são importantes na definição do regime presente na região de deformação.
- A velocidade de trefilação tem uma influência predominante no perfil de pressão e força de trefilação.

- As condições ideais de processamento para alta velocidade são as seguintes: ângulo 2β pequeno, lubrificante de alta viscosidade e material com boa qualidade superficial.
- O regime de lubrificação é função da geometria da ferramenta, da temperatura do processo, da velocidade e da viscosidade do lubrificante.

6.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros

A partir das observações e conclusões deste trabalho, propõe-se como temas de trabalhos futuros:

- Desenvolvimento de modelo baseado no método dos elementos finitos para estudo da lubrificação hidrodinâmica, a fim de relacionar os gradientes de microdureza aos gradientes de tensão e deformação simulados.
- Estudo da influência da viscosidade na modificação da qualidade superficial do fio trefilado a altas velocidades.
- Estudo comparativo das características mecânicas na trefilação convencional e trefilação com sistema de fieira de pressão.

Referências Bibliográficas

- [AERNOUDT, 1989] AERNOUDT, E. Materials response to wiredrawing. *Wire Journal International*, p. 53-75, March 1989.
- [ALKIRE, HUEY, KAJUCH, 1989] ALKIRE, M. J., HUEY, S. R., KAJUCH, J. Wiredrawing lubricant: cradle to grave control by a wire producer. *Wire Journal International*, p. 24-38, May 1989.
- [ASKELAND, 1985] Askeland, D. R. *La ciencia e ingeniería de los materiales*. México: Iberoamérica, 1985. 554 p.
- [AVITZUR, 1983] AVITZUR, B. *Handbook of metal forming*. Nova Iorque: John Wiley and Sons, 1983. 238 p.
- [AVITZUR, 1997] AVITZUR, B. Lubricant evaluation laboratory for fine wire drawing. *Wire Journal International*, v. 169, p. 94-98, October 1997.
- [BAKER, WRIGHT, 1992] BAKER, G., WRIGHT, R. N. Drawing research with a high speed single die block. *Wire Journal International*, p. 71-73, April 1992.
- [BRESCIANI FILHO et al., 1991] BRESCIANI FILHO, E. (Coord.). *Conformação plástica dos metais*. Campinas: Ed. da Unicamp, 1991. 385p.
- [BONZEL, 1935] BONZEL, M. *Steel wire - manufacture and properties*. New York: Eng. Book Shop, 1935. p. 94-114.
- [BRONSON, 1977] BRONSON, R. *Moderna introdução às equações diferenciais*. São Paulo: McGraw-Hill, 1977. Cap. 33: Métodos de Runge-Kutta, p. 285-294.
- [BUTTON, 1990] BUTTON, S. T. *Estudo da lubrificação hidrodinâmica na extrusão hidroestática*. Campinas: FEM-DEMa – Unicamp, 1990. 197 p. Tese (Doutorado).
- [BUTTON, 1994] BUTTON, S. T. *Análise numérica e experimental da laminação de tiras a frio*. Campinas: FEM-DEMa – Unicamp, 1994. 37 p. Tese (Livre Docência).
- [CAMERON, 1966] CAMERON, A. *The principles of lubrication*. Londres: Longmans Greens, 1966.

- [CETLIN, HELMAN, 1983] CETLIN, P. R., HELMAN, H. *Fundamentos da conformação mecânica dos metais*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983. 170p.
- [CHENG, 1992] CHENG, H.S. Lubrication regimes. In: ASM HANDBOOK - FRICTION, LUBRICATION, AND WEAR TECHNOLOGY. Metals Park: ASM Int., 1992. v.18. p. 89-97
- [CHRISTOPHERSON, NAYLOR, 1955] CHRISTOPHERSON, D. G., NAYLOR, H. Promotion of Fluid Lubrication in Wire Drawing. *Proc. Inst. Mech. Eng.*, p. 643-653, 1955.
- [CHU, CAMERON, 1962] CHU, P.S.Y., CAMERON, A. Pressure viscosity characteristics of lubricating oils. *J. Inst. Petrol.*, v. 48, p. 147-155, 1962.
- [COCKCROFT, 1967] COCKCROFT, M. G. Lubrication in metal working. *Lubrication and Lubricants*, p. 472-553, 1967.
- [CRISTESCU, 1980] CRISTESCU, N. On the optimum die angle in fast wire drawing. *Journal of Mechanical Working Technology*, v. 3, p. 275-287, 1980.
- [CZICHOS, 1995] CZICHOS, H. The role of tribology as science and technology – What are the essentials? *Tribology International*, v. 28, n. 1, p. 15-16, February 1995.
- [DIETER, 1981] DIETER, G.E. *Metalurgia mecânica*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 653 p.
- [DOVE, 1969] DOVE, A. B. *Steel wire handbook*. Stanford: The Wire Association, 1969. v.2, 289 p.
- [EDER, 1981] EDER, K. History of and new trends in wire drawing dies. *Wire Industry*, p. 797-803, November 1981.
- [FELDER, 1978] FELDER, E. Experimental and theoretical study of lubricant film thickness in wet wire drawing. In: PROC. OF THE LEEDS - LYON SYMP. ON TRIBOLOGY, September, 1978. p. 365-369.
- [FLANDERS, ALEXANDER, 1979] FLANDERS, N. A., ALEXANDER, E. M. Analysis of wire temperatures and power requirements on multipass drawing productivity. *Wire Journal International*, p. 60-68, March 1979.
- [FRASCIO, 1970] FRASCIO, A. *Il filo metalico*. Italia: Hoepli, 1970. 508 p.
- [GERBASE, 1976] GERBASE FILHO, J. *Método de medição de forças de trefilação de arames; avaliação da variação do coeficiente de atrito em trefilação de arame de aço*. Porto Alegre: Escola de Engenharia, UFRGS, 1976. 32 p. Dissertação (Mestrado).

[GERDS, BOULGER, 1966] GERDS, A. F., BOULGER, F. W. Rod, wire, and tube drawing In: BATELLE MEMORIAL INSTITUTE. *Metal Deformation Processing*. Columbus, 1966. v. 2, p. 78-124. DMIC Report 226.

[GOLIS et al., 1997] GOLIS, B., PILARCZYK, J. W., BLAZEJOWSKI, Z., FILIPCZYK, E. Drawing practice of steel wires with pressure dies. *Wire Journal International*, p. 54-67, April 1997.

[GRUDEV et al., 1984] GRUDEV, A. P., DOLZHANSKII, A. M., BORODAVKIN, I. T., SIGALOV, Yu. B. Study of thickness of lubricant layer during drawing. *Steel in the USSR*, p. 386-387, 1984.

[HAJARE, 1991] HAJARE, A. D. Steel wire: whys and hows. *Wire Journal International*, p. 69-73, November 1991.

[HENNINGER, 1994] HENNINGER, D. A. Efficient production of low entry angle dies in high carbon wire production environments. *Wire Journal International*, p. 158-161, April 1994.

[HONDROS, 1971] HONDROS, E. D. *Tribology*. London: Mills & Boon, 1971. p. 7-70.

[JOST, 1990] JOST, H. P. Tribology, origin and future. *Wear*, 136, p.1-17, 1990.

[KARMAN, 1925] KARMAN, T. H. Beitrag zur theorie des walzvorganges. *Ztschr. F. angew. Math. und Mech.* v. 5, p. 139-141, 1925.

[KAPLANOV et al., 1991] KAPLANOV, V. I., BELOKOPYTOV, I. M., SHOKAREV, V.I., GRUN'KO, B. N. Calculation of the tickness of a lubricant layer in the deformation zone during wire drawing. *Allerton Press*, n. 1, p. 102-107, 1991.

[KLEIN, 1979] KLEIN, A. N. *Método de determinação do coeficiente de atrito na trefilação de arames*. Porto Alegre: Escola de Engenharia, UFRGS, 1979. 65 p. Dissertação (Mestrado).

[KONER, 1992] KONER SpA. Tungsten carbide. *Wire Ind.*, p. 350-356, April 1992

[KEEBLER, 1990] KEEBLER, J. Die Roundup. *Wire Technology International*, p. 29-38, May 1990.

[LANGE, 1985] LANGE, K. (Ed.). *Handbook of metal forming*. Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1985. Cap. 6: Tribology, p. 6.1-6.26 .

[MARTENSON, 1993] MARTENSON, C. Measurement of wear characteristics of alternative diamond material in wire draw dies. *Wire Journal International*, p. 90-93, July 1993.

[MAZUR, GONCHAROV,1991] MAZUR, V. L., GONCHAROV, Y. V. Special features of the development of surface microrelief on a metal during drawing. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR Metally*, n. 6, p. 59-66, 1991.

[MAXWELL, 1991] MAXWELL, T. H. Carbide die design - impact upon wire quality. *Wire Journal International*, p. 45-50, December 1991.

[MAHDAVIAN, WILSON, 1976] MAHDAVIAN, S. M., WILSON, W. R. D. Lubricant flow in a plastohydrodynamic work zone. *Transactions of the ASME*, p.16-21, January 1976.

[NAKAMURA et al., 1980] NAKAMURA, Y., KAWAKAMI, H., MATSUSHITA, T., SAWADA, H. An evaluation of lubrication in wiredrawing. *Wire Journal*, p. 54-58, June 1980.

[ONO, UCHIDA, ISHIBASHI, 1992] ONO, M., UCHIDA, M., ISHIBASHI, T. Stainless steel pickling by fixed concentration HF/HNO₃ mixtures through diffusion dialysis acid reclamation. *Wire Journal International* . p. 43-48, March 1992.

[ORLOV, 1967] ORLOV, S. I. Drawing wire under hydrodynamic conditions of friction. *Stal*, n. 7, p. 619-621, July 1967.

[PILARCZYK, 1997] PILARCZYK, J. W. Hydrodynamic drawing effects on wire ASTRO characteristics. *Wire Journal International*, p. 70-81, September 1997.

[PUGH, 1964] PUGH, H. L. D. Redundant work and friction in the hydrostatic extrusion of pure aluminium and an aluminium alloy. *Journal Mech. Eng. Science* , v. 6, n. 4, p. 362-370, 1964.

[ROWE,1965] ROWE, G. W. *Conformado de los metales*. Madri: Urmo,1965. 232 p.

[SARGENT, TSAO,1980] SARGENT, L. B., TSAO, Y. H. Surface roughness considerations in metalworking. *Lubrication Engineering*, v. 23, n. 1, p. 70-76, 1980.

[SARVER, SARVER, 1994] SARVER, D. R., SARVER, G. L. An innovative, economical approach to pressure drawing. *Wire Journal International*, p. 76-79, March 1994.

[SCHEY, 1970] SCHEY, J. A. *Metal deformation process, friction and lubrication*. New York: John A. Schey, 1970. Cap. 1: Background and system of approach.

[SCHEY, 1983] SCHEY, J. A. Surface roughness effects in metalworking lubrication. *Lubrication Engineering*, v. 39, p. 376-382, June 1983.

[SCHIOZER, 1990] SCHIOZER, D. *Mecânica dos Fluidos*. São Paulo: Araguaia, 1990. 593 p.

[SHIMA, WATANABE, OYANE, 1985] SHIMA, S., WATANABE, Y., OYANE, M. Effect of tool-workpiece contact length on lubrication in metal forming. *Journal of Tribology*, p. 211-215, April 1985.

[SILVA, MEI, 1988] SILVA, A. L. C., MEI, P. R. *Aços e ligas especiais*. Sumaré: Eletrometal S.A. Metais Especiais, 1988. 528 p.

[SNIDLE, PARSONS, DOWSON, 1973] SNIDLE, R. W., PARSONS, B., DOWSON, D. An elasto-plasto-hydrodynamic lubrication analysis of the hydrostatic extrusion process. *Journal of Lubrication Technology*, p. 113-122, April 1973.

[TECNOVO, 1992] TECNOVO SPA. Preparing wire rod prior to drawing. *Wire Industry*, p. 43-44, January 1992.

[TRIPP, 1983] TRIPP, J. H. Surface roughness effects in hydrodynamic lubrication: the flow factor method. *Journal of Lubrication Technology*, v. 105, p. 458-465, July 1983.

[YUST, 1985] YUST, C. S. Tribology and wear. *International Metals Reviews*, v. 30, n. 3, p. 141-154, 1985.

[WEINHOLD, PÖSSNECKER, EICKEMEYER, 1993] WEINHOLD, H., PÖSSNECKER, W., EICKEMEYER, J. Well lubricated. *Wireworld*, n. 5, p. 24-27, 1993.

[WILSON, 1977] WILSON, W. R. D. Workpiece surface roughening in a hydrodynamically lubricated metal forming process. *Journal of Lubrication Technology*, p. 10-14, January 1977.

[WILSON, 1979] WILSON, W. R. D. Friction and lubrication in bulk metal - forming processes. *J. of App. Metalworking*, v. 1, n. 1, p. 7-9, 1979.

[WILSON, WALOWIT, 1971] WILSON, W.R.D, WALOWIT, J. A. An isothermal hydrodynamic theory of strip rolling with front and back tension. I. *Mech. E.*, p. 169-172, 1971.

[WISTREICH, 1958] WISTREICH, J. G. The fundamentals of wire drawing. *Metallurgical Review*, v. 3, n. 10, p. 97-142, 1958.

[WRIGHT, 1997] WRIGHT, R. N. Physical conditions in the lubricant layer. *Wire Journal International*, p. 88-92, August 1997.

APÊNDICE I

Viscosidade dinâmica

Tabela 1 - Viscosidade dinâmica – Óleo Honilo 171

τ [Pa]	D [1/s]	η [Pa.s]	Temp [°C]	t [min]
0.007	0	0	25.2	0
0.309	19.15	0.016	25.3	0.1
0.478	42.29	0.011	25.3	0.21
0.743	66.57	0.011	25.3	0.31
1.017	90.42	0.011	25.3	0.42
1.249	113.9	0.011	25.3	0.52
1.563	138.8	0.011	25.3	0.63
1.847	161.7	0.011	25.3	0.73
2.114	185.6	0.011	25.3	0.84
2.343	209.5	0.011	25.3	0.95
2.624	233.5	0.011	25.3	1.05
2.819	256.7	0.011	25.3	1.15
3.17	280.3	0.011	25.3	1.26
3.241	304.9	0.011	25.3	1.37
3.546	328.9	0.011	25.3	1.47
3.882	352	0.011	25.3	1.58
4.17	375.8	0.011	25.3	1.68
4.457	400.1	0.011	25.3	1.79
4.738	420.8	0.011	25.3	1.89
4.992	443.6	0.011	25.3	2
--	--	--	--	--
4.984	445	0.011	25.2	2
4.847	430	0.011	25.3	2.1
4.576	410.1	0.011	25.2	2.21
4.44	386	0.012	25.3	2.32
4.135	362.9	0.011	25.2	2.42
3.907	339	0.012	25.3	2.52
3.624	314.8	0.012	25.3	2.63
3.389	291	0.012	25.3	2.74
3.18	267.6	0.012	25.2	2.84
2.966	243.8	0.012	25.3	2.95
2.619	220	0.012	25.3	3.05
2.389	195.9	0.012	25.3	3.16
2.154	172.4	0.013	25.3	3.26
1.872	148.2	0.013	25.2	3.37
1.611	124.2	0.013	25.3	3.47
1.387	99.67	0.014	25.3	3.58
1.078	77.03	0.014	25.3	3.68
0.831	52.76	0.016	25.3	3.79
0.668	28.91	0.023	25.3	3.89
0.447	3.987	0.112	25.2	4

Tabela 2 - Viscosidade dinâmica – Óleo Honilo 171

τ [Pa]	D [1/s]	η [Pa.s]	Temp [°C]	t [min]
0.319	0	0	50.2	0
0.554	28.26	0.02	50.2	0.1
0.849	66.43	0.013	50.2	0.21
1.105	102.9	0.011	50.2	0.31
1.352	140.5	0.01	50.2	0.42
1.584	177.6	0.009	50.2	0.52
1.893	215.4	0.009	50.2	0.63
2.22	251.5	0.009	50.2	0.73
2.482	288.7	0.009	50.2	0.84
2.88	326.1	0.009	50.2	0.95
3.115	363.5	0.009	50.2	1.05
3.269	399.4	0.008	50.2	1.15
3.564	433.6	0.008	50.1	1.26
3.848	469.9	0.008	50.2	1.37
4.302	506.9	0.008	50.2	1.47
4.439	542.5	0.008	50.2	1.58
4.836	581	0.008	50.2	1.68
5.074	617.3	0.008	50.2	1.79
5.249	655	0.008	50.2	1.89
5.627	690.6	0.008	50.2	2
--	--	--	--	--
5.617	693.4	0.008	50.2	2
5.578	670.7	0.008	50.2	2.1
5.194	632.9	0.008	50.2	2.21
4.957	595.9	0.008	50.2	2.32
4.584	560.3	0.008	50.2	2.42
4.336	523.3	0.008	50.2	2.52
3.975	487	0.008	50.2	2.63
3.727	447.8	0.008	50.2	2.74
3.516	412.9	0.009	50.2	2.83
3.211	378.8	0.008	50.2	2.95
3.045	341.5	0.009	50.2	3.05
2.607	304.6	0.009	50.2	3.16
2.477	268.6	0.009	50.2	3.26
2.274	231.2	0.01	50.2	3.37
1.9	193.5	0.01	50.2	3.47
1.628	156	0.01	50.2	3.58
1.372	120	0.011	50.2	3.68
1.124	82.16	0.014	50.2	3.79
0.911	45	0.02	50.2	3.89
0.58	6.336	0.092	50.2	4

Tabela 3 - Viscosidade dinâmica – Óleo Honilo 171

τ [Pa]	D [1/s]	η [Pa.s]	Temp [°C]	t [min]
0	0	0	75.4	0
0.084	29.19	0.003	75.3	0.1
0.208	66.21	0.003	75.3	0.21
0.4	102.5	0.004	75.2	0.31
0.478	140	0.003	75.3	0.42
0.613	176.6	0.003	75.3	0.52
0.73	215.4	0.003	75.3	0.63
0.853	251.4	0.003	75.4	0.73
0.964	288.6	0.003	75.3	0.84
1.125	326.1	0.003	75.3	0.95
1.24	363.3	0.003	75.4	1.05
1.432	399.5	0.004	75.3	1.15
1.57	432.9	0.004	75.3	1.26
1.727	469.9	0.004	75.3	1.37
1.801	506.2	0.004	75.3	1.47
1.979	542.5	0.004	75.3	1.58
2.05	581	0.004	75.3	1.68
2.193	617.3	0.004	75.3	1.79
2.323	655	0.004	75.3	1.89
2.482	689.9	0.004	75.3	2
--	--	--	--	--
2.513	692.7	0.004	75.3	2
2.456	670.7	0.004	75.3	2.1
2.2	632.9	0.003	75.3	2.21
2.089	595.9	0.004	75.4	2.32
1.97	559.6	0.004	75.3	2.42
1.906	523.3	0.004	75.3	2.52
1.719	484.8	0.004	75.4	2.63
1.6	448.5	0.004	75.3	2.74
1.486	412.9	0.004	75.3	2.83
1.345	379.1	0.004	75.3	2.95
1.338	341.7	0.004	75.4	3.05
1.1	304.4	0.004	75.4	3.16
1.01	268.4	0.004	75.3	3.26
0.947	230.9	0.004	75.3	3.37
0.783	193.2	0.004	75.3	3.47
0.626	155.7	0.004	75.4	3.58
0.616	119.3	0.005	75.4	3.68
0.506	82.52	0.006	75.4	3.79
0.487	44.57	0.011	75.4	3.89
0.399	6.906	0.058	75.3	4

Tabela 4 - Viscosidade dinâmica – Óleo Honilo 171

τ [Pa]	D [1/s]	η [Pa.s]	Temp [°C]	t [min]
0	0	0	90.1	0
0	28.76	0	90	0.1
0	66.35	0	90	0.21
0	102.6	0	90.1	0.31
0	140.2	0	90.1	0.42
0	177.5	0	90.1	0.52
0	215.3	0	90	0.63
0.217	251.3	1E-3	90	0.73
0.453	288.6	0.002	90	0.84
0.47	326	1E-3	90.1	0.95
0.828	363.5	0.002	90	1.05
1.006	399.6	0.003	90.1	1.15
1.074	433.6	0.002	90.1	1.26
1.218	469.9	0.003	90.1	1.37
1.371	506.9	0.003	90.1	1.47
1.569	542.5	0.003	90.1	1.58
1.686	579.5	0.003	90.1	1.68
1.959	617.3	0.003	90.1	1.79
2.095	654.3	0.003	90.1	1.89
2.302	689.9	0.003	90.1	2
--	--	--	--	--
2.283	693.4	0.003	90	2
2.142	670.7	0.003	90.1	2.1
2.017	632.2	0.003	90.1	2.21
1.831	595.9	0.003	90.1	2.32
1.745	560.3	0.003	90.1	2.42
1.529	523.3	0.003	90	2.52
1.288	485.6	0.003	90.1	2.63
1.206	448.5	0.003	90.1	2.74
1.082	412.2	0.003	90.1	2.83
0.923	378.9	0.002	90.1	2.95
0.664	341.6	0.002	90.1	3.05
0.533	304.2	0.002	90.1	3.16
0.361	268.3	1E-3	90.1	3.26
0.063	230.8	0	90	3.37
0	193.4	0	90.1	3.47
0	155.9	0	90.1	3.58
0	119.6	0	90.1	3.68
0	82.44	0	90.1	3.79
0	44.64	0	90.1	3.89
0	7.191	0	90.1	4

Tabela 5 - Viscosidade dinâmica – Óleo MJF 5

τ [Pa]	D [1/s]	η [Pa.s]	Temp [°C]	t [min]
0.113	0.000	0.000	26.1	0
13.410	18.010	0.745	26.1	0.1
30.510	41.650	0.733	26.1	0.21
48.800	65.860	0.741	26.1	0.31
65.050	90.210	0.721	26.1	0.41
81.320	113.800	0.714	26.1	0.52
98.200	137.600	0.714	26.1	0.63
115.400	160.700	0.718	26.0	0.73
133.500	185.400	0.720	26.1	0.84
149.700	209.200	0.716	26.2	0.95
166.700	233.200	0.715	26.1	1.05
182.600	256.500	0.712	26.1	1.15
199.200	280.800	0.710	26.1	1.26
218.000	304.500	0.716	26.1	1.37
235.300	328.800	0.716	26.1	1.47
253.800	351.800	0.721	26.1	1.58
270.400	375.900	0.719	26.1	1.68
287.300	399.700	0.719	26.2	1.79
306.100	420.800	0.727	26.1	1.89
321.800	443.600	0.726	26.1	2
322.600	444.300	0.726	26.1	2
310.300	430.700	0.720	26.1	2.1
293.400	410.200	0.715	26.1	2.21
270.200	385.700	0.701	26.1	2.32
254.400	362.500	0.702	26.1	2.42
242.500	338.800	0.716	26.0	2.52
226.200	314.500	0.719	26.2	2.63
210.100	290.600	0.723	26.1	2.74
194.200	267.300	0.726	26.1	2.84
173.300	243.600	0.711	26.2	2.95
156.800	219.400	0.714	26.1	3.05
138.700	195.600	0.709	26.1	3.16
122.600	171.900	0.713	26.1	3.26
104.700	148.200	0.707	26.1	3.37
87.580	124.000	0.707	26.2	3.47
70.480	100.000	0.705	26.1	3.58
54.520	76.750	0.710	26.1	3.68
36.980	51.760	0.715	26.1	3.79
20.770	28.550	0.727	26.1	3.89
3.444	3.489	0.987	26.1	4

Tabela 6 - Viscosidade dinâmica – Óleo MJF 5

τ [Pa]	D [1/s]	η [Pa.s]	Temp [°C]	t [min]
0.000	0.000	0.000	50.4	0
7.503	24.630	0.305	50.5	0.1
18.030	55.750	0.323	50.5	0.21
27.010	87.500	0.309	50.5	0.31
38.560	119.800	0.322	50.4	0.42
45.290	152.100	0.298	50.4	0.52
56.790	184.000	0.309	50.5	0.63
64.660	213.800	0.302	50.5	0.73
74.050	246.800	0.300	50.5	0.84
83.770	278.700	0.301	50.5	0.95
97.180	310.800	0.313	50.6	1.05
105.200	342.200	0.308	50.5	1.15
116.300	374.100	0.311	50.5	1.26
126.100	405.600	0.311	50.5	1.37
135.500	433.600	0.313	50.6	1.47
147.100	464.900	0.317	50.5	1.58
157.300	497.700	0.316	50.6	1.68
165.200	529.000	0.312	50.6	1.79
180.900	560.300	0.323	50.6	1.89
194.300	591.600	0.328	50.6	2
194.900	593.800	0.328	50.5	2
185.100	574.600	0.322	50.6	2.1
176.300	541.800	0.325	50.6	2.21
160.700	509.800	0.315	50.6	2.32
154.000	478.400	0.322	50.7	2.42
146.600	447.100	0.328	50.6	2.52
137.300	415.800	0.330	50.6	2.63
121.700	387.700	0.314	50.7	2.74
107.100	356.200	0.301	50.7	2.84
98.860	324.200	0.305	50.6	2.95
89.360	292.300	0.306	50.7	3.05
78.850	260.100	0.303	50.6	3.16
70.690	229.800	0.308	50.6	3.26
61.160	197.700	0.309	50.6	3.37
51.980	164.700	0.316	50.6	3.47
41.720	132.600	0.315	50.6	3.58
31.540	101.600	0.311	50.7	3.68
21.060	69.420	0.303	50.7	3.79
11.560	37.730	0.306	50.6	3.89
1.960	5.553	0.353	50.6	4

Tabela 7 - Viscosidade dinâmica – Óleo MJF 5

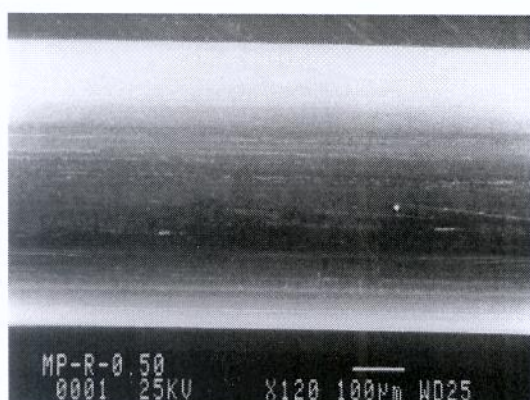
τ [Pa]	D [1/s]	η [Pa.s]	Temp [°C]	t [min]
0.225	0.000	0.000	74.3	0
5.734	36.510	0.157	74.2	0.1
12.240	83.030	0.147	74.3	0.21
18.450	127.200	0.145	74.3	0.31
25.000	173.600	0.144	74.3	0.42
31.380	220.100	0.143	74.3	0.52
37.540	266.600	0.141	74.3	0.63
43.110	311.100	0.139	74.3	0.73
47.650	357.700	0.133	74.3	0.84
51.720	404.000	0.128	74.3	0.95
56.330	450.400	0.125	74.3	1.05
61.060	495.100	0.123	74.3	1.15
66.100	542.700	0.122	74.3	1.26
70.510	587.900	0.120	74.4	1.37
75.210	634.200	0.119	74.3	1.47
80.240	679.200	0.118	74.4	1.58
85.260	725.600	0.118	74.3	1.68
89.960	771.800	0.117	74.2	1.79
94.880	818.300	0.116	74.2	1.89
100.000	863.200	0.116	74.2	2
100.400	866.200	0.116	74.2	2
96.660	837.400	0.115	74.3	2.1
91.640	791.100	0.116	74.3	2.21
85.600	744.900	0.115	74.2	2.32
80.570	700.000	0.115	74.3	2.42
75.540	653.600	0.116	74.3	2.52
70.510	607.200	0.116	74.3	2.63
65.280	562.200	0.116	74.2	2.73
59.920	516.000	0.116	74.3	2.84
54.420	469.600	0.116	74.3	2.95
49.200	423.300	0.116	74.2	3.05
43.710	376.900	0.116	74.2	3.16
38.760	332.200	0.117	74.3	3.26
33.490	285.600	0.117	74.3	3.37
28.520	239.200	0.119	74.3	3.47
23.150	192.900	0.120	74.3	3.58
17.980	148.100	0.121	74.3	3.68
12.450	101.700	0.123	74.3	3.79
7.087	55.830	0.127	74.3	3.89
1.744	9.028	0.193	74.3	4

Tabela 8 - Viscosidade dinâmica – Óleo MJF 5

τ [Pa]	D [1/s]	η [Pa.s]	Temp [°C]	t [min]
0.000	0.000	0.000	90.8	0
2.579	36.490	0.071	90.7	0.1
6.346	83.030	0.076	90.7	0.21
9.732	127.300	0.076	90.8	0.31
13.360	173.600	0.077	90.8	0.42
16.860	220.000	0.077	90.8	0.52
20.460	266.400	0.077	90.8	0.63
23.690	311.100	0.076	90.7	0.73
27.110	357.700	0.076	90.7	0.84
30.370	404.000	0.075	90.6	0.95
33.780	450.200	0.075	90.6	1.05
37.080	495.100	0.075	90.6	1.15
40.410	541.700	0.075	90.5	1.26
43.910	587.900	0.075	90.5	1.37
47.600	634.400	0.075	90.4	1.47
51.100	679.100	0.075	90.3	1.58
53.900	725.600	0.074	90.2	1.68
57.410	771.900	0.074	90.1	1.79
61.010	818.300	0.075	90.0	1.89
64.160	863.200	0.074	90.0	2
64.430	866.200	0.074	90.0	2
62.430	837.400	0.075	90.0	2.1
58.950	791.100	0.075	89.8	2.21
55.580	744.700	0.075	89.8	2.32
51.890	700.000	0.074	89.7	2.42
48.460	653.600	0.074	89.6	2.52
45.320	607.300	0.075	89.5	2.63
41.810	560.700	0.075	89.5	2.74
38.380	516.000	0.074	89.4	2.84
34.820	469.600	0.074	89.4	2.95
31.430	423.300	0.074	89.3	3.05
27.950	376.900	0.074	89.3	3.16
24.740	332.100	0.075	89.3	3.26
21.420	285.600	0.075	89.2	3.37
18.020	239.200	0.075	89.2	3.47
14.530	192.900	0.075	89.2	3.58
11.260	148.200	0.076	89.1	3.68
7.810	101.700	0.077	89.1	3.79
4.323	55.870	0.077	88.9	3.89
0.858	8.956	0.096	89.0	4

APÊNDICE II

Estado superficial dos fios

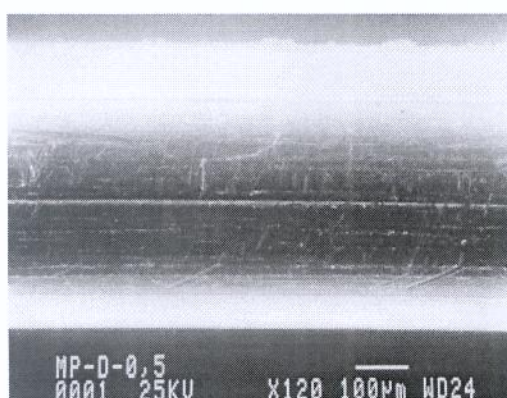


(120 x)

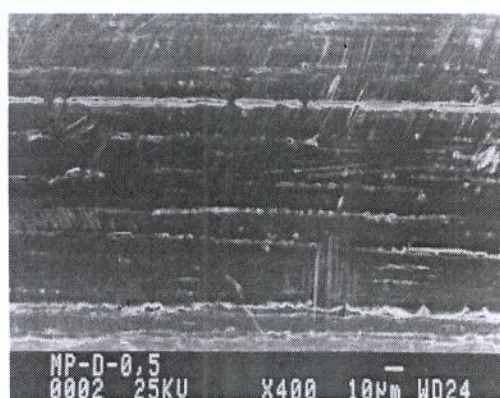


(400 x)

Figura 1 – Qualidade superficial do fio Ø 0,50 mm - recozido

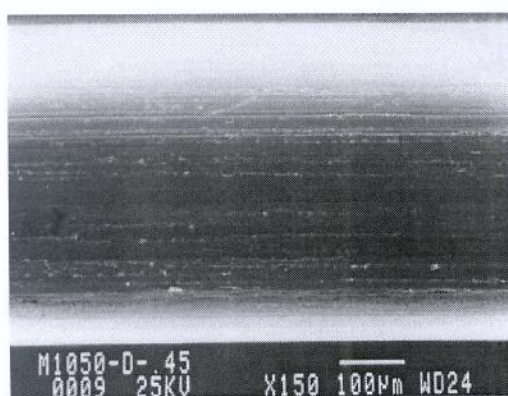


(120 x)

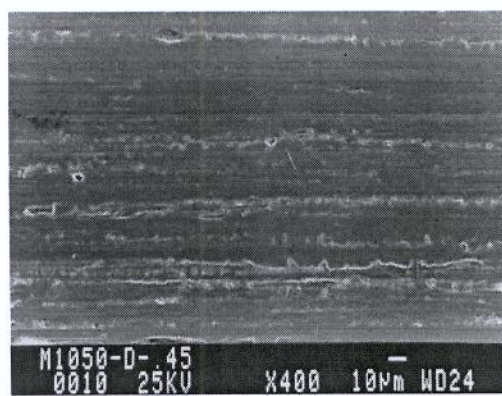


(400 x)

Figura 2 – Qualidade superficial do fio Ø 0,50 mm - encruado



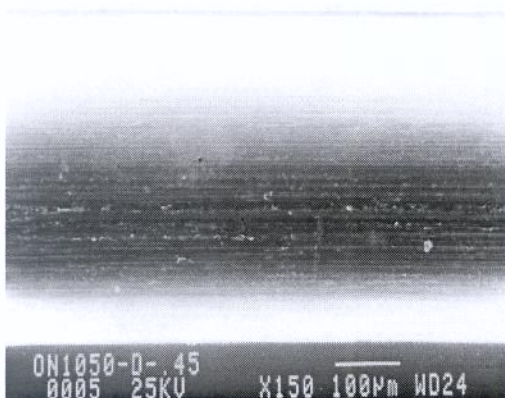
(150 x)



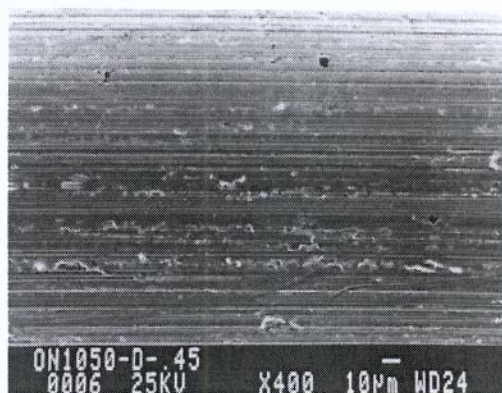
(400 x)

Figura 3 – Qualidade superficial do fio Ø 0,45 mm - encruado

óleo MJF 5 – fieira 3

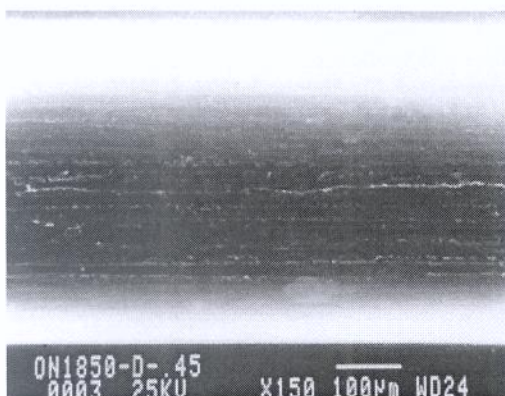


(150 x)



(400 x)

Figura 4 – Qualidade superficial do fio Ø 0,45 mm - encruado
óleo Honilo 171 – fieira 3

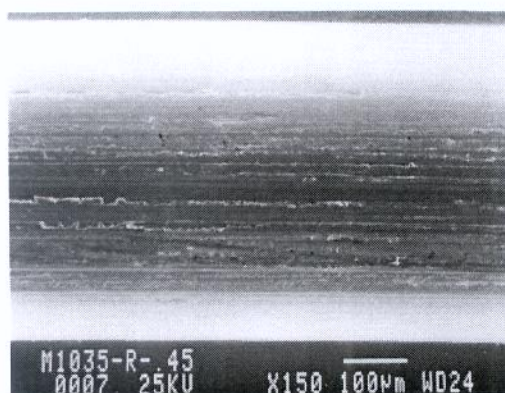


(150 x)

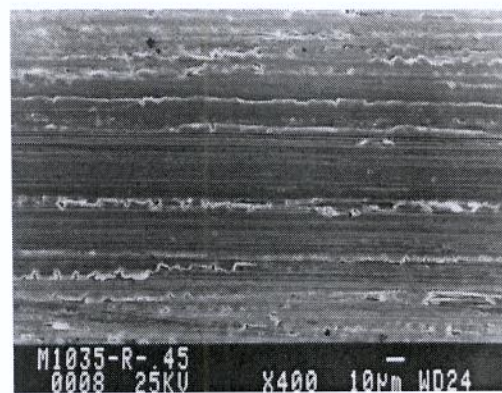


(400 x)

Figura 5 – Qualidade superficial do fio Ø 0,45 mm - encruado
óleo Honilo 171 – fieira 9



(150 x)

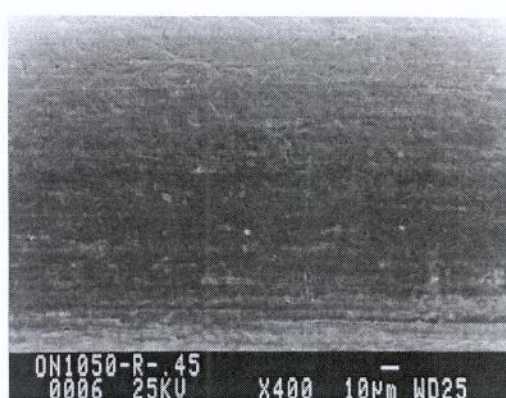


(400 x)

Figura 6 – Qualidade superficial do fio Ø 0,45 mm - encruado
óleo MJF 5 – fieira 2

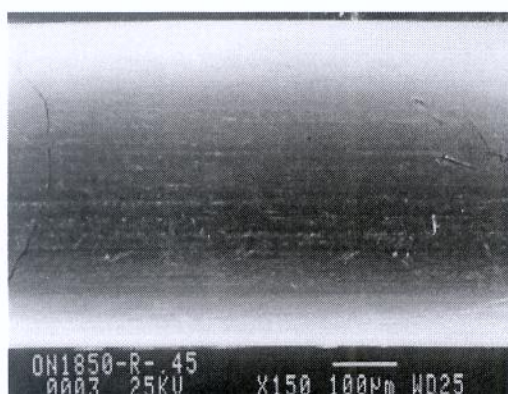


(150 x)



(400 x)

Figura 7 – Qualidade superficial do fio Ø 0,45 mm - recozido
óleo Honilo 171 – fieira 3

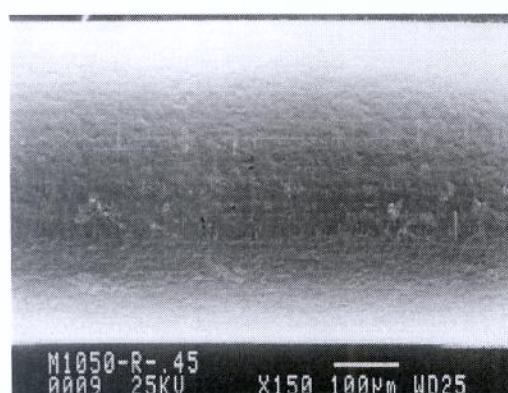


(150 x)



(400 x)

Figura 8 – Qualidade superficial do fio Ø 0,45 mm - recozido
óleo Honilo 171 – fieira 9

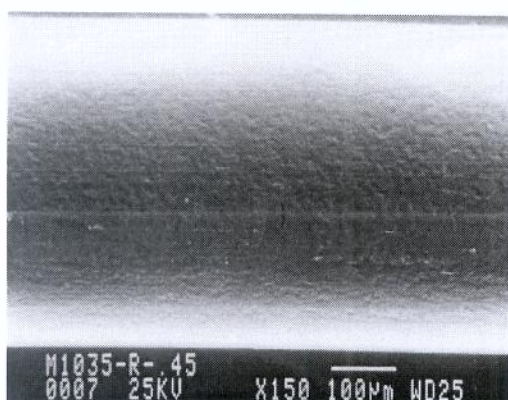


(150 x)

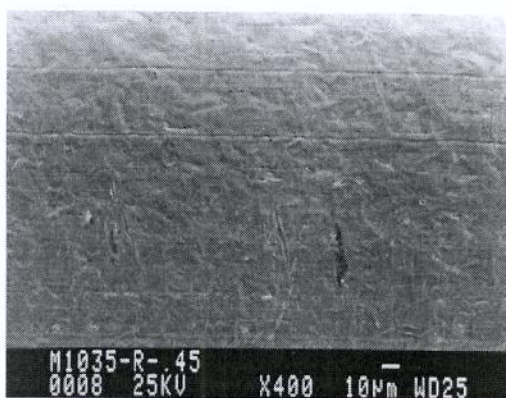


(400 x)

Figura 9 – Qualidade superficial do fio Ø 0,45 mm - recozido
óleo MJF 5 – fieira 3



(150 x)



(400 x)

Figura 10 – Qualidade superficial do fio Ø 0,45 mm - recozido
óleo MJF 5 – fieira 2