

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

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA POR Gustavo Aristides
Santana Martinez E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 09/09/93.

Sérgio Tonini Button

ORIENTADOR

*OTIMIZAÇÃO DA VELOCIDADE DE TREFILAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL
AUSTENÍTICO ABNT 304.*

Autor : Eng^o. Gustavo Aristides Santana [Martinez. 366
Orientador : Prof. Dr. Sérgio Tonini [Button t

Dissertação apresentada à Comissão de Pós-Graduação da
Faculdade de Engenharia Mecânica, como parte dos requisitos
para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

CAMPINAS
SETEMBRO de 1993.

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

Dissertação de Mestrado

Título da Dissertação: Otimização da velocidade de trefilação do aço inoxidável austenítico
ABNT 304.

Autor: Gustavo Aristides Santana Martinez.

Orientador: Prof. Dr Sérgio Tonini Button.

Aprovado por:

Sérgio Tonini Button

Prof. Dr. Sérgio Tonini Button (Presidente).

Cecília Amélia Carvalho Zavaglia

Prof^a. Dr. Cecília Amélia Carvalho Zavaglia.

João Manuel Domingos de Almeida Rollo

Prof. Dr. João Manuel Domingos de Almeida Rollo.

À
Gloria mãe e
profissional exemplar.

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, pelo empréstimo de diversos equipamentos sem os quais este trabalho não seria possível.

À Rosângela da Silva do DPM-FEM-UNICAMP pelo apoio técnico.

Ao Prof. Auteliano Antunes dos Santos Jr. do DPM-FEM-UNICAMP.

Aos Srs. Laerte e José da oficina mecânica do DEMa-FEM-UNICAMP, pela confecção de inúmeros elementos mecânicos para a realização deste trabalho.

Ao amigo Ângelo Caporalli Filho do DEMa-FEM-UNICAMP pelas sugestões e auxílio na parte experimental deste trabalho.

Aos Professores e funcionários do DEMa-FEM-UNICAMP.

Às empresas: Durlait, Inbra, Niehoff, Quality Dies, Sandinox, Salstron e Sandvik-Villares

Aos demais colegas do DEMa e DPM-FEM-UNICAMP, pela amizade.

Ao CNPq pela concessão de bolsa.

ABSTRACT.

This work presents a study on the wire drawing speed improvement with different die geometries and two types of lubricants.

The influence of different die geometries on austenitic stainless steel AISI 304 wire drawing force was also analyzed.

Dies with bell angles of 10, 14 and 18° and bearing lengths of 20, 35 and 50 % of the final diameter were used.

The influence of high drawing speeds was studied also. The friction coefficient in wire drawing was also evaluated.

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo da otimização da velocidade de trefilação com diferentes geometrias de feiras e dois tipos de lubrificantes.

Também é analisada a influência da geometria da feira sobre a força de trefilação do aço inoxidável austenítico ABNT 304.

Foram usadas feiras com ângulo de trabalho de 10, 14 e 18° e região cilíndrica de calibração com 20, 35 e 50 % do diâmetro final.

Foi também estudada a influência da velocidade, assim como o coeficiente de atrito no processo de trefilação de fios.

ÍNDICE.

	página
Capítulo I - Objetivos e Justificativas.	
I.1 - Objetivos	01
I.2 - Justificativas	01
Capítulo II - Aços Inoxidáveis.	
II.1 - Introdução	03
II.2 - Aços inoxidáveis	04
II.3 - Influência dos elementos de liga	08
II.3.1 - Cromo	08
II.3.2 - Níquel	08
II.3.3 - Carbono	11
II.4 - Aços inoxidáveis austeníticos	12
II.5 - Características e utilização do aço inoxidável austenítico ABNT 304	16
II.6 - Referências bibliográficas.	19
Capítulo III - Trefilação do Aço Inoxidável.	
III.1 - Definição	20
III.2 - Histórico	20
III.3 - Fio - máquina	20
III.4 - Recozimento	21
III.5 - Decapagem	24
III.6 - Lubrificação	27
III.6.1 - Lubrificantes sólidos	31
III.6.2 - Lubrificantes líquidos	32
III.7 - Fieiras	33
III.7.1 - Ângulo de trabalho	35
III.7.2 - Cilindro de calibração	38
III.8 - Trefilação do aço inoxidável austenítico ABNT 304.	40
III.9 - Referências bibliográficas	42

Capítulo IV - Procedimentos Experimentais.	
IV.1 - Introdução.	44
IV.2 - Ensaio realizados.	44
IV.2.1 - Ensaio com a matéria-prima.	44
IV.2.2 - Ensaio de trefilação	44
IV.2.3 - Ensaio com os produtos.	50
IV.3 - Referência bibliográfica	50
Capítulo V - Resultados e Análise dos Resultados.	
V.1 - Resultados obtidos nos ensaios com matéria-prima.	51
V.2 - Resultados obtidos nos ensaios de trefilação.	51
V.3 - Resultados obtidos nos ensaios com o produto.	67
Capítulo VI - Conclusões e Trabalhos Futuros.	
VI.1 - Conclusões.	68
VI.2 - Propostas para trabalhos futuros.	68

Capítulo I.

Objetivos e Justificativas.

I.1 - OBJETIVOS.

Este trabalho tem por objetivo principal, a otimização da velocidade de trefilação do aço inoxidável austenítico ABNT 304, através do estudo do regime de lubrificação e de diversas geometrias de fieiras.

Assim, serão estudados alguns parâmetros do processo de trefilação a fim de se obter a máxima velocidade possível, sempre com a perspectiva de:

- . redução no consumo de energia;
- . aumento do grau de utilização das máquinas por unidade de tempo;
- . manutenção da qualidade do produto acabado.

I.2 - JUSTIFICATIVAS.

A realização deste trabalho justifica-se amplamente no contexto da pesquisa em desenvolvimento no Brasil devido à internacionalização do mercado brasileiro onde é de vital importância a utilização de processos com enfoque em produtividade e qualidade.

A transformação a frio por trefilação tem acentuada contribuição pois é por seu intermédio que se pode fabricar produtos acabados com alta precisão dimensional e boa qualidade superficial.

Com a exigência do aumento da produtividade vem atrelado o aumento da velocidade de trefilação sem a perda da qualidade e com manutenção dos baixos custos do processo.

Esta tendência tem proposto um grande número de problemas aos especialistas da área de trefilação, cuja responsabilidade é a de garantir um desempenho satisfatório na operação.

Verifica-se essencialmente alguns problemas decorrentes do aumento da velocidade:

- . o aumento da taxa de produção de calor, que afeta o desempenho do lubrificante, pela redução de sua viscosidade;

- . afetada a viscosidade ocorre uma diminuição na eficiência da separação fio-matriz, que pode ser verificada na prática pela ocorrência de um acabamento brilhante típico da lubrificação limite. Isto acarreta, entre outros, maior força de trefilação e o aumento na energia necessária;
- . tem-se também problemas no acabamento da superfície do produto acabado;
- . a vida da matriz é diminuída, acarretando uma diminuição do comprimento de produto trefilado;
- . também o tempo perdido na troca das matrizes (fieiras) é aumentado, com a elevação do tempo de máquina parada.

No Brasil, os fios são trefilados a velocidades até 50% menores^[GM] do que se atinge no exterior, observando-se assim uma grande diferença de produtividade.

Essa diferença pode ser explicada pela escolha inadequada do tipo de lubrificante empregado na trefilação do aço inoxidável, pela não observância de ângulos apropriados e pela não utilização de alguns princípios operacionais, como por exemplo, o uso de lubrificação forçada na fieira.

A análise do processo será efetuada, realizando-se ensaios com lubrificantes de diversas viscosidades, e fieiras com diferentes ângulos e cilindros de calibração.

^{GM} Comunicação pessoal, 1992/1993.

Capítulo II.

Aços Inoxidáveis.

II.1 - INTRODUÇÃO.

Aços-carbono e aços de baixa liga em contato com o ar úmido sofrem oxidação deteriorando-se em intervalos de tempo relativamente curtos. Embora possam ser protegidos por uma camada superficial, normalmente tinta ou um revestimento de borracha, plástico ou metal de maior resistência, são de uso restrito em processos industriais em que as condições de trabalho são mais agressivas, exigindo materiais com maior resistência à corrosão.

Para satisfazer estas necessidades, foram desenvolvidos os aços inoxidáveis (chamados de aços de alta liga). Streicher apud Padilha [1] apresenta algumas fases do desenvolvimento dos aços inoxidáveis, como mostrado a seguir.

O cromo (Cr) é o elemento fundamental dos aços inoxidáveis e, foi primeiramente isolado a partir da crocoita ($PbCrO_4$) conhecida na época como chumbo vermelho da Sibéria. Em 1797 o francês L. N. Vauquelin produziu ácido crômico a partir da crocoita reagindo com carbonato de potássio para remover o chumbo e, posteriormente, reduziu o ácido crômico aquecendo-o com carbono (C) em cadinho de grafita. Como o resultado era colorido denominou o novo metal "chrome". Em 1798, o alemão T. Lowitz isolou a cromita ($FeCr_2O_4$) que é hoje a principal fonte de cromo.

Em 1821, o francês P. Berthier constatou que quando se adicionava cromo (1 a 1,5%) ao ferro este tornava-se mais resistente ao ataque de ácidos e que esta resistência aumentava com o aumento do teor de cromo. O francês A.M. Portevin publica em 1909 um estudo sobre aços martensíticos e ferríticos. Em 1911, P. Monnartz publica seu trabalho "Estudo das ligas ferro-cromo, com ênfase na sua resistência ao ataque por ácidos". Este trabalho mostrou com clareza que a partir de aproximadamente 12% de cromo, os aços tornam-se resistentes à corrosão em ácido nítrico e em uma série de outros meios corrosivos.

Segundo Colombier e Hochmann [2] a paternidade dos aços inoxidáveis, assim como a data do seu aparecimento, são muito discutidos e deram lugar a célebres processos. Sua aparição industrial realiza-se simultaneamente em vários países:

- . na Inglaterra, Brearley anuncia em 1913 a boa resistência à corrosão dos aços que contém de 9 a 16% de cromo;
- . nos Estados Unidos, quase que simultaneamente, Elwood Haynes, que havia estudado as ligas cobalto-cromo e cobalto-cromo-tungstênio, menciona sua notável resistência à corrosão, mesmo após a adição de ferro, mas com a condição que contenha no mínimo 10% de cromo e 5% de cobalto;
- . na Alemanha, Straus e Maurer indicam, num informe de 1914, as propriedades de resistência à oxidação e aos ácidos, de aços que contém uma quantidade considerável de cromo e níquel;
- . na França, em 1917 e 1918 foi patenteado, em consequência dos trabalhos de Chevenard no laboratório de Imphy, os aços que continham 10-15% de cromo e 20-40% de níquel.

A Krupp foi a primeira a comercializar aços inoxidáveis. Até 1914, já havia fornecido 14 toneladas. A Thomas Firth & Sons Ltd., de Sheffield produziu cerca de 50 toneladas de aço martensítico em 1914. Em 1920 a Brown Bayley's Steel Works Ltd. de Sheffield produziu 5 toneladas de aço inoxidável ferrítico com 11,7% de cromo e 0,07% de carbono.

Em julho de 1958 Goran Fredrik Goransson utilizou pela primeira vez o método inventado pelo inglês Henry Bessemer. Os testes foram efetuados por Goransson na localidade de Edsken, Suécia.

O impacto da descoberta dos aços inoxidáveis pode ser notada pelos números da produção anual:

1934 - 56.000 ton.

1953 - aproximadamente 1.000.000 ton.

1985 - aproximadamente 5.130.000 ton.

Da produção total de aço inoxidável de 1985 cerca de dois terços eram de aços inoxidáveis austeníticos.

Com o seu crescente sucesso, surgiram em todo o mundo numerosas patentes relativas a composições e tratamentos, dentro de normas padronizadas e internacionalmente divulgadas.

II.2 - AÇOS INOXIDÁVEIS.

Quando o aço está passivado, o que significa que a dissolução anódica do metal - corrosão - está inibida, a superfície do aço acha-se coberta por uma fina, porém densa

película de óxido, a qual é constituída de cromo (Cr), ferro (Fe) e oxigênio. Esta película de óxido protege o material agindo como uma barreira ao meio agressivo e, desde que o suprimento de oxigênio permaneça adequado, a película será refeita caso seja danificada.

Um aço só pode ser passivado em potenciais razoavelmente baixos quando possui um teor de cromo da ordem de 12% e, neste caso, é então denominado inoxidável [2].

Os aços inoxidáveis constituem uma família muito grande de ligas metálicas. A classificação deve ser feita pela microestrutura. Os aços inoxidáveis podem ser divididos em três grupos principais:

- a. Aços ferríticos - são aqueles que contem de 16 a 30% de cromo (tabela II.2.1) . O conteúdo de carbono deve ser baixíssimo nos aços que contêm pouco cromo, mas pode chegar a até 0,35% quando a porcentagem de cromo é de 30%. Estes aços não têm ponto de transformação e, por conseguinte, não endurecem por tratamento térmico ou atingem uma dureza pouco elevada. Além disso, são sensíveis ao crescimento de grãos a altas temperaturas onde experimentam certas formas de fragilidade.

Tabela II.2.1 - Aços inoxidáveis ferríticos [3].

Composição química (%).				
AISI	Cmáx.	Mn	Cr	Outros
430	0,08	1,00	16,0 -18,0	
430 F	0,12	1,25	16,0 -18,0	0,60 Mo máx.
430 F Se	0,12	1,25	16,0 -18,0	0,15 Se mín.
446	0,20	1,50	23,0 -27,0	0,25 N máx.
CCC, magnético, não endurecível por tratamento térmico.				

- b. Aços martensíticos - são aqueles que contêm de 12 a 17% de cromo e de 0,1 a 0,5% de carbono (em certos casos até 1% de carbono) e que tratados termicamente podem adquirir dureza elevada. Raramente, contêm outros elementos de adição, salvo, às vezes, silício no caso de aços que devem resistir à oxidação em altas temperaturas, e níquel para conservar sua temperatura quando o conteúdo de cromo é alto (tabela II.2.2).

Tabela II.2.2 - Aços inoxidáveis martensíticos [3].

Composição química (%).					
AISI	C	Mn	Cr	Ni	Outros
403	0,15 máx	1,0	11,5 -13	--	--
410	0,15 máx	1,0	11,5 -13	--	--
416	0,15 máx	1,2	12 -14	--	0,15S mín
420	0,15 mín	1,0	12 -14	--	--
431	0,20 máx	1,0	15 -17	1,2-2,5	--
440 A	0,60-0,75	1,0	16 -18	--	0,75Mo máx
440 B	0,75-0,95	1,0	16 -18	--	0,75Mo máx
440 C	0,95-1,20	1,0	16 -18	--	0,75Mo máx
CCC, magnético, endurecível por tratamento térmico.					

c. Aços austeníticos - são aços ao cromo-níquel e contêm normalmente adições de outros elementos. Sua composição está "equilibrada" para que conservem uma estrutura perfeitamente austenítica à temperatura ambiente. A base desses aços é uma composição com 18% de cromo e 8% de níquel, mas existem os que contêm até 35-40% de níquel. Muitos desses aços são sensíveis à corrosão intergranular, caso não tenham recebido um tratamento térmico estabilizador ou quando sua composição não seja adequada (tabelas II.2.3 e II.2.4).

Tabela II.2.3 - Aços inoxidáveis austeníticos - família 200 [3].

Composição química (%).					
ABNT	C	Mn	Cr	Ni	Outros
201	0,15 máx.	7,5	16-18	3,5-5,5	0,25 N máx.
202	0,15 máx.	10,0	17-19	4,0-6,0	0,25 N máx.
CFC, não-magnético, não endurecível por tratamento térmico.					

Tabela II.2.4 - Aços inoxidáveis austeníticos - família 300 [3].

Composição química.					
ABNT	C	Mn	Cr	Ni	Outros
301	0,15 máx.	2,0	16-18	6-8	
302	0,15 máx.	2,0	17-19	8-10	
304	0,08 máx.	2,0	18-20	8-12	
304L	0,03 máx.	2,0	18-20	8-12	
309	0,20 máx.	2,0	22-24	12-15	
310	0,25 máx.	2,0	24-26	19-22	
316	0,08 máx.	2,0	16-18	10-14	2 - 3 Mo
316L	0,03 máx.	2,0	16-18	10-14	2 - 3 Mo
321	0,08 máx.	2,0	17-19	9-12	(5 x %C)Ti mín.
347	0,08 máx.	2,0	17-19	9-13	(10 x %C)Cb-Ta mín.
CFC, não-magnético, não endurecível por tratamento térmico.					

Os aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos são essencialmente ligas de ferro-cromo, e os austeníticos compreendem as ligas ferro-cromo-níquel.

A composição básica desses aços sempre inclui silício e manganês, junto com pequenas quantidades de elementos residuais ou impurezas, que são o carbono, fósforo e enxofre.

Ligando-se o aço inoxidável com outros elementos, como por exemplo molibdênio, titânio, nióbio, cobre e nitrogênio, pode-se obter um material com propriedades específicas para uma dada aplicação em particular. A estrutura do aço inoxidável pode ser controlada por um balanceamento cuidadoso do seu teor de elemento de liga.

Há uma distinção entre os elementos de liga quanto ao fato de serem estabilizadores de ferrita ou de austenita.

Elementos como:

Cr] Favorecem o desenvolvimento da estrutura ferrítica. São elementos Alfacênicos.
Mo	
Si	
Nb	
C] Favorecem o desenvolvimento da estrutura austenítica. São elementos Gamagênicos.
Ni	
Mn	
N	
Cu	

II.3 - INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA

Para entender as mudanças provocadas nas propriedades dos aços inoxidáveis é apropriado verificar-se o efeito dos três principais elementos de liga [2][4] :

II.3.1. Cromo.

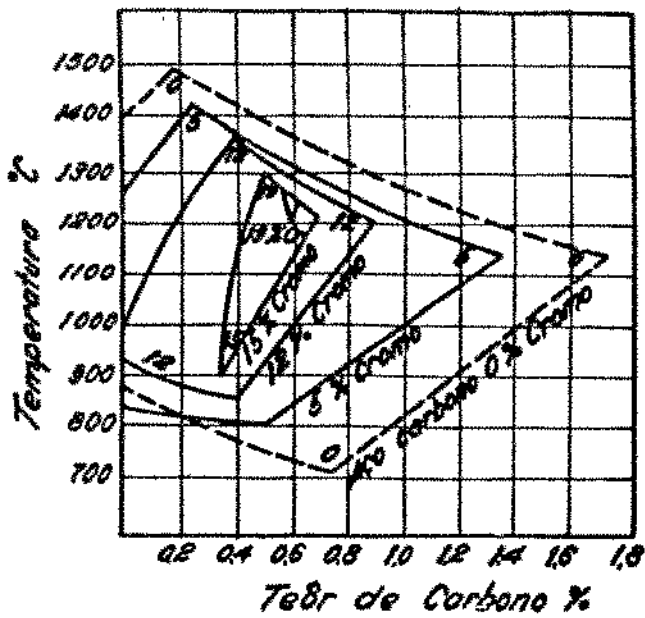
O cromo é o elemento essencial, podendo-se dizer que a ciência dos aços inoxidáveis é a ciência do cromo como elemento de liga do ferro. O teor de cromo é sempre maior que 12% nos inoxidáveis. O cromo faz parte dos elementos alfacênicos, isto é, que aumenta o campo do ferro alfa e diminui o campo da austenita (figuras II.3.1, II.3.2 e II.3.3).

Melhora a resistência à corrosão por pite e por fresta, aumenta a temperabilidade e abaixa a temperatura de transformação martensítica. Aumenta a resistência ao amolecimento no revenido e o endurecimento secundário pela precipitação de carbonetos de cromo.

II.3.2. Níquel.

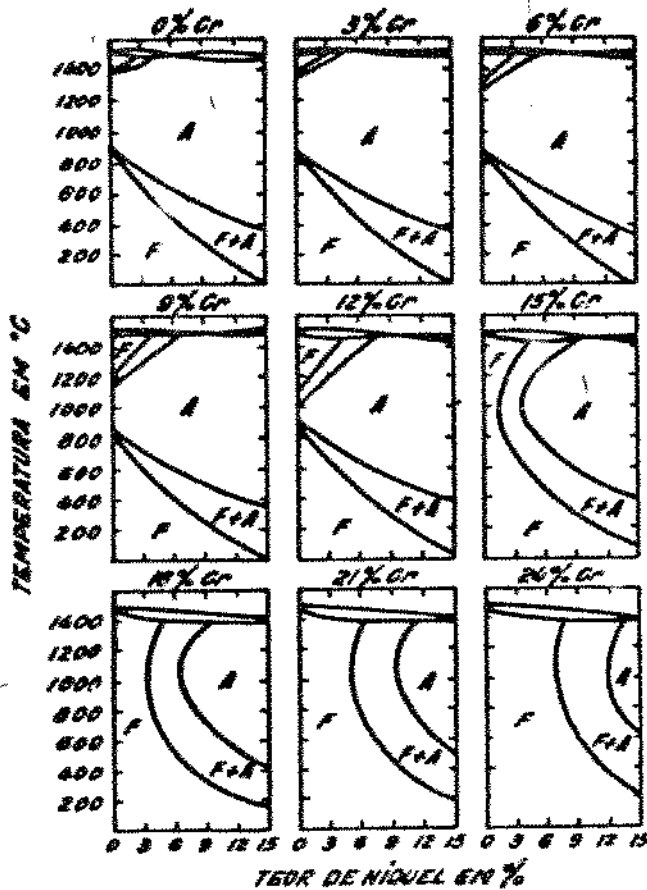
A adição de níquel complementa o efeito de proteção conferido pelo cromo em condições oxidantes e aumenta também a resistência à corrosão em condições redutoras. No diagrama da figura II.3.4 vê-se a influência do teor de níquel sobre a constituição de uma liga com 18% de cromo e do cromo sobre uma liga com 18% de níquel.

O níquel favorece a formação da austenita e a sua estabilização até a temperatura ambiente e, portanto, é um dos elementos de adição sempre presentes na classe dos inoxidáveis austeníticos. A prática em serviço tem mostrado que um conteúdo de Ni de aproximadamente 25% é suficiente para tornar o aço fortemente resistente à corrosão sob tensão fraturante.



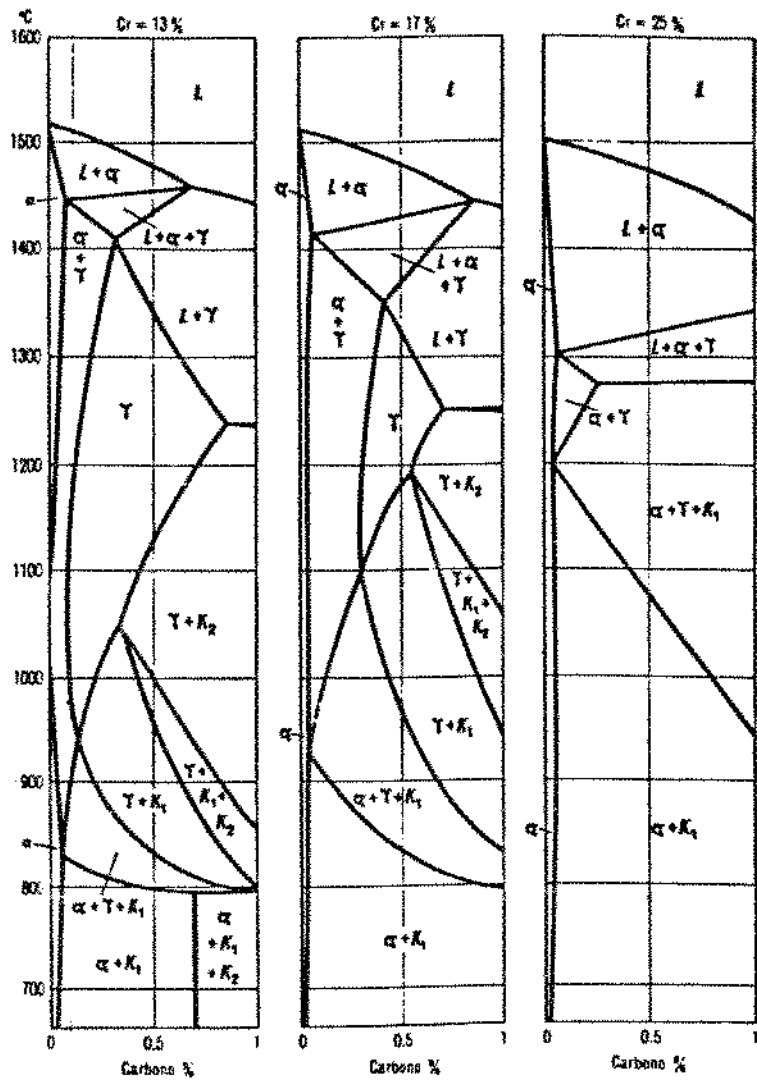
À medida que o teor de Cr aumenta:
 0 % → 5 % → 12 % → 15 % → 19 %
 a faixa austenítica diminui, até
 cerca de 20 % de Cr.

Figura II.3.1 - Efeito do teor de Cr sobre o campo austenítico [5]



Revela a mudança gradual que
 sofrem as fases, à medida que
 se adiciona cromo.

Figura II.3.2 - Secções uniformes dos diagramas Fe-Cr-Ni com vários teores de cromo [5].



Redução do campo gama puro (γ). As zonas alfa (α) e alfa + gama ($\alpha + \gamma$) aumentam.

Figura II.3.3 - Diagrama Fe-C com diferentes % de Cr [2].

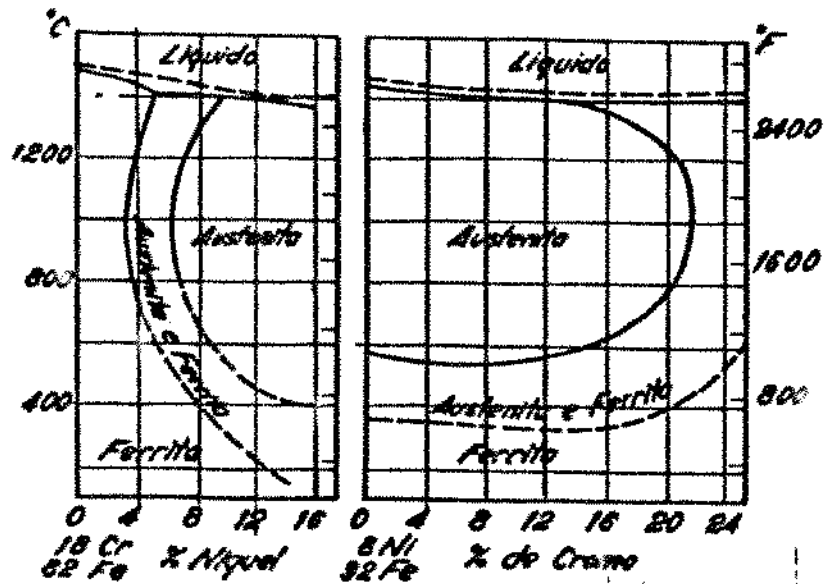


Figura II.3.4 - Efeito do Ni (à esquerda) sobre a constituição de uma liga com 18% de Cr e do Cr (à direita) sobre uma liga com 8 % de Ni [5].

II.3.3. Carbono.

O carbono é uma impureza. Na figura II.3.5 (a,b e c) é apresentada a influência do carbono nas ligas ferro-cromo. Pode-se notar o aumento de gama (γ) devido ao carbono e o desaparecimento, a partir de 0,1 % carbono, da fase alfa pura (α) e, por outro lado o aparecimento dos carbonetos: $K_1 \rightarrow M_{23}C_6$ e $K_2 \rightarrow M_7C_3$.

O carbono, ao lado do níquel, do manganês e principalmente do nitrogênio são elementos gamagênicos, isto é, formadores de austenita. Portanto, nos aços inoxidáveis ferríticos os teores adicionados são baixos (C aproximadamente 0,15 %). Por outro lado, o efeito austenizante é usado nas composições dos inoxidáveis martensíticos, onde o teor de carbono é maior que 0,15%. O carbono desempenha papel importante para localizar um aço de alto cromo na classe martensítica ou ferrítica. A resistência à corrosão é diminuída levemente quando o carbono está dissolvido, mas é consideravelmente reduzida quando ele aparece como carbonetos precipitados nos contornos de grãos. A precipitação de carbonetos em contornos de grão, que ocorre com maior intensidade nos inoxidáveis austeníticos, é denominada sensibilização e prejudica muito à resistência a corrosão.

Em geral, nos aços inoxidáveis austeníticos, o teor de carbono deve ser

mantido o mais baixo possível, dentro do aconselhável pelas condições de trabalho do material. Os aços austeníticos com teor de carbono baixo são, porém mais caros porque apresentam dificuldades para obtenção.

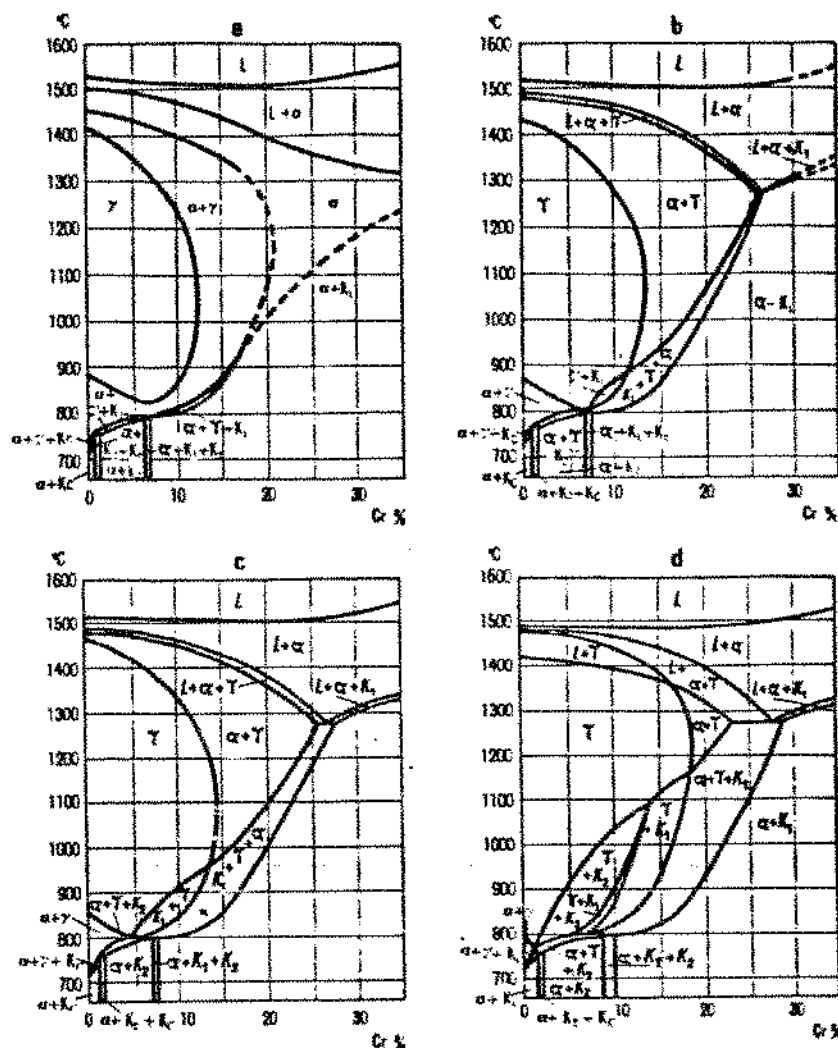


Figura II.3.5 - diagrama Fe-Cr com diferentes porcentagens de C [2].

a = 0,05 % C b = 0,1 % C c = 0,2 % C d = 0,4 % C

II.4 - AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS.

Os aços austeníticos (tabela II.4.1) reúnem uma alta resistência à tração com uma ductilidade excepcionalmente elevada e possuem a maior resistência à corrosão de todos os aços inoxidáveis.

Tabela II.4.1 - Composição química dos aços Villares.

ABNT	C máx.	Cr	Ni	S mín.	Mo
302	0,15	17,5	8,3	----	----
303	0,15	17,5	8,5	0,15	----
304	0,08	18,3	8,5	----	----
304 L	0,03	19,0	10,0	----	----
310	0,25	25,0	20,0	----	----
316	0,08	16,5	11,0	----	2,2
316 L	0,03	17,0	12,0	----	2,2

Os elementos de liga tem fundamental importância nas características mecânicas destes aços como pode ser visto nas tabelas II.4.2 e 3.

Tabela II.4.2 - Influência do conteúdo de carbono nas características dos aços tipo 18-8 [2].
Tratamento: 1150°C e resfriamento em água.

Carbono (%)	Limite elástico 0,2% (MPa)	σ_t (MPa)
0,020	176,4	588,9
0,065	249,9	627,2
0,140	303,8	705,6
0,210	333,2	744,8
0,305	357,7	796,7

Tabela II.4.3 - Influência do conteúdo de níquel, tungstênio e molibdênio nas características dos aços austeníticos [2] .

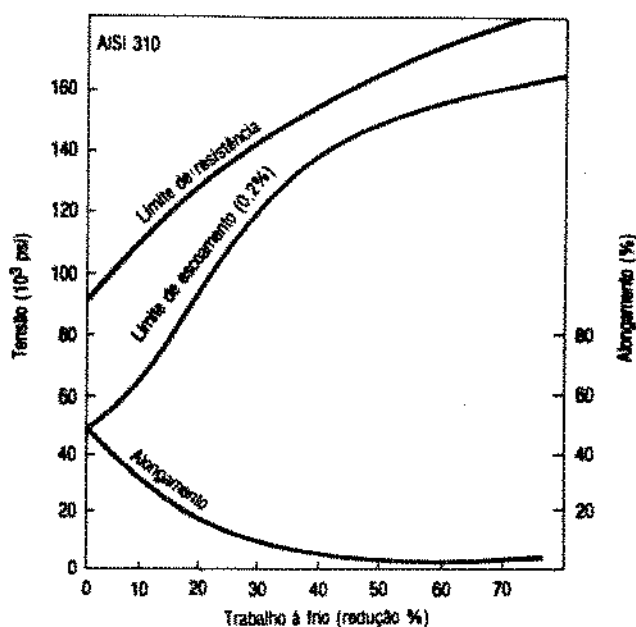
C %	Cr %	Ni %	W %	Mo %	σ_t MPa	Alongamento %
0,275	18, 5	7,9	3, 9	---	833,0	42,5
0,380	12, 8	13, 2	2, 3	---	813,4	41,0
0,410	11, 8	34, 4	2, 9	---	774,2	35,6
0,315	18, 2	7,9	---	4,2	901,6	40,0

Os aços austeníticos podem ser endurecidos pelo trabalho a frio, característica muito

útil em aplicações onde a redução de peso é fator importante, tais como a construção de aviões e trens ferroviários.

A alta plasticidade e a capacidade de encruamento dos aços austeníticos, permite que estes sejam trabalhados a frio até atingir-se valores excepcionais de limite de escoamento e resistência, como mostra a figura II.4.1.

Com a transformação a frio consegue-se melhorar o limite de resistência e o limite elástico, mas os aços tornam-se ligeiramente magnéticos por causa da transformação de parte da austenita em martensita [4], denominando-se aços inoxidáveis austeníticos metaestáveis [6].



$$10^3 \text{ psi} \approx 6,9 \text{ MPa}$$

Figura II.4.1 - Propriedades do aço inoxidável ABNT 310 encruado [6].

Os aços inoxidáveis austeníticos podem ser classificados em dois grupos dependendo da estabilidade da austenita em condições de deformação:

- os que não formam martensita mesmo após considerável deformação plástica e, por isso chamados de estáveis. Como exemplo tem-se o ABNT 310;
- os que apresentam formação de martensita após alguma deformação, e por isso, chamados metaestáveis. Como exemplo tem-se o ABNT 302.

Numa classificação mais abrangente, e mais comum, tem-se [7]:

- . básico 18-8 : ABNT 302 e 304;
- . metaestável : ABNT 301;
- . alto níquel : ABNT 305;
- . alta resistência à corrosão : ABNT 316 e 317;
- . estabilizados : ABNT 321, 347 e 348;
- . extra baixo carbono : ABNT 304L e 316L;
- . para soldagem : ABNT 308 e 309;
- . resistente à oxidação : ABNT 302B, 308, 309, 310 e 314;
- . para usinagem : ABNT 303 e 303Se.

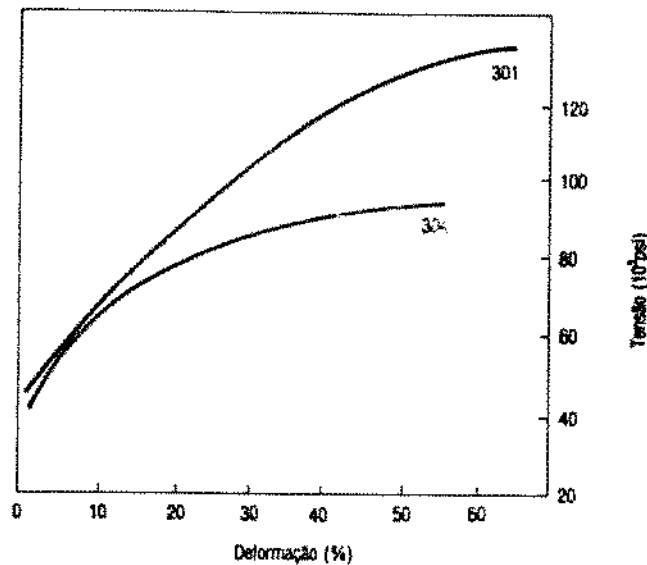
A resistência mecânica dos aços austeníticos melhorada pela deformação plástica a frio, em alguns casos pode ser inaceitável.

Nesses casos, os aços austeníticos são tratados termicamente antes do fornecimento, a fim de conduzir sua resistência mecânica a um nível aceitável. Esse tratamento ocorre normalmente a temperaturas entre 1000 e 1100 °C, seguidos de um rápido resfriamento para se evitar a precipitação de carbonetos nos contornos dos grãos.

O grau de endurecimento por trabalho a frio depende em parte do grau de deformação e em parte da composição do aço. Se o aço foi fabricado de tal modo que os elementos estabilizadores da austenita se equilibram exatamente com elementos estabilizadores da ferrita, durante o resfriamento rápido após o recozimento, diz-se que o aço tem baixa estabilidade da austenita, porque durante o trabalho a frio a austenita será convertida parcialmente ou totalmente em uma fase muito dura, conhecida como martensita de deformação. Por esta razão, aços com baixa estabilidade da austenita são utilizados, entre outras aplicações, para molas (ex.: ABNT 302).

Após uma operação de trabalho a frio que corresponda a 80% de redução de área, estes aços podem alcançar uma resistência à tração superior a 1960 MPa.

O tipo ABNT 304, austenítico estável, mostra uma relação parabólica entre deformação e tensão, com o encruamento decrescente com o aumento de deformação (figura II.4.2). No caso do tipo ABNT 301, metaestável, após 10 a 15% de deformação ocorre um encruamento acelerado, associado à formação de martensita induzida por deformação.



$$10^3 \text{psi} \cong 6,9 \text{ MPa}$$

Figura II.4.2 - Curva tensão-deformação de aços inoxidáveis austeníticos [6].

II.5 - CARACTERÍSTICAS E UTILIZAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO ABNT 304.

O aço ABNT 304 é um aço inoxidável austenítico básico 18-8 com teor de carbono máximo de 0,08 %, com aproximadamente 18 % de cromo e 8 % de níquel.

Sua alta plasticidade permite a transformação a frio e, sua capacidade de encruamento eleva a resistência mecânica.

Estas características permitem uma larga utilização dentro dos mais variados tipos de indústria.

Normalmente o aço ABNT 304 é utilizado na fabricação de [8]:

- diversos tipos de mola;
- parafusos, rebites, pregos, pinos, porcas e produtos semelhantes;
- telas, comumente utilizados como elemento filtrante;
- cabos para navegação, aeronáutica e outros;
- peças ou revestimentos decorativos de arquitetura.

Nas tabelas a seguir encontram-se algumas características relativas ao aço inoxidável

austenítico ABNT 304.

Tabela II.5.1 - Composição química do aço ABNT 304 (%) [4].

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0,08 máx.	1,00 máx.	2,00 máx.	0,045 máx.	0,030 máx.	18,0 a 20,0	8,0 a 10,5

Tabela II.5.2 - Propriedades em tração à temperatura ambiente de arames estirados a frio [2].

Estado	Diâmetro mm	Limite elástico 0,2% MPa	σ_t MPa
1/4 Duro	0,05-0,50	755-1100	960-1245
	0,51-3,20	685-895	960-1180
	3,21-9,50	620-755	825-960
1/2 Duro	0,05-0,50	1180-2450	1245-1520
	0,51-3,20	865-1345	1180-1520
	3,21-9,50	825-960	1030-1180
3/4 Duro	0,05-0,50	1550-1895	1690-2030
	0,51-3,20	1180-1725	1315-1865
	3,21-9,50	960-1180	1180-1385
Duro	0,05-0,50	1825-2345	1865-2415
	0,51-3,20	1315-1795	1520-2000
	3,21-9,50	1180-1450	1385-1650

Tabela II.5.3 - Propriedades em tração à temperatura ambiente de arames recozidos [2].

Diâmetro mm	σ_t MPa	Limite elástico 0,2% MPa	Alongamento (L=50 mm) %	Dureza HRB
0,05-0,50	685-960	275-520	30-55	85 máx.
0,51-3,20	660-795	275-410	35-55	85 máx.
3,21-9,50	620-725	245-385	25-55	85 máx.

Figura II.5.4 - Sugestão de tratamento de alívio de tensão [7].

Ambiente de trabalho ou outra razão para tratamento	ABNT 304
Corrosão moderada Corrosão branda Corrosão intergranular Alívio de tensão após deformação Alívio entre operação de deformação Estrutura perfeita	recozer entre 1065 °C e 1120 °C resfriar
Corrosão branda	alívio de tensão abaixo de 480 °C resfriamento lento
Estabilidade dimensional	alívio de tensão entre 205 e 480 °C resfriamento lento

II.6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] - Padilha, A.F., "Algumas Observações sobre o Descobrimento e o Desenvolvimento dos Aços Inoxidáveis" - I S.B.A.I. - 1989 - p.3-11.
- [2] - Colombier, R.; Hochmam, J., "Acero Inoxidables Aceros Refratarios", Ed. Urmo Espanha - 1965.
- [3] - Peckner, D.; Bernstein, I.M., "Handbook of Stainless Steels", Mc Graw-Hill USA - 1977
- [4] - Zabala, Adrian I., "Aceros Inoxidables y Aceros Resistentes al Calor", Ed. Limusa México
- [5] - Chiaverini, V., "Aços e Ferros Fundidos" - ABM - 1982 - p.333-358.
- [6] - Mei, Paulo Roberto; Silva, Andre L.C., "Aços e Ligas Especiais", Eletrometal S.P. - 1988
- [7] - Lula, R.A.; Parr, G.; Hanson, A., "Stainless Steel", American Society for Metal USA - 1988.
- [8] - "Stainless Steel Fabrication"- Allegheny Ludlum Steel Corporation - Pa. - USA - 1959.

Capítulo III.

Trefilação do Aço Inoxidável.

III.1 - DEFINIÇÃO.

A trefilação é um processo de conformação a frio no qual o fio metálico é tracionado através de uma ferramenta oca denominada fieira, onde sofre deformação plástica. Em consequência dessa deformação, o diâmetro do fio é reduzido e seu comprimento é aumentado.

A finalidade do processo de trefilação é a obtenção de fios de dimensões, acabamento superficial e propriedades mecânicas controladas [9].

III.2 - HISTÓRICO.

Dove [10] apresenta um breve histórico sobre o aparecimento e desenvolvimento dos arames metálicos, onde constata-se que a trefilação é um dos processos mais antigos de conformação de materiais.

Os adornos de ouro em forma de arame trabalhado foram incorporados aos adornos pessoais dos faraós egípcios quase 3.000 anos antes de Cristo. Rudolph de Nuremberg trouxe para a indústria, em torno do ano de 1350, o primeiro equipamento mecânico de trefilação, que era movido a água. De 1850 a 1870, devido a 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.

III.3 - FIO-MÁQUINA.

A matéria-prima para trefilação, comumente denominado fio-máquina, é o arame laminado a quente que não se fabrica em diâmetros menores que 5,5mm; sendo o diâmetro de

uso mais comum no mercado brasileiro o de 7,94 mm.

A fabricação dos aços inoxidáveis constitui uma das partes mais delicadas da indústria dos aços especiais segundo Colombier [11]. De forma geral, efetua-se em fornos elétricos a arco, salvo no caso de certos tipos muito especiais que se fundem em fornos de indução a ar ou a vácuo, especialmente, quando se quer obter conteúdos baixíssimos de carbono. A estas técnicas somam-se atualmente os fornos de arco a vácuo e os de feixe eletrônico.

A estrutura do fio-máquina inoxidável laminado a quente o torna inadequado para o trabalho a frio, por apresentar:

- a. granulação não-homogênea;
- b. vazios, rechupes, etc;
- c. defeitos superficiais como trincas, riscos, frisos, dobras, etc;

Por outro lado, ao longo das etapas de trefilação (figura III.3.1) o material é encruado, ou seja, sua resistência mecânica cresce à medida em que a redução de área aumenta. Desta forma, em função das características do fio-máquina laminado a quente, das características finais do produto ou da necessidade de uma maior redução de área, faz-se necessário um tratamento térmico de recozimento.

III.4 - RECOZIMENTO.

Durante a trefilação, que é realizada abaixo da temperatura de recristalização, o fio sofre um aumento da sua resistência mecânica e de redução da sua ductilidade, devido à deformação plástica, caracterizando o denominado efeito de encruamento.

Acima de um certo grau de encruamento não é mais possível trabalhar o fio, sendo então necessário, para o prosseguimento do processo de trefilação, a aplicação de um tratamento térmico [12].

Bresciani [9], afirma que o controle das propriedades mecânicas do fio durante o processo de trefilação é muito importante para que este possa ter prosseguimento, sem ruptura do fio, e para que o fio, ao final do processo, apresente as características dimensionais, mecânicas e metalúrgicas exigidas por sua utilização.

O tratamento térmico mencionado, é comumente denominado de recozimento, que pode ser contínuo em fornos contínuos (figura III.4.1.a) ou estacionário em fornos de campânula (figura III.4.1.b) ou poço.

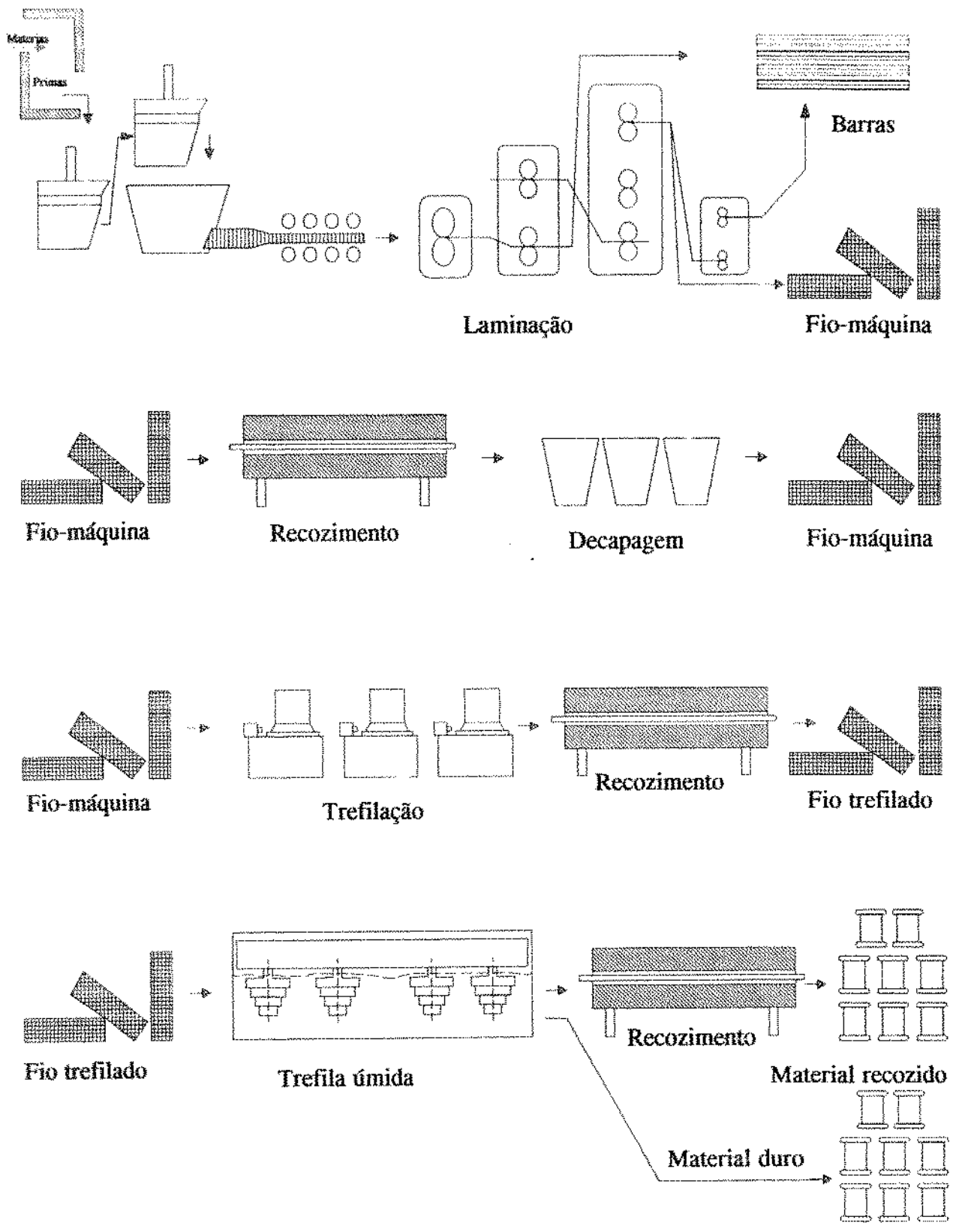


Figura III.3.1 - Seqüência de etapas para processamento de fios trefilados.

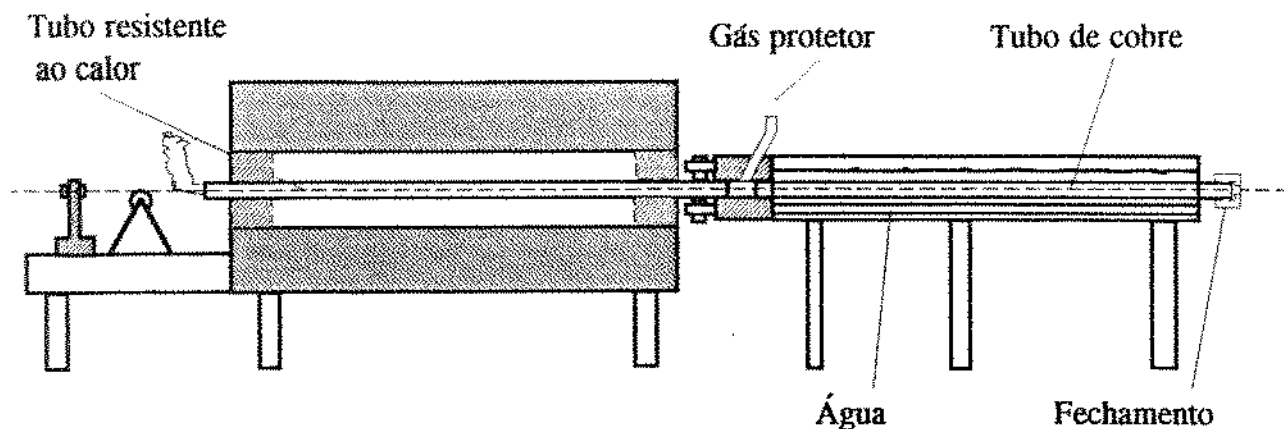


Figura III.4.1.a - Forno de recozimento contínuo.

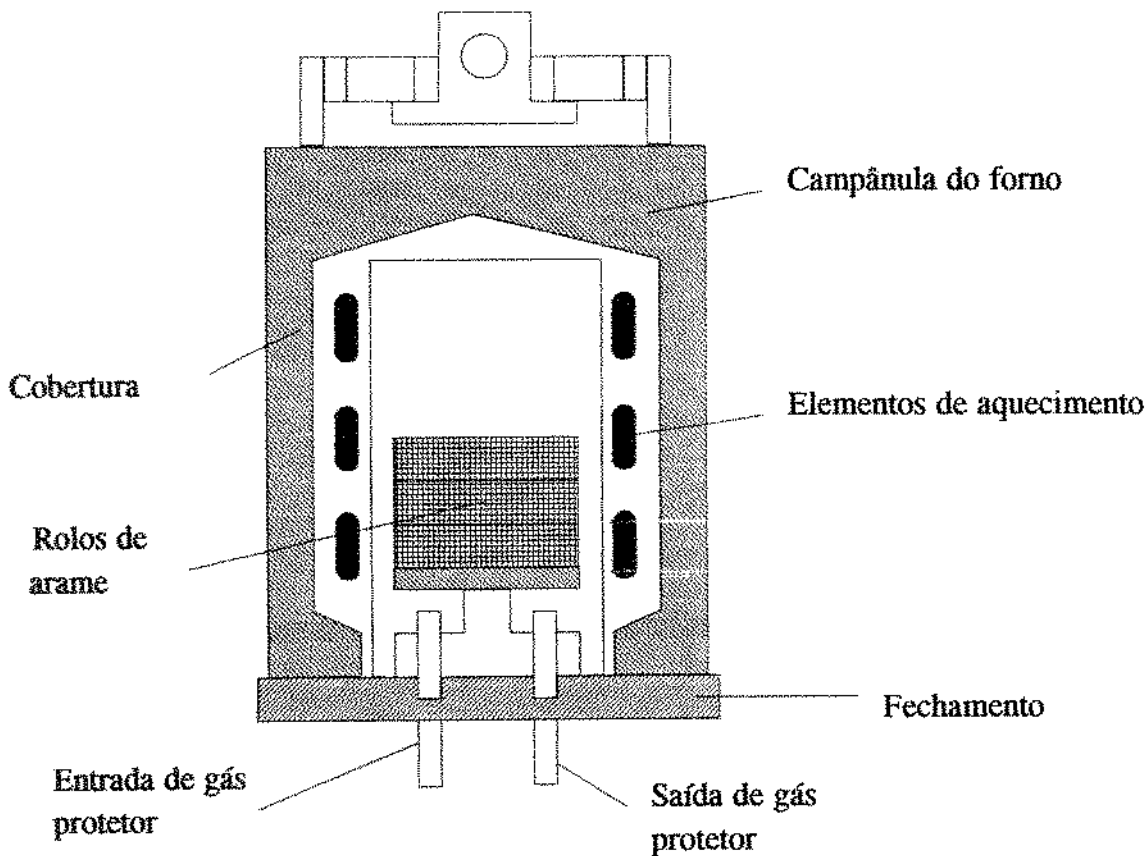


Figura III.4.1.b - Forno de campânula.

Esse tratamento consiste em submeter o arame ou fio-máquina a uma faixa de temperatura de 1065 a 1120 °C [13], durante um tempo determinado, e em seguida resfriar-se bruscamente, visando uniformizar a microestrutura do material e recuperar a ductilidade diminuída ao longo do encruamento sofrido durante a trefilação ou laminação a quente no caso do fio-máquina.

Portanto, a ductilidade é fator primordial, no caso da trefilação, pois é a propriedade

que indica a capacidade do material sofrer grandes deformações permanentes numa determinada direção, sem ocorrer ruptura. Representa a maior ou menor possibilidade do material ser alongado.

Normalmente o recozimento dá-se em fornos de atmosfera protetora isenta de oxigênio ou de outros gases contaminantes.

No caso específico do aço inoxidável utiliza-se normalmente uma mistura de hidrogênio e nitrogênio, na proporção 20 e 80% respectivamente para a família 300 e 60 e 40% para a família 400 [14].

Durante as etapas de recozimento, de laminação a quente ou quando em contato com o ar, 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.

III.5 - DECAPAGEM.

A decapagem é uma etapa geralmente necessária entre as diversas etapas da trefilação e consiste na remoção da camada de óxido da superfície metálica (aço), seja ela resultante do tratamento térmico (carepas), ou de corrosão eletroquímica (ferrugem). A decapagem é realizada pela passagem dos rolos de arame por sistemas mecânicos ou por tanques em meio químico.

A decapagem mecânica consiste no dobramento do material, através de um sistema de roldanas onde a carepa de laminação por ser quebradiça, e não ter o mesmo coeficiente de expansão do aço, quebra-se permitindo a remoção dos óxidos da superfície do material por sopro de ar comprimido. Espera-se que a remoção da carepa de laminação seja da ordem de 90% ou mais. Os óxidos remanescentes devem ser retirados através de decapagem química.

A decapagem química consiste basicamente na imersão contínua ou estacionária do material a ser decapado numa solução de ácido previamente diluído em água, com aquecimento ou não, seguido de lavagem, posterior neutralização e secagem.

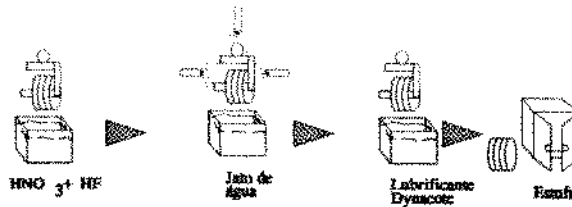
Antecedendo a imersão no ácido é necessário um desengraxe prévio em banhos alcalinos ou solventes orgânicos se o material metálico contiver óleo ou graxa.

Na tabela III.5.1 apresenta-se os banhos mais comuns na trefilação do aço inoxidável e na figura III.5.1 o fluxograma para os mais diversos tipos de decapagem comumente utilizados em trefilação de aço inoxidável.

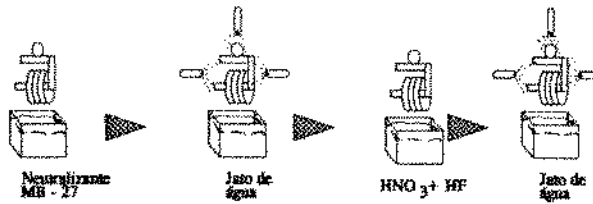
Tabela III.5.1 - Banhos mais comuns na decapagem [15].

Banho desengraxante: (MB-27) temperatura - 80 a 90 °C tempo de imersão - 20 a 30 minutos.
Banho de ácido sulfúrico: temperatura - 60 a 70 °C tempo de imersão - 20 a 30 minutos.
Banho decapante: ácido nítrico temperatura - ambiente tempo de imersão - 5 a 15 minutos (rápida)
Banho decapante: ácido nítrico + fluorídrico temperatura - ambiente tempo de imersão - 1 a 10 minutos (rápida)
Banho de água quente: temperatura - 95 a 100 °C tempo de imersão - 5 a 10 minutos
Banho lubrificante especial: (Dynacote) temperatura - 90 °C tempo de imersão - 5 a 10 minutos.
Estufa para secagem: temperatura - 90 a 100 °C

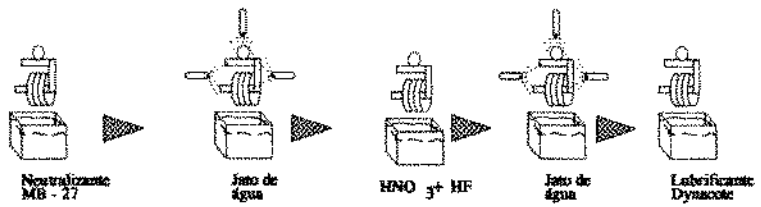
Fio-máquina



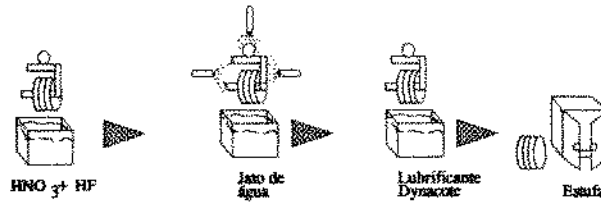
Trefila → forno



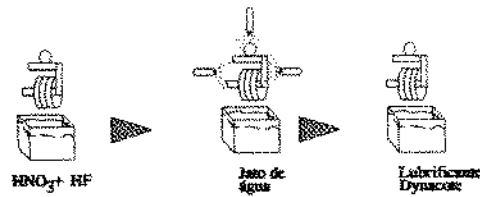
Trefila → Corte de barras



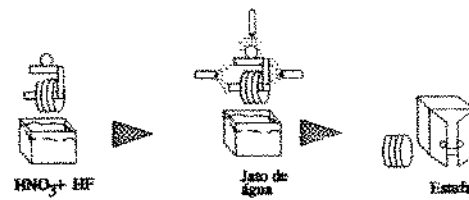
Forno → Trefila



Forno → Corte de barras



Forno → Polimento



Polimento → Corte de barra

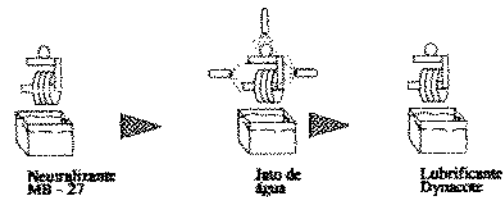


Figura III.5.1 - Fluxograma de decapagem.

III.6 - LUBRIFICAÇÃO.

Dois corpos metálicos em contato direto e em movimento relativo aquecem-se e se desgastam. As superfícies, ainda que cuidadosamente trabalhadas, quando examinadas ao microscópio (figura III.6.1) apresentam-se constituídas de saliências e reentrâncias. Os corpos em contato direto, apoiar-se-ão, conseqüentemente, em apenas parte dessa superfície; os contatos serão localizados e a distribuição de carga em diminutas áreas provocará altas pressões, com deformações plásticas, adesão e solda dos metais [16].

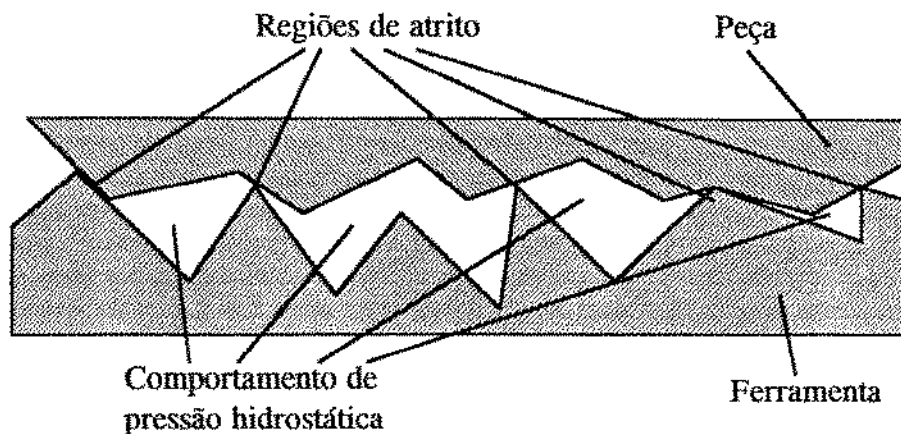


Figura III.6.1 - Representação das superfícies vistas ao microscópio.

Durante o movimento, ocorrerão cisalhamento e arrancamento, com geração de calor e desgaste das superfícies. Além disso, o atrito torna as superfícies reativas, facilitando a corrosão. Sendo ambos os fenômenos indesejáveis, procura-se impedir o contato direto dos dois corpos, interpondo-se entre eles substâncias de pequena resistência ao cisalhamento, denominadas lubrificantes.

Os lubrificantes dividem-se em três grupos: líquidos, pastosos e sólidos.

Qualquer que seja o grupo a que pertença, o lubrificante deve satisfazer às seguintes propriedades:

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

Cetlin [17] confirma a necessidade dessas propriedades, afirmando que as funções de

um lubrificante são múltiplas e complexas, e acrescenta a necessidade de outras propriedades como:

- . diminuir o atrito superficial até valores compatíveis com as necessidades do processo;
- . cumprir a missão dupla de lubrificante e agente refrigerante;
- . manter condições aceitáveis de acabamento superficial e características metalúrgicas dos produtos acabados;
- . não deixar resíduos ao ser tratado termicamente o material processado;
- . ser de fácil remoção da superfície do produto nas operações e acabamento;

Tem-se particular interesse nos lubrificantes sólidos e líquidos, devido a sua utilização mais comum na trefilação do aço inoxidável.

Tanto na utilização do lubrificante sólido como no lubrificante líquido, duas características do processo de trefilação têm grande influência:

- a. A temperatura de trabalho que atua de forma direta na viscosidade do lubrificante.
- b. A pressão de trabalho que é constante e diretamente proporcional à redução de secção transversal do material.

A escolha correta de um lubrificante 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 contacto entre as superfícies [18].

Quanto à espessura do filme de lubrificação existente entre as superfícies, Wilson [19] define os regimes de lubrificação descritos a seguir:

. Regime de filme espesso (figura III.6.2.a), onde as superfícies são totalmente separadas por um filme muitas vezes superior à rugosidade média das superfícies envolvidas e ao tamanho molecular do lubrificante empregado. Este regime ocorre sempre que a espessura do filme é maior do que dez vezes a rugosidade quadrática média das superfícies envolvidas. Assim, o lubrificante pode ser estudado como meio contínuo entre superfícies lisas. Nesse regime, a resistência ao movimento relativo é definida pelas propriedades físicas do lubrificante. O coeficiente de atrito é pouco útil nesse caso, porém de modo grosseiro são medidos coeficientes menores que 0,05. Como as superfícies são completamente separadas pelo filme, o desgaste das superfícies inexistente. Entretanto, pode ocorrer corrosão ou erosão devido à cavitação ou à presença de partículas estranhas no lubrificante.

. Regime de filme fino (figura III.6.2.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. O comportamento da resistência ao movimento relativo é similar ao do regime de filme espesso, exceto que no regime de filme fino, a não uniformidade da rugosidade superficial pode apresentar uma influência preponderante sobre o atrito.

. No regime de camada limite (figura III.6.2.c), o filme que separa as superfícies apresenta espessuras da ordem de algumas vezes o tamanho molecular do lubrificante. A mecânica de deformação das asperezas em contacto e o comportamento físico-químico da superfície da película formada entre o lubrificante e os materiais, são fatores de extrema importância.

. Regime de lubrificação mista (figura III.6.2.d), onde a espessura do filme é menor que três vezes o valor da rugosidade média das superfícies. Nesse caso, uma parcela significativa da carga aplicada atua no contacto entre as saliências, sendo o restante relacionado à pressão verificada no filme de lubrificante existente próximo a essas saliências. Se o lubrificante é escolhido corretamente, ele formará nas superfícies, finíssimas películas aderentes (camada limite), que apesar da reduzida espessura, podem prevenir o contacto metálico direto. Nos vales, os filmes são relativamente espessos e essa situação pode ser analisada como um regime modificado de filme fino. Entretanto, nos picos, torna-se necessário analisar os efeitos físico-químicos que conduzem ao surgimento da película, fazendo com que a análise se realize como um regime de camada limite. 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).

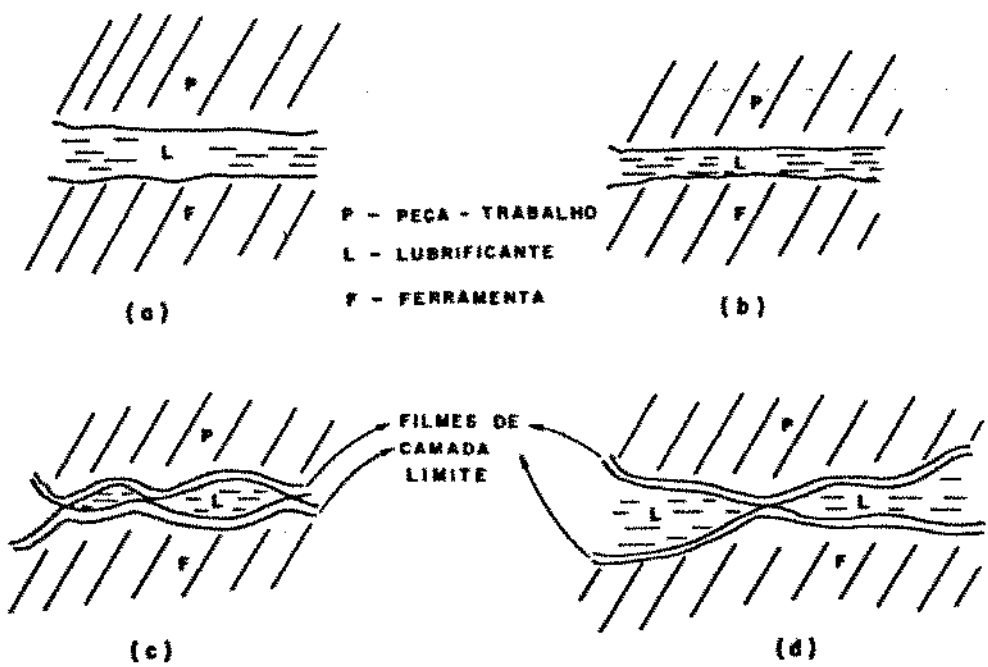


Figura III.6.2 - Representação dos regimes de lubrificação em processos de conformação [19].

O estabelecimento de um ou mais regimes de lubrificação durante o processo de trefilação, está relacionada a fatores como a velocidade do processo, a viscosidade do lubrificante e a força aplicada nas superfícies.

A figura III.6.3 obtido de Hersey apud Button [18] apresenta a variação da resistência ao cisalhamento da interface de contacto, representada por um coeficiente de atrito, devido ao aumento do parâmetro S (velocidade \times viscosidade/força). Representa a passagem dos diversos regimes:

- camada limite, para pequenos valores de S ;
- misto, para valores de S um pouco maiores;
- hidrodinâmico, para valores de S acima de um ponto crítico.

A baixas velocidades, a quantidade de lubrificante carregada para a região de contacto é mínima, somente algumas poucas camadas atômicas de lubrificante aderem às superfícies, caracterizando o regime de camada limite; a possibilidade de contacto 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 contacto, 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 valor crítico de S , onde ocorre a passagem para um 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.

O aumento de velocidade acarreta uma maior quantidade de lubrificante carregada para a região de contacto, a espessura do filme tende a crescer porém, também a pressão atuante sobre o filme se eleva, o que exige uma maior tensão para promover o cisalhamento do filme e conseqüentemente, ocorre um aumento do coeficiente de atrito [18].

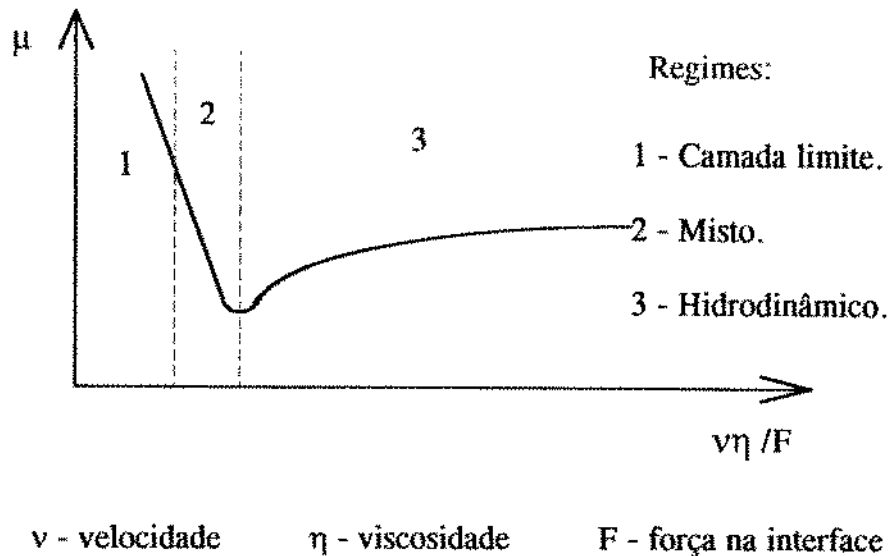


Figura III.6.3 - Curva de Stribeck [18].

III.6.1 - LUBRIFICANTES SÓLIDOS.

Os lubrificantes sólidos devem ser aderentes a metais, possuir pequena resistência ao cisalhamento, estabilidade em altas temperaturas, serem quimicamente inertes e ter elevado coeficiente de transmissão de calor.

Os lubrificantes sólidos (sabões) usados nos processos de trefilação são produtos resultantes da reação de ácidos graxos saturados ou não com hidróxidos metálicos [GM], podendo ter como complemento, aditivos para altas pressões e temperaturas (EP) e cal. Os ácidos graxos normalmente utilizados são derivados de matéria prima animal (sebo) e/ou vegetal (óleos) obtidos através de processos de prensagem ou de desdobraimento/destilação; os mais comuns são:

- . ácido esteárico (octadecanóico);
- . ácido palmítico (hexadecanóico);
- . ácido oleico (9-octadecenóico).

Como características químicas do sabão são importantes serem consideradas a sua polaridade (adsorção física) e sua reatividade química (adsorção química).

Pelo apresentado por Wilson [19] 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 granulometria do sabão influi na espessura da camada lubrificante e

conseqüentemente na eficiência da lubrificação. Sabões de granulometria muito fina (> 50 Mesh), tem tendência à formação de túneis e os de granulometria muito grossa (< 10 Mesh) são mais difíceis de arraste pelo arame. De um modo geral, utiliza-se sabões de maior granulometria para fio-máquina ou arame de bitolas maiores e os mais finos para arames mais finos. Então, tem-se:

- . < 10 - 20 Mesh - arame grosso;
- . 20 - 40 Mesh - arame médio;
- . > 50 Mesh - arame fino.

III.6.2 - LUBRIFICANTES LÍQUIDOS .

Os óleos lubrificantes podem ser de origem mineral, vegetal e animal.

Devido ao verniz gomoso que os dois últimos formam quando superaquecidos, apenas os óleos minerais, puros ou com aditivos, são apropriados à lubrificação das superfícies metálicas.

Os óleos lubrificantes minerais podem ser classificados em naftênicos e parafínicos, segundo o tipo predominante de hidrocarbonetos. Não existe, porém, nenhum óleo parafínico ou naftênico puro.

Como visto anteriormente a característica mais importante de um óleo lubrificante é sua viscosidade, que é a resistência interna oferecida pelas moléculas de uma camada quando esta é deslocada em relação às adjacentes. É o resultado de um atrito interno do próprio lubrificante, denominado atrito fluido.

Todos os óleos apresentam sensibilidade à temperatura, no que concerne à viscosidade, observando-se que os óleos naftênicos são mais sensíveis que os parafínicos.

A variação da viscosidade com a temperatura não é linear. Se porém, essa variação for representada em um gráfico de escalas logarítmicas para a temperatura e para a viscosidade, a curva aproxima-se sensivelmente de uma reta. Se são conhecidas duas viscosidades do mesmo óleo em temperaturas diferentes, ligando-se estes pontos por uma reta pode-se obter sua viscosidade a qualquer outra temperatura.

Quanto ao índice de viscosidade, os óleos são, geralmente, classificados como sendo de [16]:

- . baixo índice de viscosidade (LVI) - $i < 40$;
- . médio índice de viscosidade (MVI) - $i = 40$;
- . alto índice de viscosidade (HVI) - $i > 80$.

Um alto índice indica menor influência da temperatura e, portanto, comportamento mais uniforme durante utilização.

III.7 - FIEIRAS.

Denomina-se fieira, a ferramenta apropriada para realizar convenientemente o processo de trefilação.

A ferramenta de trefilar, é constituída de regiões distintas, ao longo do furo interno como pode ser visto na figura III.7.1.

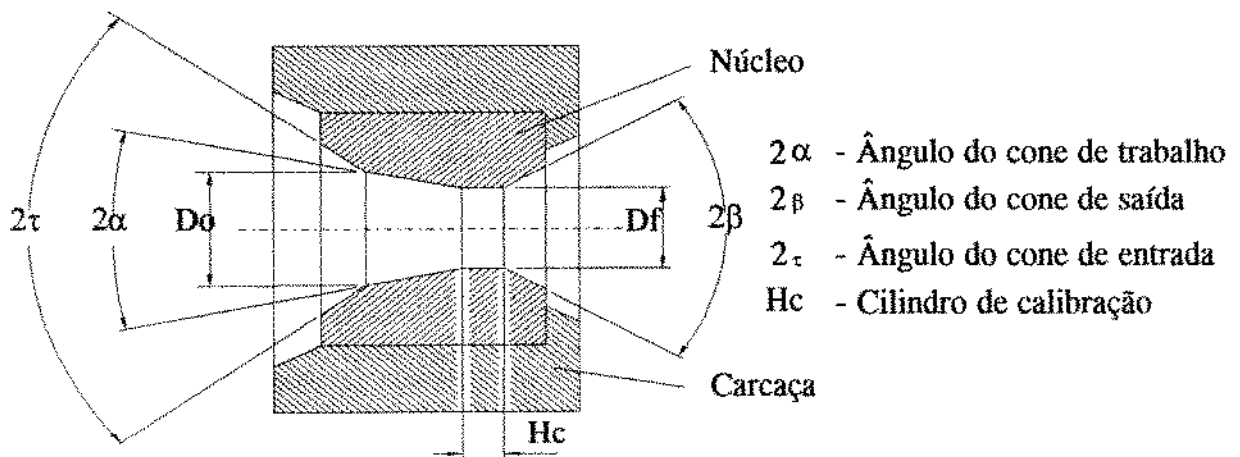


Figura III.7.1 - Representação dos ângulos dos cones e da altura e diâmetro do cilindro de calibração [9].

O cone de entrada tem a finalidade de guiar o fio em direção ao cone de trabalho e permitir que o lubrificante acompanhe o fio e contribua para a redução do atrito entre as superfícies do fio e do cone de trabalho.

No cone de trabalho ocorre a redução, sendo, portanto, 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 cilindro de calibração, ocorre o ajuste do diâmetro do fio. É objeto de controle o comprimento, ou melhor, a altura desse cilindro, pois, quando essa altura é pequena, facilita as operações de retificação das fieiras gastas para obtenção de uma fieira de diâmetro final maior.

O cone de saída deve proporcionar uma saída livre do fio sem causar danos nas superfícies da fieira e do fio.

Tem especial importância para este trabalho o ângulo de trabalho (ou ângulo da fierra) e a altura do cilindro de calibração, denominados 2α e H_c respectivamente.

A fierra é fabricada com materiais de extrema resistência ao desgaste, empregando-se comumente metal duro (carboneto de tungstênio - tabela III.7.1), diamante (natural ou policristalino) e também alguns materiais cerâmicos (óxido de zircônio, carboneto-nitreto de titânio, etc).

Tabela III.7.1 - Características de fierras de metal duro [20].

ISO	Composição química				1	2	3	4
	WC	TiC	Ta (Nb) C	Co				
K01	96	0,7	0,3	3	15,4	92,5	6,1	640
K05	94	0,5	1	4,5	15	93	6	650
K10	93	1	0,5	5,5	14,9	92	6	630
K20	93	0,5	0,5	6	14,7	91,6	5,7	620
K30	90,5	-	0,5	9	14,6	90,6	5,4	600
K40	89	-	-	11	14,3	89,5	5	560
K50	85	-	-	15	14	87,5	4,5	530

(1) Densidade g/cm^3 . (2) Dureza Rockwell A. (3) Resistência a Compressão kN/mm^2 .
(4) Módulo Young kN/mm^2 .

A tabela III.7.2 apresenta uma recomendação de materiais para fierra de trefilação conforme o material a ser trefilado.

Qualquer que seja o material usado na fabricação das ferramentas para trefilação, são exigidas as seguintes características [9]:

- . permitir a trefilação de grande quantidade de fios sem que ocorra um desgaste acentuado da fierra;
- . 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;
- . permitir a obtenção da superfície do fio liso e brilhante, durante longo período de uso.

Tabela III.7.2 - Recomendação de material para fiação de trefilação [21].

Metal a ser trefilado	Diâmetro (mm)	Material recomendado para fiação.
Aços carbono e aços ligados	< 1,57	Diamante natural ou sintético.
	> 1,57	Metal duro.
Aço inoxidável; titânio, tungstênio, molibdênio, níquel e suas ligas	< 1,57	Diamante natural ou sintético.
	> 1,57	Metal duro.
Cobre	< 2,06	Metal duro.
	> 2,06	Diamante natural ou sintético.
Ligas de cobre e alumínio	< 2,5	Diamante natural ou sintético.
	> 2,5	Metal duro.
Ligas de magnésio	< 2,06	Diamante natural ou sintético.
	> 2,06	Metal duro.

III.7.1 - ÂNGULO DE TRABALHO (2α).

No ângulo de trabalho acontece a conformação, isto é, ocorre o processo de redução da secção do fio. É nesse ponto que temos a transformação de parte da tensão de tração em tensão de compressão induzida pela inclinação da fiação.

Bonzel [22] afirma que uma lubrificação ideal ou uma mudança adequada no ângulo da fiação pode diminuir o efeito de redução da tensão de compressão no fio à medida que se aproxima da saída da ferramenta.

Também mostra 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 fiação.

Rowe [23] afirma que um regime ótimo de lubrificação é mais facilmente obtido através do uso de pequeno ângulo de trabalho e uma grande velocidade.

O ângulo de trabalho (2α) depende de dois fatores principais [20]:

- a. o tipo de material a ser trefilado (tabela III.7.3);
- b. a porcentagem de redução da secção transversal.

O comprimento (L) do cone de trabalho (2α) pode ser calculado para ângulos pequenos de fiação através da expressão [20]:

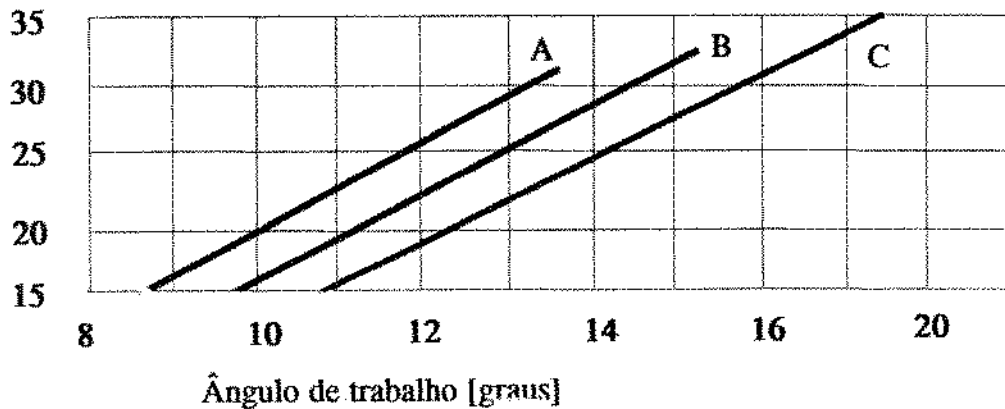
$$L = (D_o - D_f) / (\alpha/2)$$

onde : D_o - diâmetro inicial;
 D_f - diâmetro final;
 α - semi-ângulo de trabalho.

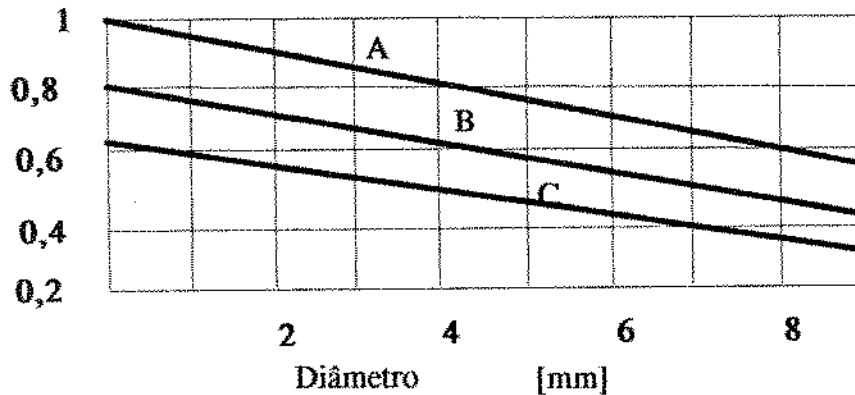
Frascio [24] afirma que o melhor sistema para se determinar experimentalmente o ângulo ótimo de trabalho, é através do controle da variação da tensão de tração, em função da variação do cone de trabalho, fixando outros parâmetros como: qualidade e rugosidade da feira utilizada, diâmetro e qualidade do fio, tipo de lubrificante e velocidade de trefilação.

A figura III.7.2 apresenta os ângulos ótimos de feira obtidos experimentalmente para trefilar vários aços em relação à redução de secção e ao diâmetro do fio de entrada e também o comprimento H_c .

Redução [%]



H_c/D



A - ABNT 5160

B - ABNT 1045

C - ABNT 1020

Figura III.7.2 - Ângulos ótimos e cilindros de calibração para vários aços [24].

Tabela III.7.3 - Valores do ângulo de trabalho de acordo com material a ser trefilado [20].

Aplicação	Para reduções de área: (%)					
	5-8	8-12	12-16	16-25	25-35	35-45
Trefilação úmida • chumbo • zinco • alumínio • prata • ouro	14°	16°	18°	21°	24°	-
Trefilação úmida • cobre • cobre recoberto • com prata • fios capilares	12°	14°	16°	19°	22°	-
Trefilação úmida • ligas de alumínio • níquel • arames para resistência elétrica	10°	12°	14°	17°	20°	-
Trefilação úmida • latão • bronze • aço baixo carbono	9°	11°	13°	16°	19°	-
Trefilação seca • latão • bronze • aço baixo carbono	7°	9°	11°	14°	17°	20°
Trefilação úmida • aço alto carbono • ligas de aço	8°	10°	12°	15°	18°	-
Trefilação seca • aço alto carbono • ligas de aço	6°	8°	10°	12°	15°	18°
Trefilação a quente • tungstênio	10°	10°	12°	12°	14°	-

O método do limite superior de Avitzur [25] é o que melhores resultados tem apresentado no cálculo do ângulo de trabalho (2α). Esse método considera o trabalho

redundante, o trabalho de atrito e o trabalho de deformação homogênea.

O método baseia-se no teorema do limite superior, o qual afirma que, quando um corpo escoar, o trabalho das forças externas é menor ou igual ao trabalho das forças associadas a qualquer campo de velocidades cinematicamente admissível no corpo sob deformação.

A expressão III.7.1 apresenta a equação do método do limite superior desenvolvido por Avitzur.

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_o} = \frac{\frac{\sigma_{xb}}{\sigma_o} + 2f(\alpha) \ln \frac{R_o}{R_f} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} \cot \alpha \right) + 2\mu \left(\cot \alpha \left[1 - \frac{\sigma_{xb}}{\sigma_o} - \ln \frac{R_o}{R_f} \right] \ln \frac{R_o}{R_f} + \frac{L}{R_f} \right)}{1 + 2\mu \frac{L}{R_f}}$$

onde:

- | | |
|---|--------------------------------|
| σ_{xf} - tensão de trefilação, | R_o - raio inicial, |
| σ_o - tensão de escoamento efetiva, | R_f - raio final, |
| σ_{xb} - tensão frontal, | μ - coeficiente de atrito, |
| α - semi-ângulo de trabalho, | |
| L - comprimento da região cilíndrica de calibração. | |

Expressão III.7.1 - Equação do método do limite superior desenvolvido por Avitzur [25].

Esta abordagem sempre fornece uma força superestimada à necessária para causar o escoamento de um material de von Mises.

III.7.2 - CILINDRO DE CALIBRAÇÃO (Hc).

Esta região tem como finalidade obter o diâmetro exato do material trefilado que define sua altura ou comprimento.

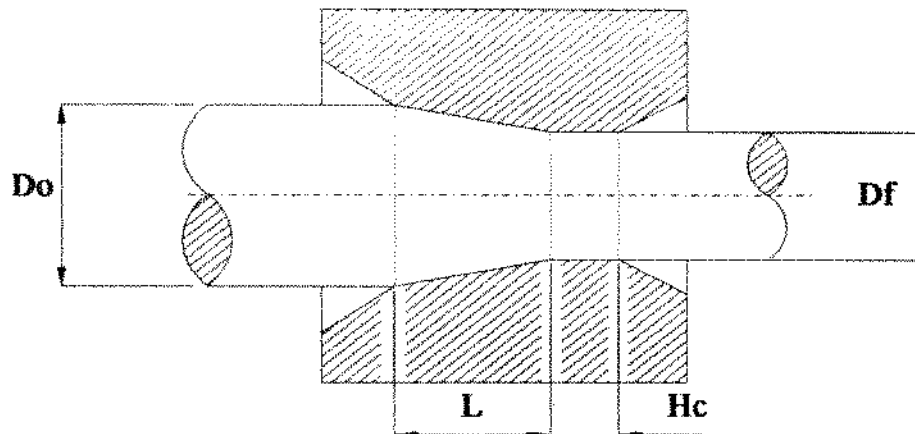
A região cilíndrica de calibração geralmente é dividida em classes [26]:

- 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.

Frascio [24] afirma que o cilindro de calibração, não basta ser exato e liso como o cone de trabalho, mas que 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.

A figura III.7.3 mostra a relação entre 2α e Hc para materiais com diferentes

resistências mecânicas.



Material	D_o (mm)	D_f (mm)	H_c (mm)	L (mm)	2α [°]
Alumínio	3,74	3,0	1,2	1,65	24
Cobre e latão mole	3,58	3,0	1,3	1,6	20
Aço doce	3,47	3,0	1,6	1,75	16
Aço semiduro	3,35	3,0	2	1,5	14
Aço duro	3,25	3,0	2,3	1,2	12,5

Figura III.7.3 - 2α e H_c em relação ao material a trefilar [24].

Eder [26] afirma que materiais de baixa resistência mecânica necessitam de 2α maiores que materiais de alta resistência, como pode ser visto nas figura III.7.4 (a e b), embora reconheça a existência de exceções a esta regra.

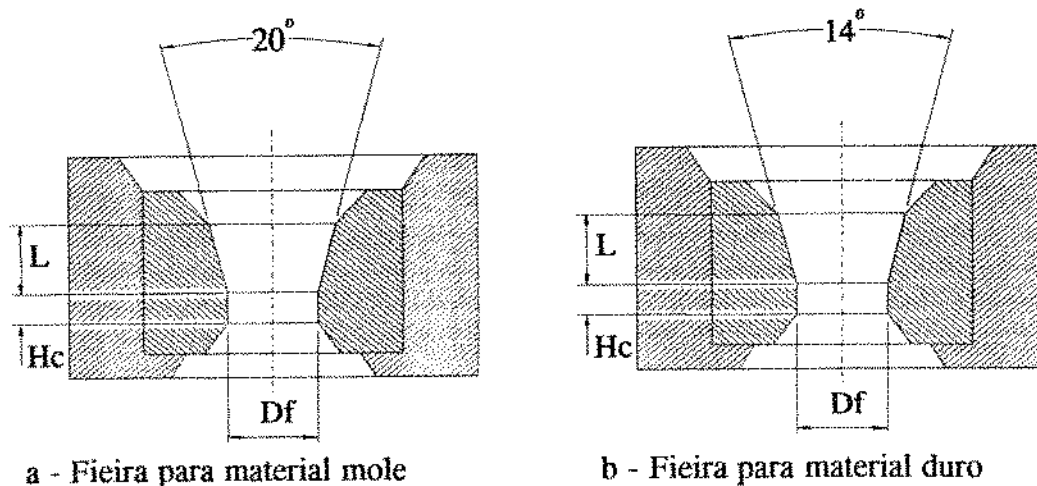


Figura III.7.4 - Fieiras com ângulo do cone de trabalho diferentes [26].

Segundo Keebler [27] 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..

Em relação à região cilíndrica de calibração Maxwell [28] faz as seguintes afirmações:

1. o comprimento deve ser entre 35 a 50 % do diâmetro final;
2. o acabamento superficial deve ser elevado;
3. a região de calibração deve ser paralela em todo o seu comprimento.

O cálculo deste comprimento associado ao ângulo de trabalho é apresentado na tabela III.7.4 através do conceito de "linha de encontro" (figura III.7.5).

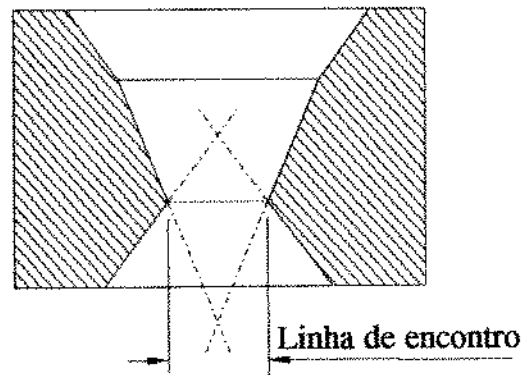


Figura III.7.5 - Linha de encontro [28].

III.8 - TREFILAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO ABNT 304.

O aço inoxidável austenítico ABNT 304 apresenta uma elevada plasticidade, o que permite sua deformação a frio até valores de 92 % de redução da secção transversal entre recozimentos.

O material de partida é o fio-máquina recozido e decapado com diâmetro na faixa de 5,50 a 7,94 mm e resistência a tração na faixa de 620 a 725 MPa.

A trefilação do aço ABNT 304 normalmente ocorre nas velocidades [29]:

- trefilação a seco - 3 a 5 m/s;
- trefilação úmida - 1 a 2 m/s.

Num pequeno número de empresas a trefilação por via úmida chega a ocorrer a uma velocidade de até 6 m/s para fios com diâmetro na faixa de 0,40 mm.

E comum o uso de feiras de carboneto de tungstênio na trefilação a seco, e de feiras de diamante na trefilação úmida.

Tabela III.7.4 - "Linha de Encontro" para Fieiras com 90° de ângulo de saída para selecionar o comprimento da área cilíndrica de calibração [28].

2α [°]	Região cilíndrica de calibração (Hc/Df).			
	25 %	35 %	50 %	66 %
8	.9673	.9542	.9346	.9137
10	.9598	.9437	.9195	.8828
11	.9561	.9385	.9122	.8830
12	.9524	.9334	.9049	.8733
13	.9488	.9284	.8977	.8637
14	.9453	.9235	.8906	.8543
15	.9418	.9185	.8836	.8450
16	.9384	.9138	.8768	.8359
17	.9350	.9090	.8700	.8268
18	.9316	.9043	.8632	.8178
20	.9250	.8951	.8501	.8003
24	.9123	.8773	.8247	.7665
27	.9032	.8645	.8064	.7421
28	.9002	.8603	.8004	.7342
30	.8943	.8521	.7887	.7185

As indústrias brasileiras de trefilação de aço inoxidável tem como padrão fieiras com ângulo de trabalho (2α) de 16 a 18° e cilindro de calibração variando entre pequeno e médio, diferente do recomendado pela "Steel Wire Handbook" [30] que indica 2α igual a 18° e Hc com 30 a 50 % do diâmetro do produto.

O arame de aço inoxidável ABNT 304 está disponível no mercado com os seguintes acabamentos:

- decapado - no estado recozido ou encruado;
- revestido com capa metálica - podendo ser de cobre ou chumbo;
- trefilado - como saída da máquina de trefilação;
- polido - é um acabamento liso e brilhante obtido após a trefilação ou recozimento.

O aço ABNT 304 não possui nenhuma característica especial no seu processo de trefilação, podendo ser trefilado como os outros arames da família 300.

III.9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [9] Bresciani F^o., E. at all - "Conformação Plástica dos Metais" - Ed. da Unicamp - 1991.
- [10] Dove, A.B. - "Steel Wire Handbook" - Volume 2 - The Wire Association, Inc. - 1969.
- [11] Colombier, R.; Hochmann, J. - "Aceros Inoxidables Aceros Refractarios" Ediciones Urmo - 1968.
- [12] Paparoni, F. - Trafilati di rame, Revista Il Rame, CISAR, n 15, p. 7-20
- [13] Steel Sales Training - "Fabricacion de Alambre" - W-01 Sandvik - 1976.
- [14] Air Products, Relatório FF-036/89 de 30/01/89.
- [15] Instrução de Serviço - "Decapagem Especial - Inox" - D.1 CDQ.360/81 Siderúrgica N.S. Aparecida - 1981.
- [16] Pires, O.A.L. - "Lubrificação" - Ed. McGraw-Hill - 1977
- [17] Cetlin, Paulo R., Helman, Horacio - "Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais"- Guanabara Dois - 1983.
- [18] Button, Sérgio T. - "Estudo da Lubrificação Hidrodinâmica na Extrusão Hidrostática" - S.P. - 1990 - Tese (Doutorado) - FEM-DEMa - Unicamp
- [19] Wilson, W.R.D. - "Friction and Lubrication in Bulk Metal - Forming Processes" J. of App. Metalworking, vol. 1, n^o. 1, p. 7-9 - 1979.
- [20] Koner SpA - "Tungsten Carbide" - Italy, Wire Ind., April 1992, p. 350-356
- [21] "Selection of Tool Material for Drawing Wire, Bar and Tubing", Ed. by L.C. Shaheen, p. 521-525.
- [22] Bonzel, M. - "Steel Wire - Manufature and Properties", Eng. Book Shop N.Y. - 1935 - p. 94-114.
- [23] Rowe, G.W. - "Conformado de los Metales" - Ed. Urmo - Espanha - 1965
- [24] Frascio, A. - "Il filo metalico" - Ed. Hoepli - Italia - 1970.

- [25] Avitzur, B., "Handbook of Metal Forming", 1a. ed.- John Wiley and Sons, Nova Iorque, 1983
- [26] K. Eder, Siegfried Eder GmH, Vienna, Austria
Wire Industry, November 1981, p. 797-803.
- [27] Keebler J., Technical Dir., Wire Technology International Magazine,
May, 1990, p. 29-38.
- [28] Maxwell, Thomas H., Carbide die design - impact upon wire quality,
Wire journal International, December 1991, p. 45-50.
- [29] "Fabricacion de Alambre"- Steel Sales Training - Sandvik.
- [30] The Wire Association - "Steel Wire Handbook"- Ed. Allan B. Dove
Vol. I - USA - 1975.

Capítulo IV.

Procedimentos Experimentais.

IV.1 - INTRODUÇÃO.

O procedimento experimental constou de três etapas:

. ensaios com a matéria-prima: os fios a serem trefilados foram submetidos a ensaios de tração;

. ensaios de trefilação: nesta etapa foi avaliada a influência de cada fieira com geometria específica e viscosidade dos lubrificantes utilizados;

. ensaios com os produtos: os fios trefilados foram avaliados quanto ao aspecto visual e resistência à tração.

A seguir faz-se a descrição de cada um dos ensaios acima relacionados.

IV.2 - ENSAIOS REALIZADOS.

IV.2.1- Ensaio com a Matéria-prima.

O material a ser retrefilado é um aço inoxidável ABNT 304 recozido e não decapado, totalmente isento de qualquer tratamento superficial.

Foram realizados ensaios de tração para determinação das propriedades mecânicas da matéria-prima, sendo utilizada uma máquina de tração marca Kratos .

IV.2.2 - Ensaio de Trefilação.

Os ensaios de trefilação foram realizados em uma trefiladora montada e instalada no Laboratório de Conformação do Departamento de Engenharia de Materiais da FEM - Unicamp.

A trefiladora utilizada é uma máquina de cabrestante único, velocidade variável e caixa de fieira adaptada para permitir a medição do esforço de trefilação, como pode ser visto na figura IV.2.2.1 .

A seqüência de trefilação tem início na fixação de um carretel plástico ABNT 160

contendo aproximadamente 5 kg de aço inoxidável em um desenrolador horizontal que trabalha sobre dois rolamentos. O fio passa na seqüência por dois tensionadores alinhados. Estes tensionadores têm como função evitar que esforços contrários ao esforço de trefilação, ocasionados pelo desenrolamento, influenciem no sistema de medição do esforço de trefilação.

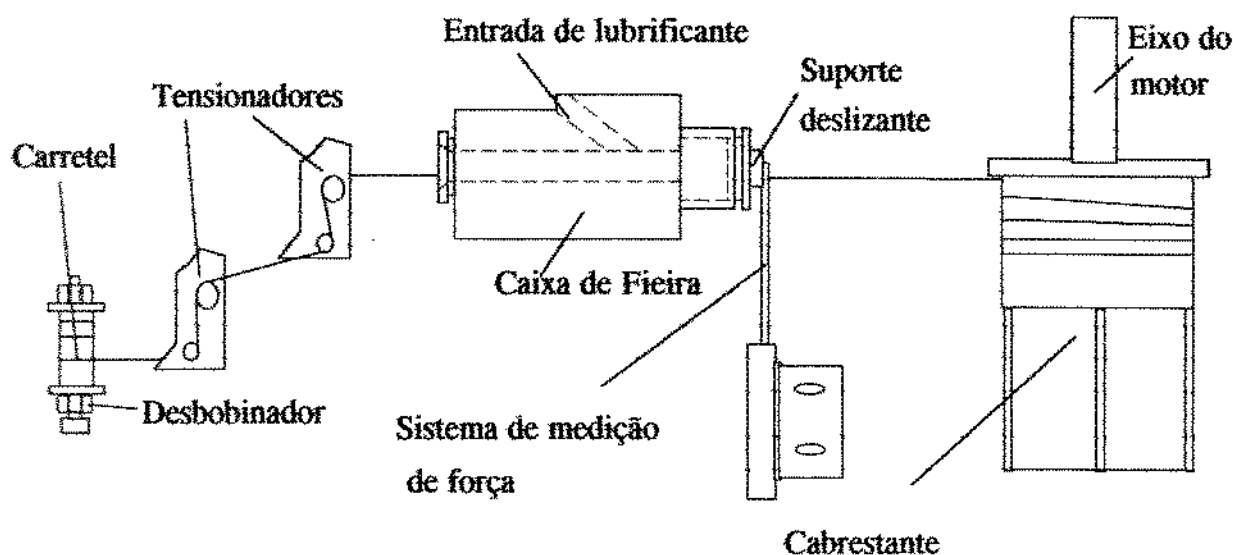


Figura IV.2.2.1 - Trefiladora Monobloco.

Na seqüência, o fio entra na caixa de fieira onde encontra o óleo lubrificante e a fieira de trefilação. A fieira totalmente imersa em óleo é apoiada sobre um suporte deslizante, que por sua vez tem como guia a tampa da caixa de fieira (figura IV.2.2.2). O suporte de fieira deslizante tem como obstáculo a lâmina onde se encontram os extensômetros elétricos...

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 18,4 kW e 3000 rpm de velocidade angular máxima.

A velocidade de trefilação variou de 0 a 14,6 m/s. O controle da velocidade foi feito por um tacômetro digital modelo TM 500 da marca Euro Control.

Para a medição da força de trefilação utilizou-se um dispositivo composto de uma lâmina, que é flexionada durante o processo. Nesta lâmina estão colados dois extensômetros elétricos (strain-gauges) em meia ponte de Wheatstone.

Este dispositivo encontra-se conectado a um amplificador de sinais Philips, um milivoltímetro digital e um registrador gráfico. A tabela IV.2.2.1 apresenta algumas informações complementares desse medidor.

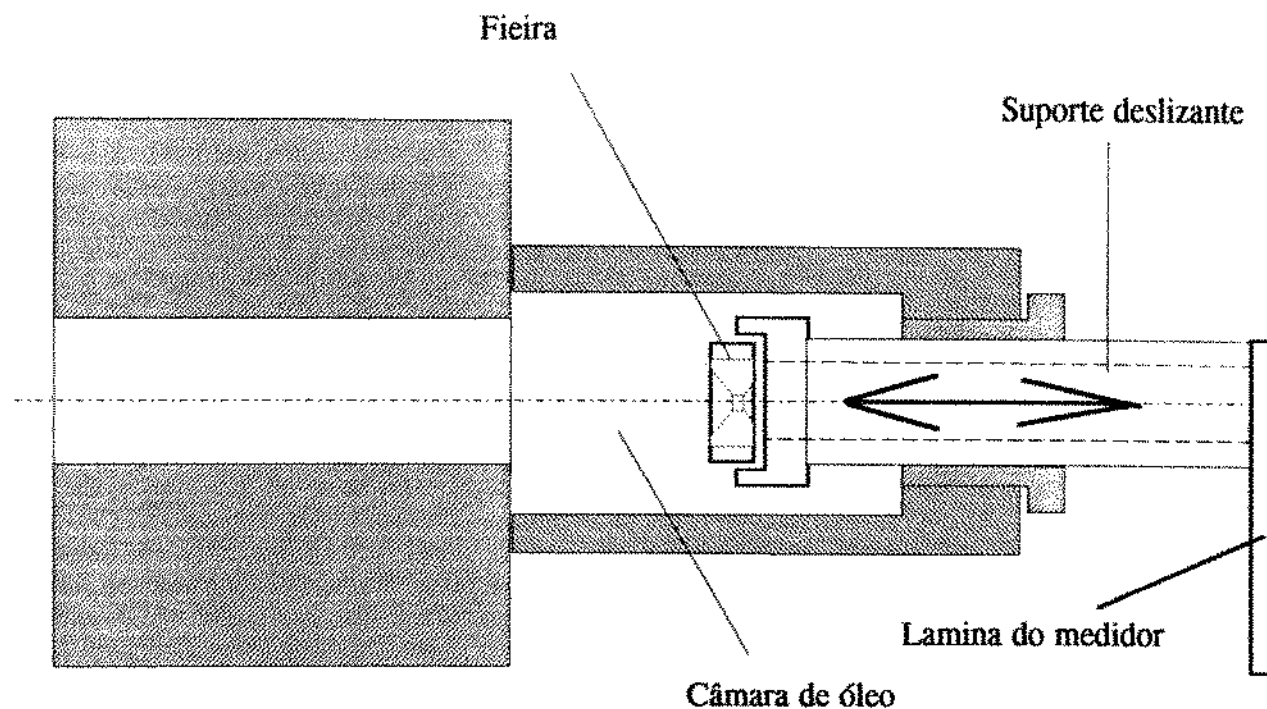


Figura IV.2.2.2 - Sistema de suporte deslizante da caixa de fiera.

Tabela IV.2.2.1 - Ponte e registrador - informações complementares.

* Ponte	
Sensibilidade (mV/V)	200
Tensão de alimentação (V)	2
Faixa de medição (N)	0 - 147
* Registrador	
Velocidade de alimentação do papel (mm/min)	160
Escala para medição de força (mV)	100

A calibração do dispositivo de medição foi realizada utilizando-se pesos com valores conhecidos e a leitura dos resultados feita através do milivoltímetro.

Através de regressão linear pelo método dos mínimos quadrados obteve-se a seguinte relação de força (N) versus voltagem (mV):

$$F = 0,688 \times V$$

com o coeficiente de correlação $R^2 = 0,998$

A curva de calibração obtida é apresentada na figura IV.2.2.3 .

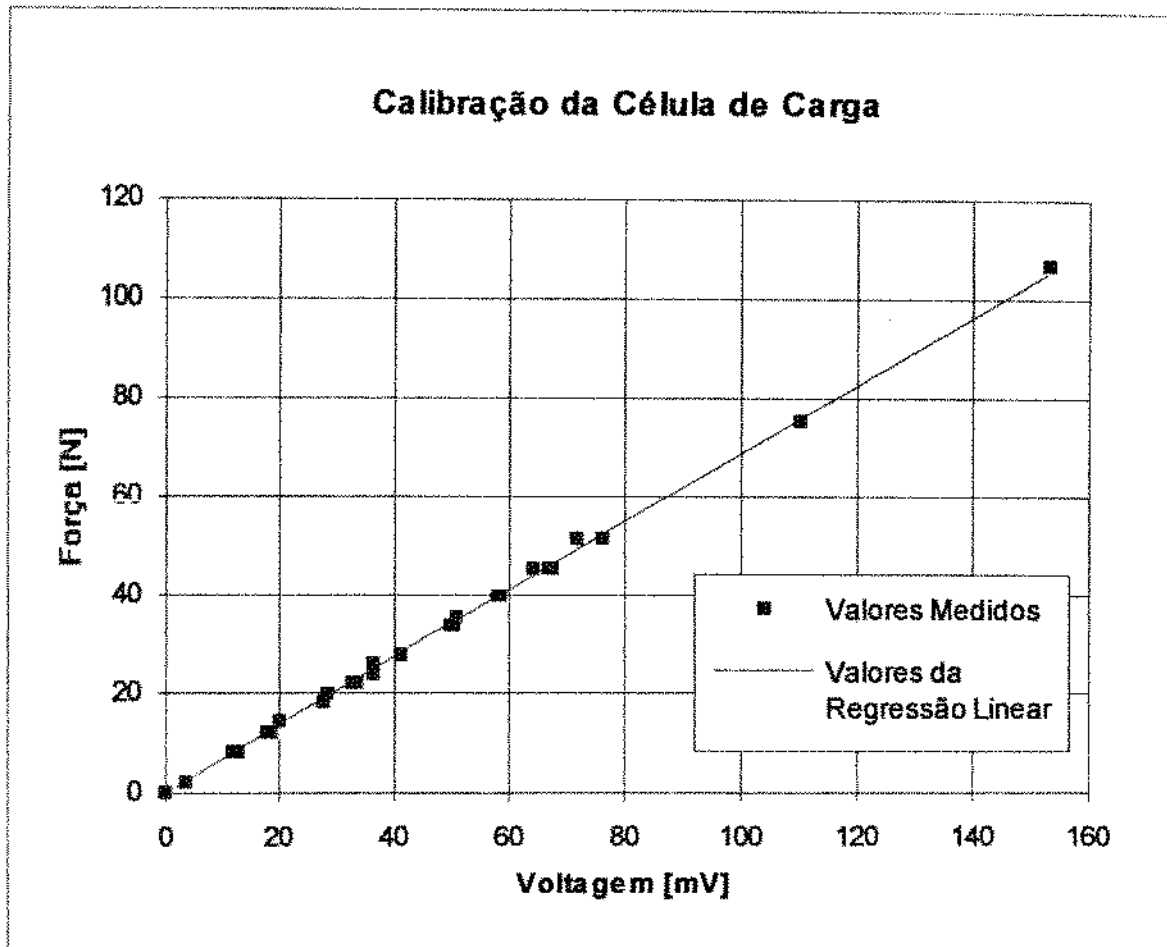


Figura IV.2.2.3 - Curva de calibração da célula de carga.

O conjunto de fieiras a ser utilizado nos ensaios foi definido com o auxílio de um programa em Pascal baseado no método do limite superior desenvolvido por Avitzur [25], que que tem como dados de entrada:

- a - tensão de escoamento efetiva (σ_0) em N/mm^2 ;
- b - coeficiente de atrito (μ);
- c - comprimento do cilindro de calibração (H_c) em mm;
- d - porcentagem de redução;
- e - diâmetro final (D_f) em mm;

e como resultados:

- f - semi-ângulo de trabalho (α);
- g - tensão de trefilação (σ_{xf}) em N/mm^2 ;

Os resultados da simulação encontram-se na tabela IV.2.2.2.

Através dos resultados do programa foi possível optar-se por um medidor na faixa de força de 0 - 147 N e pelas fieiras com ângulo de trabalho (2α) de 10, 14 e 18°.

Esses ângulos de fieira representam os ângulos ótimos obtidos definindo-se valores para μ e H_c , mantendo-se constantes D_o , D_f e σ_o .

Tabela IV.2.2.2 - Resultados da simulação para definição da geometria do conjunto de fieiras.

Tensão de escoamento (σ_o) - 450 MPa				
Diâmetro final (D_f) - 0,45 mm				
% de redução - 19 %				

μ	H_c (mm)	α (°)	σ_{xf} (MPa)	F (N)
0,1	0,225	9	244,19	38,8
0,08	0,225	8	227,28	36,1
0,05	0,225	6	196,85	31,1
0,1	0,157	9	233,27	37,1
0,08	0,157	8	217,59	34,6
0,05	0,157	6	189,70	30,2
0,1	0,09	9	221,32	35,2
0,08	0,09	8	207,19	32,9
0,05	0,09	6	182,24	28,9

Foram preparadas nove fieiras (figura IV.2.2.4) de metal duro do tipo BF41 (antiga HF) de fabricação Brasinter (tabela IV.2.2.3).

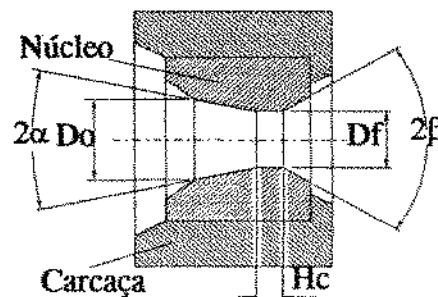


Figura IV.2.2.4 - Fieira

Tabela IV.2.2.3 - Classe de metal duro Brassinter para trefilação e estiramento.

Classe	Dureza HRA	Densidade nominal g/cm ³
BF41	92,9	15,15
Recomendação técnica: BF41 - Classe de maior dureza. Para aplicações em núcleos para trefilação de arames de aço de diâmetro até 0,80 mm . Correspondente a K 01 da norma ISO.		

As nove fieiras tinham em comum as dimensões abaixo:

$$D_o = 0,5 \text{ mm} \quad D_f = 0,45 \text{ mm} \quad 2\beta = 60^\circ$$

No entanto, cada fieira apresentava uma geometria particular com ângulo de trabalho (2α) e cilindro de calibração (H_c) conforme a tabela IV.2.2.4.

Tabela IV.2.2.4 - Composição da geometria das fieiras.

Fieira	2α (°)	H_c/D_f (%)	Fieira	2α (°)	H_c/D_f (%)	Fieira	2α (°)	H_c/D_f (%)
1 (1020)	10	20	4 (1420)	14	20	7 (1820)	18	20
2 (1035)	10	35	5 (1435)	14	35	8 (1835)	18	35
3 (1050)	10	50	6 (1450)	14	50	9 (1850)	18	50

O controle da geometria de todas as fieiras foi feito através de um aparelho perfilográfico Taylor-Hobson .

Como não existe no mercado um lubrificante com características específicas para trefilação do aço inoxidável, optou-se por um óleo capaz de manter um nível de viscosidade suficiente para formar uma película estável nas condições previstas para o processo de trefilação, conforme indicação do fabricante.

Como lubrificante, foram utilizados dois óleos da classe MJF [31].

Os lubrificantes da classe MJF são lubrificantes à base de óleos vegetais e minerais combinados com cloridrinas de alto peso molecular, contendo aditivos para pressões elevadas.

As viscosidades desses óleos foram avaliadas pelo fabricante através de um viscosímetro BrookField, e os resultados estão na tabela IV.2.2.5.

Tabela IV.2.2.5 - Características dos lubrificantes.

Óleo	Viscosidade a 25°C (N.s/m ²)	Densidade a 25 °C (g/ml)
MJF 2	1,3	1,093
MJF 5	3,1	1,084

IV.2.3 - Ensaio com os Produtos.

Estes ensaios tiveram como objetivo determinar as propriedades dos produtos obtidos no processo de trefilação, a fim de avaliar como a geometria da ferramenta, a velocidade de trefilação e a viscosidade dos lubrificantes influem na qualidade do produto.

Um aspecto importante, verificado a cada experimento, foi a qualidade do material trefilado, em termos de aspecto superficial e retilidade.

Os ensaios de tração verificaram a variação da tensão de escoamento a 0,2% e tensão limite de resistência com a redução de 0,50 mm para 0,45 mm de diâmetro em um único passe à velocidade de 14,6 m/s

IV.3 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.

- [31] INBRA - "Informe de Dados Sobre Produtos"- MSG 26026
Julho 1993 - p. 5.

Capítulo V.
Resultados e Análise dos Resultados.

V.1 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS COM MÁTERIA-PRIMA.

Os resultados dos ensaios de tração para a determinação das propriedades mecânicas realizados com a matéria-prima encontram-se na tabela V.1.1.

Tabela V.1.1 - Propriedades mecânicas da matéria-prima.

Tensão limite de resistência a tração (MPa).	662,5
Tensão de escoamento a 0,2% (MPa).	329,9
Alongamento (%).	62,5

Esses resultados indicam que a matéria-prima encontra-se num estado de recozimento ótimo, pois os valores obtidos estão abaixo da faixa de 685-960 MPa indicado para fios com diâmetro entre 0,05 e 0,50 mm (tabela II.5.3 [2]).

V.2 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE TREFILAÇÃO.

Os ensaios de trefilação foram divididos em três conjuntos.

As figuras V.2.3 a V.2.6 apresentam os resultados obtidos nesses ensaios. Os valores de força apresentados são valores médios de seis medidas. A tabela V.2.1 apresenta os valores médios e os desvios-padrão obtidos em cada ensaio.

Tabela V.2.1 - Valores médios e desvios-padrão de cada ensaio.

Ensaio nº	Fieira	Óleo	Vel. (m/s)	Média (N)	Desv. Padrão (N)
27	8	MJF 2	1,9	38,61	0,17
26	8	MJF 2	2,7	37,84	0
25	8	MJF 2	3,1	37,32	0,19
32	8	MJF 2	5,4	39,56	0,68
33	8	MJF 2	14,3	37,23	1,56
35	9	MJF 2	2,8	49,24	0,25
39	9	MJF 2	3,1	48,93	0,58
36	9	MJF 2	5,4	46,67	0,70
37	9	MJF 2	8,3	46,42	0,29
38	9	MJF 2	10,6	45,54	0,79
34	9	MJF 2	14,2	44,99	1,07
41	7	MJF 2	3,1	48,84	0
42	7	MJF 2	5,5	46,66	0,52
43	7	MJF 2	8,1	45,92	0,72
44	7	MJF 2	11,0	45,68	0,28
40	7	MJF 2	14,1	45,96	1,05
48	5	MJF 2	3,0	41,50	1,15
50	5	MJF 2	3,0	43,68	3,10
46	5	MJF 2	5,5	39,21	0
47	5	MJF 2	8,9	37,61	0,71
49	5	MJF 2	10,8	38,41	0,52
45	5	MJF 2	14,6	37,55	1,46
55	2	MJF 2	3,1	41,96	0
56	2	MJF 2	5,3	42,31	0
52	2	MJF 2	5,8	43,0	0
53	2	MJF 2	8,8	42,48	0,44
54	2	MJF 2	10,5	41,28	0
51	2	MJF 2	14,3	42,24	2,56
74	8	MJF 5	2,8	37,66	0,24
75	8	MJF 5	5,4	34,88	0,39

Ensaio n°	Fieira	Óleo	Vel. (m/s)	Média (N)	Desv. Padrão (N)
76	8	MJF 5	8,0	33,88	0,44
77	8	MJF 5	10,8	33,11	0,58
73	8	MJF 5	14,6	32,68	0,54
72	5	MJF 5	3,1	34,22	0,24
68	5	MJF 5	3,2	34,05	0
69	5	MJF 5	5,4	32,85	0,24
70	5	MJF 5	8,7	32,16	0,44
71	5	MJF 5	11,2	31,30	0,48
67	5	MJF 5	14,7	31,09	0,52
60	2	MJF 5	1,0	51,82	1,14
62	2	MJF 5	3,2	40,93	0
63	2	MJF 5	5,4	39,56	0
64	2	MJF 5	8,1	39,21	0
65	2	MJF 5	8,5	37,84	0,34
66	2	MJF 5	11,1	36,63	0,24
61	2	MJF 5	14,4	36,98	1,17

Nessas figuras, também são apresentadas as curvas polinomiais do segundo grau, cujas expressões são mostradas a seguir:

óleo lubrificante - MJF 2

$$\text{fieira 2} - F = 46,58 - 0,79 V + 0,03 V^2$$

$$\text{fieira 5} - F = 44,91 - 1,11 V + 0,04 V^2$$

$$\text{fieira 7} - F = 49,61 - 0,56 V + 0,02 V^2$$

$$\text{fieira 8} - F = 38,39 - 0,038 V$$

$$\text{fieira 9} - F = 51,65 - 1,02 V + 0,04 V^2$$

óleo lubrificante - MJF 5

$$\text{fieira 2} - F = 52,08 - 2,78 V + 0,12 V^2$$

$$\text{fieira 5} - F = 35,78 - 0,61 V + 0,02 V^2$$

$$\text{fieira 8} - F = 40,93 - 1,3 V + 0,05 V^2$$

No primeiro conjunto de ensaios foi utilizado o lubrificante de baixa viscosidade MJF 2, com fieiras de ângulo de trabalho (2α) de 18° .

Esses ensaios tinham como objetivo verificar a influência do comprimento da região cilíndrica de calibração sobre o esforço de trefilação a várias velocidades.

A figura V.2.3 apresenta os resultados desses ensaios.

A fieira número 7 (1820) apresenta uma força de 48,16 N a 3,1 m/s e uma queda gradual da força até a velocidade de 14,1 m/s, onde atinge a melhor condição de trabalho com uma queda de 5,7 % da força de trefilação em relação à velocidade mais baixa.

A fieira número 9 (1850) apresenta uma força inicial maior mas, tem sua condição ideal de trabalho a 10,6 m/s onde tem-se uma queda de 7,6 % da força de trefilação em relação à velocidade mais baixa.

Através da curva ajustada polinomialmente verifica-se que a fieira número 8 é a que apresenta melhores resultados com menores forças de trefilação. Ela é constituída por um ângulo de trabalho de 18° e uma região cilíndrica de calibração (H_c) igual a 35 % de D_f .

A fieira número 8 apresenta um declínio de força a partir da velocidade de 5,4 m/s, chegando a atingir condições ideais a uma velocidade de 11,3 m/s. A partir dessa velocidade, tem-se um aumento da força de trefilação.

A 11,3 m/s tem-se uma queda de 6,8 % da força, quando comparado à velocidade de 5,4 m/s.

Neste primeiro conjunto de ensaios foi possível verificar a importância da utilização do comprimento correto da região cilíndrica de calibração.

Isto fica nítido se comparada as três fieiras a uma velocidade de 14,2 m/s, onde se verifica uma queda de 16,5 % na força de trefilação, quando utilizada uma região cilíndrica de calibração de 35 %.

Procurou-se na revisão bibliográfica explicações para o comportamento, em termos de força, apresentado pelas fieiras número 7 e 9 em relação à fieira número 8.

Pela equação de Avitzur as forças devem aumentar à medida que H_c aumenta, mantendo-se os demais parâmetros como 2α , lubrificação e outros constantes.

No entanto nos ensaios com H_c igual a 35 % de D_f (fieira número 8), verifica-se valores de força menores que as encontradas nas outras duas fieiras.

Nos ensaios com H_c igual a 20 % observou-se um comportamento instável da força de trefilação, com expressiva influência de elementos externos como os tensionadores.

As forças para H_c igual a 50 % apresentaram-se elevadas devido ao comprimento excessivo da região cilíndrica de calibração e conseqüente aumento da resistência pelo atrito.

Isto demonstra que a equação de Avitzur não é adequada em condições de trefilação a altas velocidades, como as utilizadas neste trabalho.

No segundo conjunto de ensaios foi utilizado o lubrificante de baixa viscosidade MJF 2 com fieiras de ângulo de trabalho (2α) de 10° , 14° e 18° e H_c igual a 35 % de D_f .

Esses ensaios tinham como objetivo verificar a influência do ângulo de trabalho (2α) sobre o esforço de trefilação a várias velocidades.

A figura V.2.4 mostra os resultados desses ensaios.

A fieira número 2 (1035) apresenta uma queda da força de trefilação igual a 4,8 % na faixa de velocidade de 5,8 a 14,3 m/s, devido ao carreamento de maior quantidade de lubrificante para a região de contato, aumentando a camada de filme lubrificante.

Acima de 14 m/s a fieira número 5 (1435) é a que melhor resultado apresenta, com uma queda da força de 2,7 % em relação à fieira número 8 e 9,3 % em relação à fieira de número 2.

Neste segundo conjunto de ensaios fica claro que para pequenos ângulos de trabalho predomina o efeito do atrito acarretando um elevado valor para o esforço de trefilação.

À medida que o ângulo de trabalho aumenta, o efeito do atrito diminui, de tal forma que apesar do aumento do trabalho redundante, existe uma redução significativa do esforço de trefilação.

Além disso, tem-se a existência de um ângulo pequeno entre a ferramenta e o fio associado à grande velocidade relativa, que favorece a formação de um filme espesso contínuo de óleo lubrificante, como apresentado por Rowe [23].

Isto fica claro quando se observa o comportamento das fieiras de números 5 e 8, principalmente a velocidades acima de 14 m/s.

O terceiro conjunto de ensaios teve por objetivo analisar a influência da viscosidade do óleo lubrificante em altas velocidades e diferentes ângulos de trabalho.

A figura V.2.5 mostra os resultados desses ensaios.

O lubrificante utilizado foi o óleo MJF 5, que possui viscosidade maior que o óleo MJF 2 utilizado nos dois primeiros conjuntos de ensaios.

Nesta etapa utilizou-se 2α igual a 10° , 14° e 18° e fixou-se H_c em 35 % de D_f , para melhor analisar a influência do óleo lubrificante sobre o esforço de trefilação.

O comportamento das três fieiras teve uma melhora significativa com a utilização do óleo MJF 5.

A fieira número 2 (1035) novamente apresenta maiores forças de trefilação, mas apresentou uma queda de 10,9 % em comparação aos resultados obtidos com o óleo MJF 2 a velocidades acima de 14 m/s.

No comportamento da fieira número 2 predomina o efeito do atrito a baixas velocidades. A altas velocidades o atrito diminui devido ao carreamento de maior volume de óleo lubrificante e, conseqüente formação de um filme espesso.

A fieira número 8 também tem um melhor comportamento na trefilação com o óleo MJF 5 do que com o óleo MJF 2.

Ela apresenta uma queda do esforço de trefilação uniforme e gradual em todas as faixas de velocidade, atingindo 13,5 % a velocidades acima de 14 m/s em relação aos ensaios com velocidades mais baixas.

Embora nos ensaios com o óleo lubrificante MJF 2 a fiação número 5 tenha apresentado menores esforços de trefilação apenas em velocidades acima de 14 m/s, nesta terceira etapa ela tem uma queda uniforme e gradual da força em todas as faixas de velocidades.

Com o objetivo de melhor visualizar os resultados obtidos, agrupou-se na figura V.2.6 os melhores resultados.

Nesta figura verifica-se que:

- o melhor óleo lubrificante é o MJF 5, pois é o que melhor comportamento apresentou em todos ensaios de trefilação, mantendo viscosidade adequada nos diversos níveis de pressão e temperatura atingidos nesses ensaios.

- a melhor geometria é a da fiação número 5. É a que melhor associa pequeno ângulo de trabalho com altas velocidades a um comprimento de região cilíndrica de calibração mais estável. E também apresenta vida mais longa na operação de recuperação para diâmetros maiores.

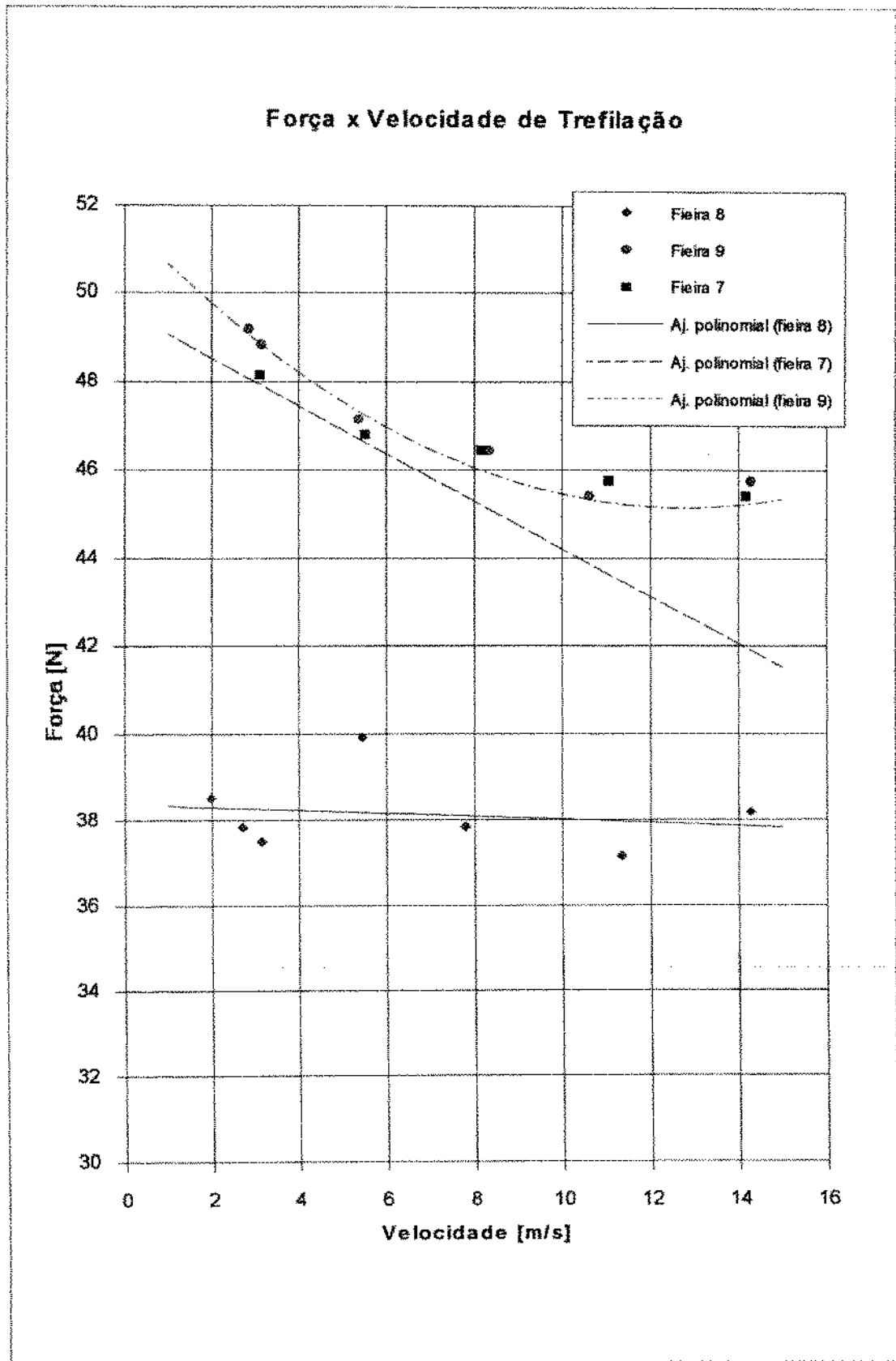


Figura V.2.3 - Influência do comprimento da região cilíndrica de calibração sobre o esforço de trefilação com óleo MJF 2.

Força x Velocidade de Trefilação

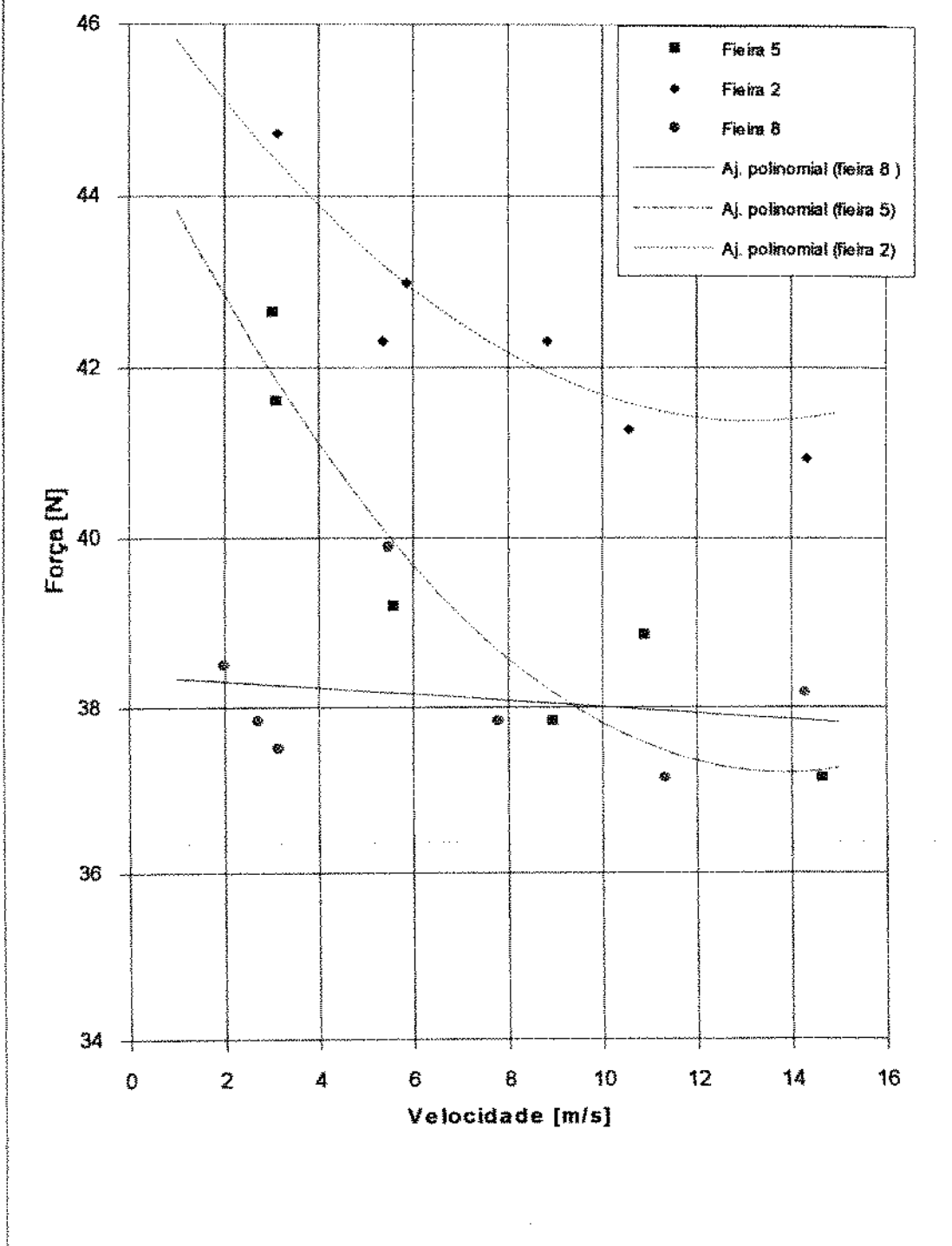


Figura V.2.4 - Influência do ângulo de trabalho 2α sobre o esforço de trefilação com óleo MJF 2.

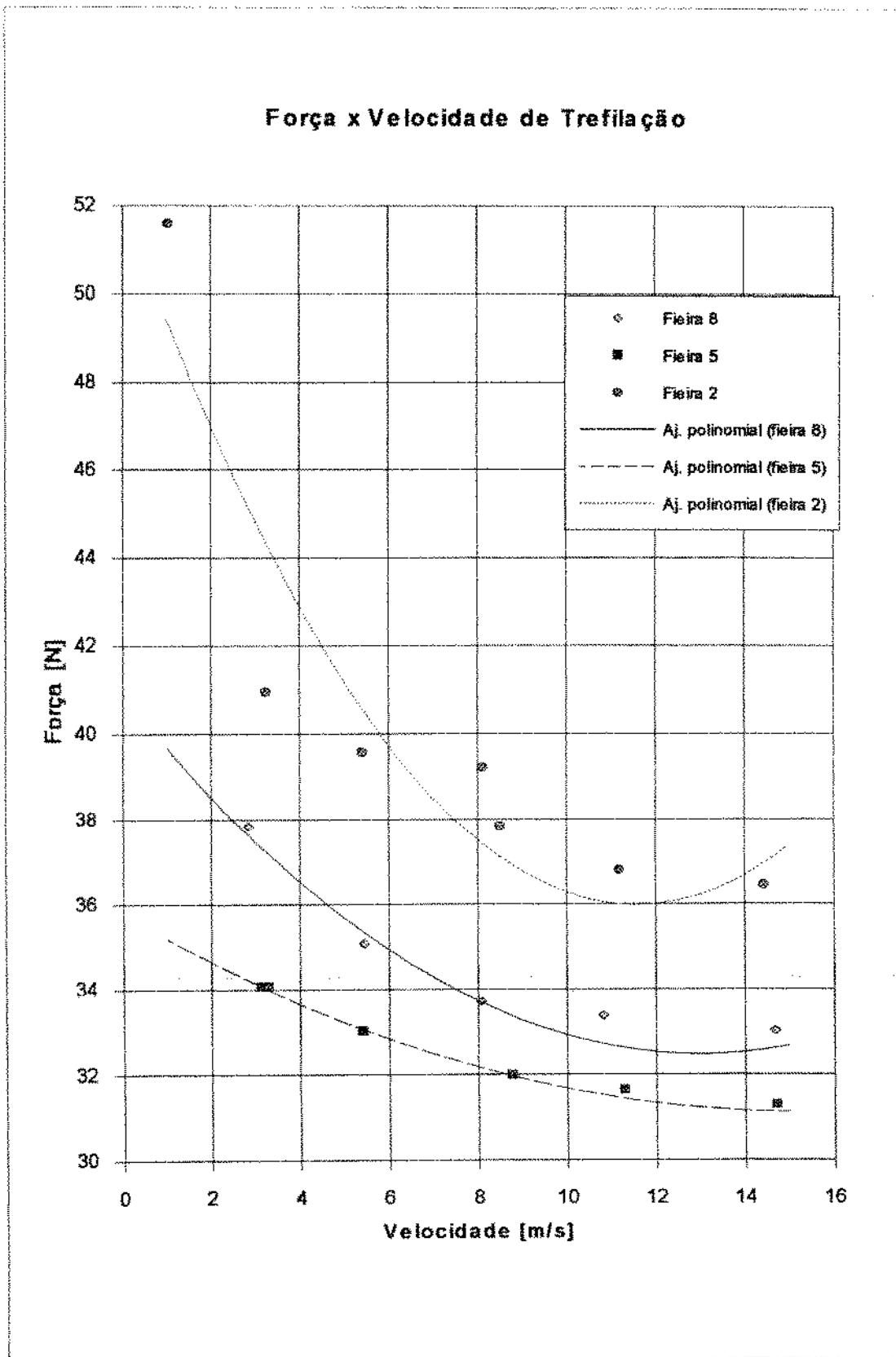


Figura V.2.5 - Influência da viscosidade do óleo lubrificante MJF 5 sobre o esforço de trefilação.

Força x Velocidade de Trefilação

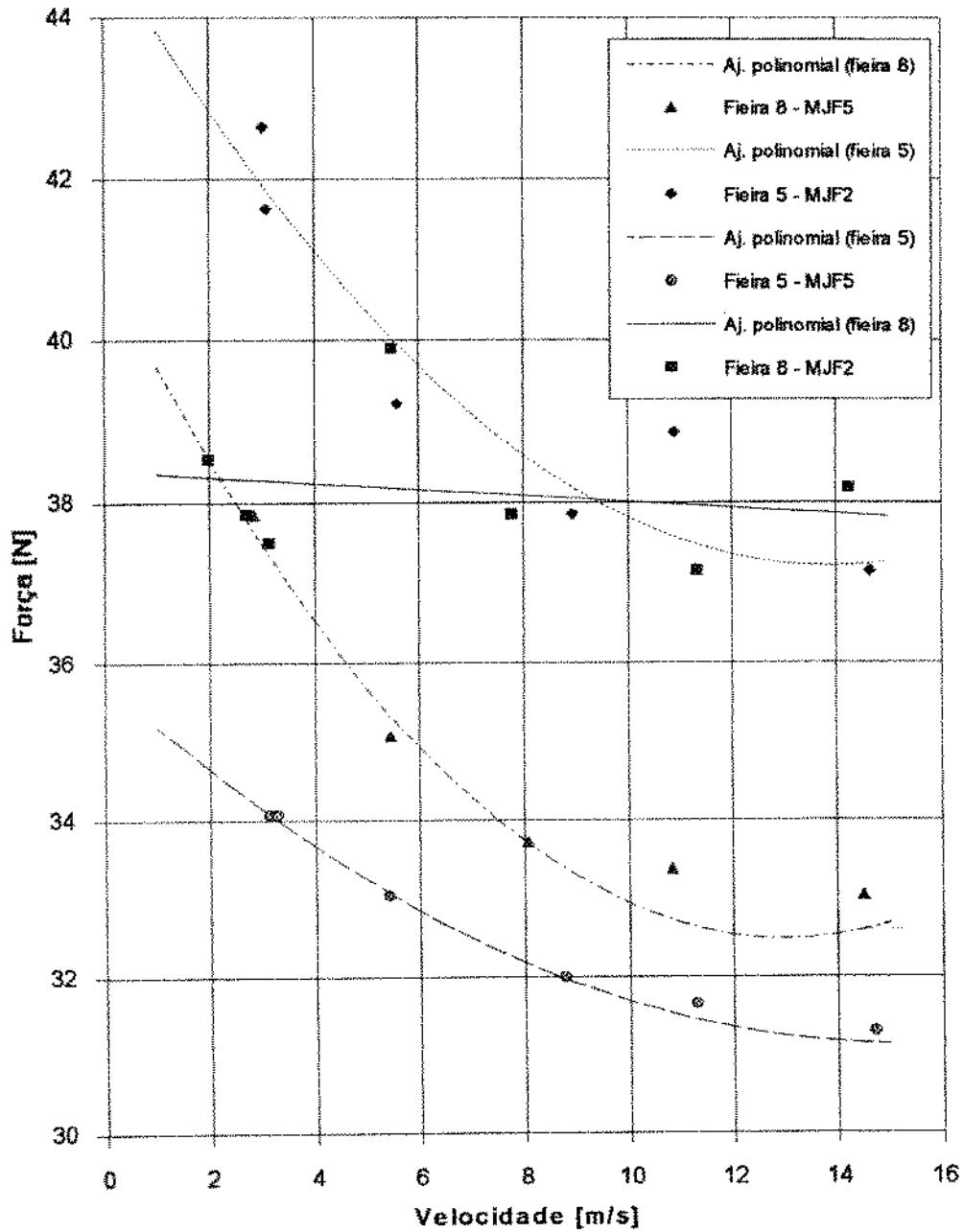


Figura V.2.6 - Melhores resultados obtidos.

Com os resultados experimentais de força de trefilação e a expressão para cálculo do coeficiente de atrito (μ) extraída do método do limite superior de Avitzur, foram calculados coeficientes de atrito para os diversos ensaios efetuados.

$$\mu = \frac{\sigma_0 \left(\frac{\sigma_{\text{m}}}{\sigma_0} + 2f(\alpha) \ln \frac{R_0}{R_f} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) \right) - \sigma_f}{2 \left(\left(\frac{L}{R_f} \sigma_f \right) - \left(\sigma_0 \left\{ (\cot \alpha) \left[1 - \frac{\sigma_{\text{m}}}{\sigma_0} - \ln \frac{R_0}{R_f} \right] \ln \frac{R_0}{R_f} + \frac{L}{R_f} \right\} \right) \right)}$$

Expressão V.2.1 - Coeficiente de atrito obtido da equação de Avitzur [25].

Para que se possa melhor analisar os resultados dessas simulações, foram feitos ajustes polinomiais de segundo grau que são apresentados junto aos valores dos coeficientes de atrito obtidos.

Da análise das figuras V.2.7 a V.2.14 verifica-se a queda do coeficiente de atrito com o aumento da velocidade de trefilação, com exceção das feiras de número 8 e 9. Ambas com 2α igual a 18° (figura V.2.10 e V.2.11).

Sobre os valores de coeficientes de atrito obtidos por simulação e observando-se a curva de Stribeck (figura III.6.3) e a análise dos regimes de lubrificação segundo Wilson [19], pode-se estimar que:

- as feiras número 2, 7, 8 e 9 na trefilação com MJF 2 apresentaram coeficientes de atrito característicos do regime de camada limite em baixas velocidades passando para regime misto em altas velocidades;
- a feira número 5 na trefilação com MJF 2 apresentou coeficientes de atrito de regime misto em todas as velocidades ensaiadas;
- as feiras números 2 e 8 na trefilação com MJF 5 apresentaram coeficientes de atrito de regime misto em baixas velocidades passando para regime hidrodinâmico em altas velocidades;
- a feira número 5 na trefilação com MJF 5 apresentou coeficientes de regime hidrodinâmico em todas as velocidades ensaiadas.

Os ensaios com o lubrificante MJF 2 (figuras V.2.7 a V.2.11) apresentam valores de coeficiente de atrito na faixa de 0,2 a 0,07 que, segundo Wilson [19], é uma condição de regime de lubrificação mista.

Os ensaios com o lubrificante MJF 5 (figuras V.2.12 a V.2.14) apresentaram valores de coeficiente de atrito na faixa de 0,17 a 0,05 que, é uma condição de regime de lubrificação variando de lubrificação mista a lubrificação hidrodinâmica, segundo Wilson [19].

Tanto com o lubrificante MJF 2 como com o MJF 5, a fieira número 5 apresentou o melhor desempenho, atingindo valores de coeficiente de atrito típicos de regime de filme espesso, segundo Wilson.

Através dos resultados da simulação verifica-se que, para as condições em que foram efetuados este trabalho, o melhor lubrificante é o que possui a maior viscosidade. Isto é, o óleo lubrificante MJF 5.

Os menores coeficientes de atrito foram alcançados pela fieira com o ângulo de trabalho (2α) igual a 14° e comprimento do cilindro de calibração igual a 35 % do diâmetro final (D_f) como pode-se observar na figura V.2.13, onde o ajuste polinomial apresenta um comportamento descendente e o coeficiente de atrito tem valores reduzidos (0,05 a 0,07) em todas as velocidades.

A queda do coeficiente de atrito até valores da ordem de 0,05 é explicada pelo aumento da velocidade e conseqüente aumento do carreamento de óleo lubrificante, para a região de deformação até atingir-se o regime de lubrificação hidrodinâmica.

Conforme se observa na curva de Stribeck (figura III.6.3) existe uma velocidade limite a partir da qual o coeficiente de atrito começa novamente a aumentar.

Esse limite não pode ser observado na faixa de velocidade em que foram efetuados os ensaios. Para isso seria preciso aumentar a velocidade, o que não foi possível devido a restrições operacionais do equipamento.

No entanto, atingiu-se o objetivo do trabalho que era otimizar a velocidade sem perda da qualidade do produto. Alcançou-se velocidades da ordem de 14 m/s, ou seja, 2 vezes maiores que as empregadas industrialmente.

A otimização não foi somente na qualidade do produto e na queda da força, mas na produtividade e economia do processo.

Os resultados obtidos contribuem para o aprimoramento do processo de trefilação na indústria brasileira, tendo em vista a falta de dados técnicos para:

- a definição do ângulo de trabalho (2α) correto das fieiras utilizadas na trefilação do aço inoxidável, e sua importância no processo de trefilação;
- a definição do comprimento da região cilíndrica de calibração (H_c) correto e, sua importância no processo de trefilação e na vida da fieira;
- a utilização do lubrificante próprio para altas velocidades e temperaturas;

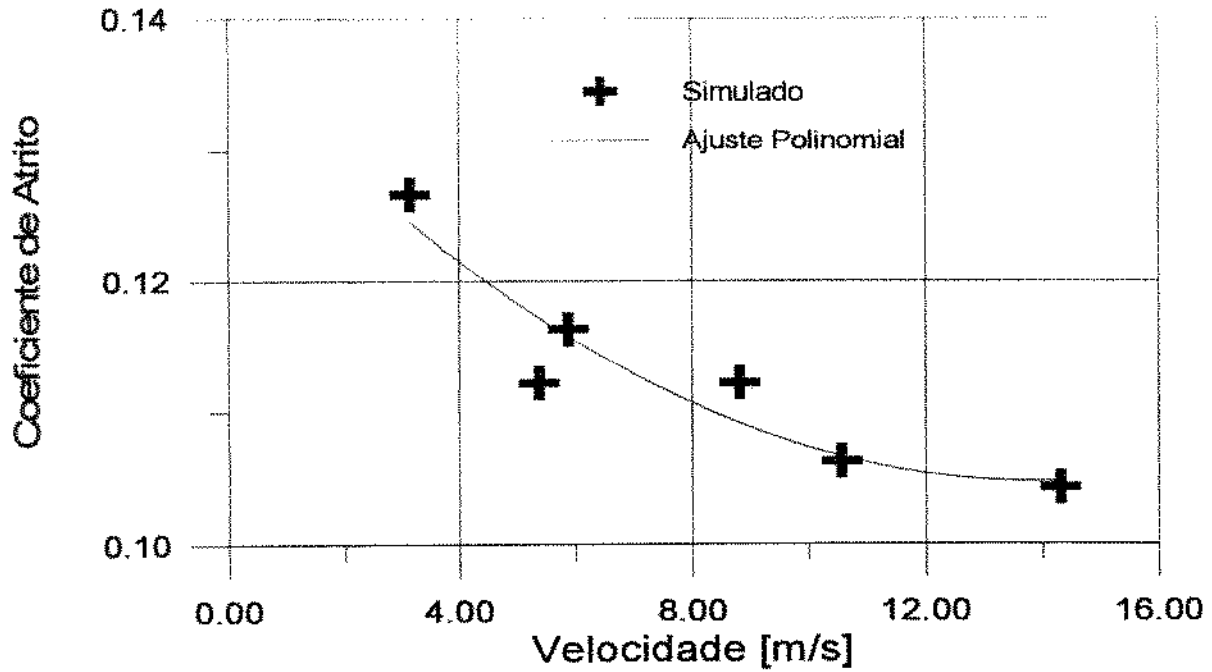


Figura V.2.7 - Coeficiente de atrito x Velocidade com óleo MJF 2 e fieira nº 2.

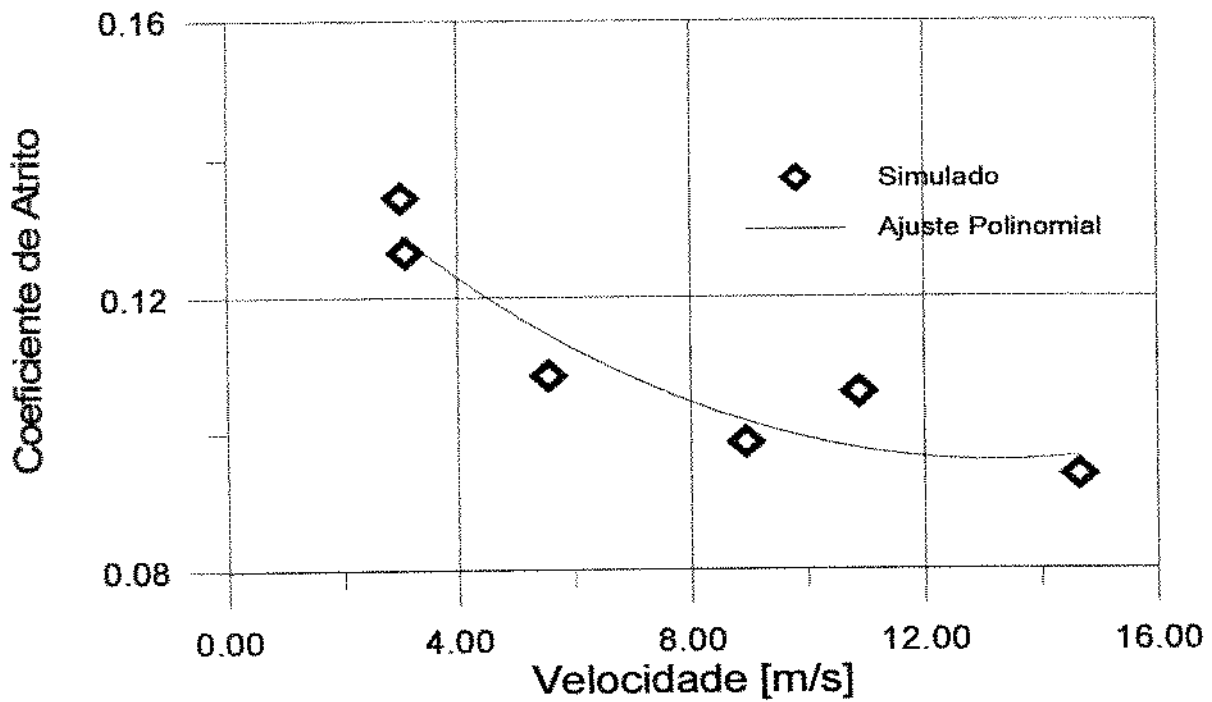


Figura V.2.8 - Coeficiente de atrito x Velocidade com óleo MJF 2 e fieira nº 5.

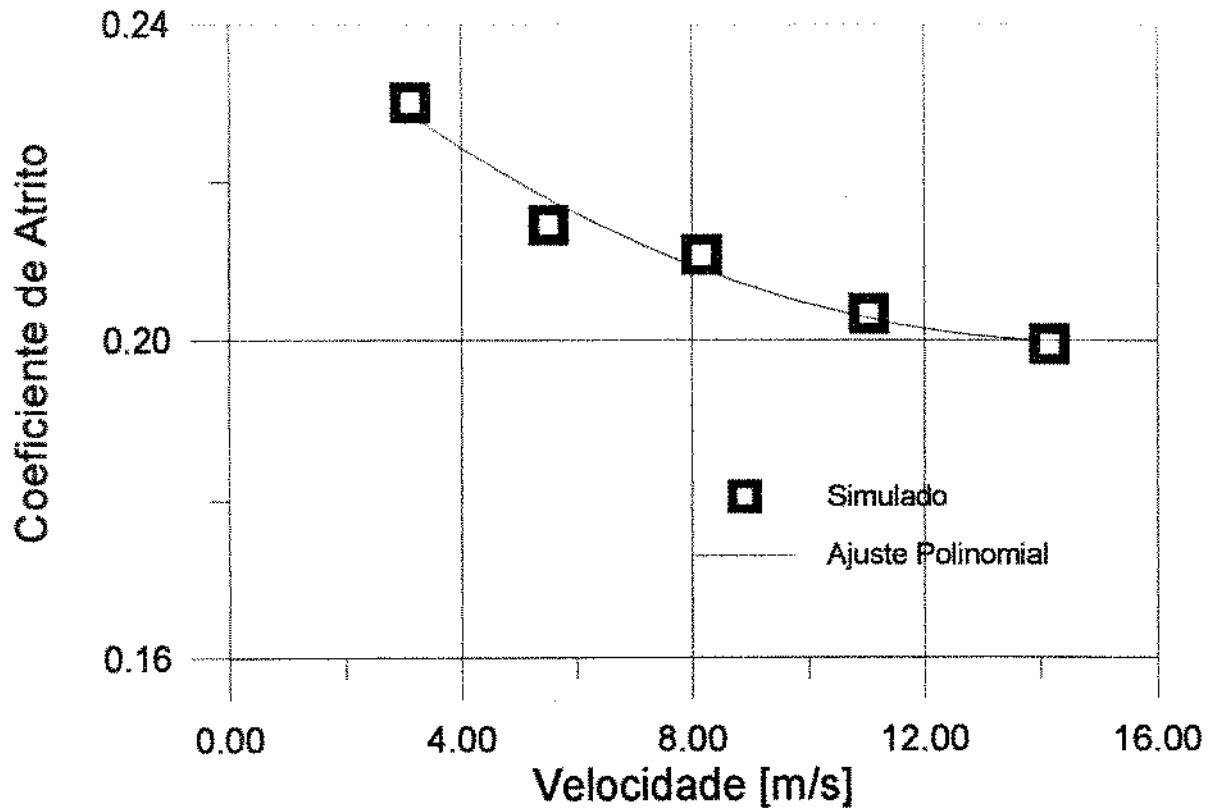


Figura V.2.9 - Coeficiente de atrito x Velocidade com óleo MJF 2 e feira nº 7.

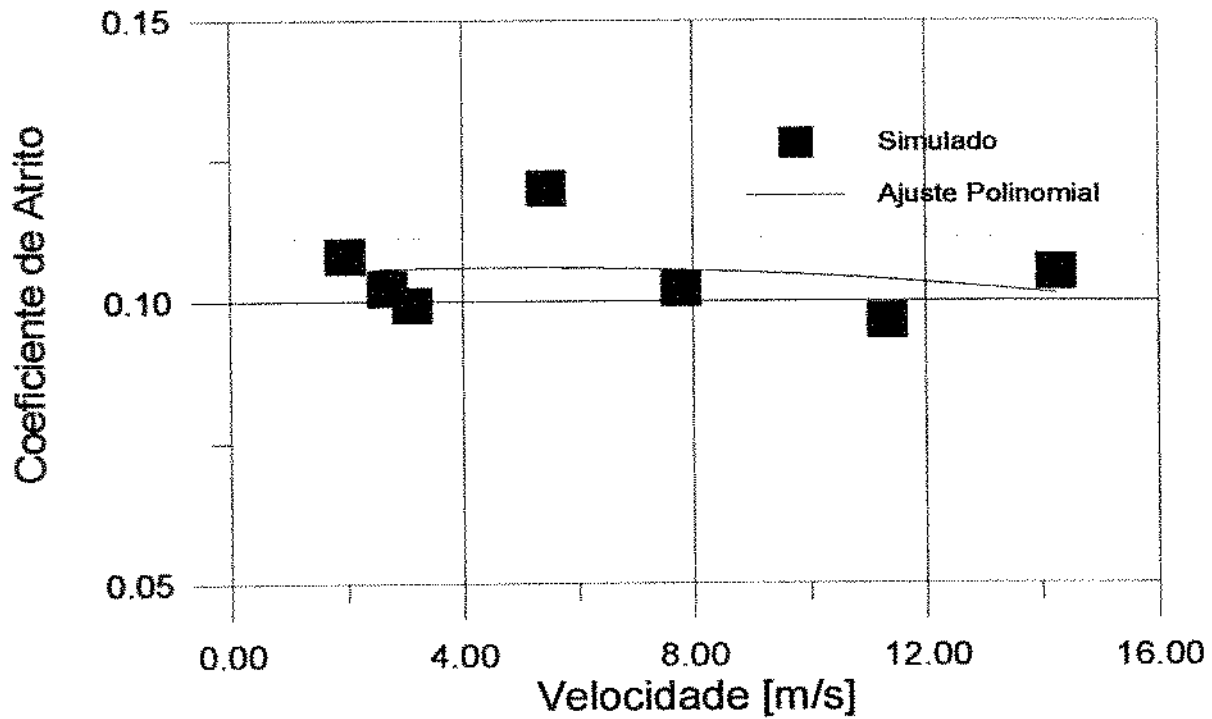


Figura V.2.10 - Coeficiente de atrito x Velocidade com óleo MJF 2 e feira nº 8.

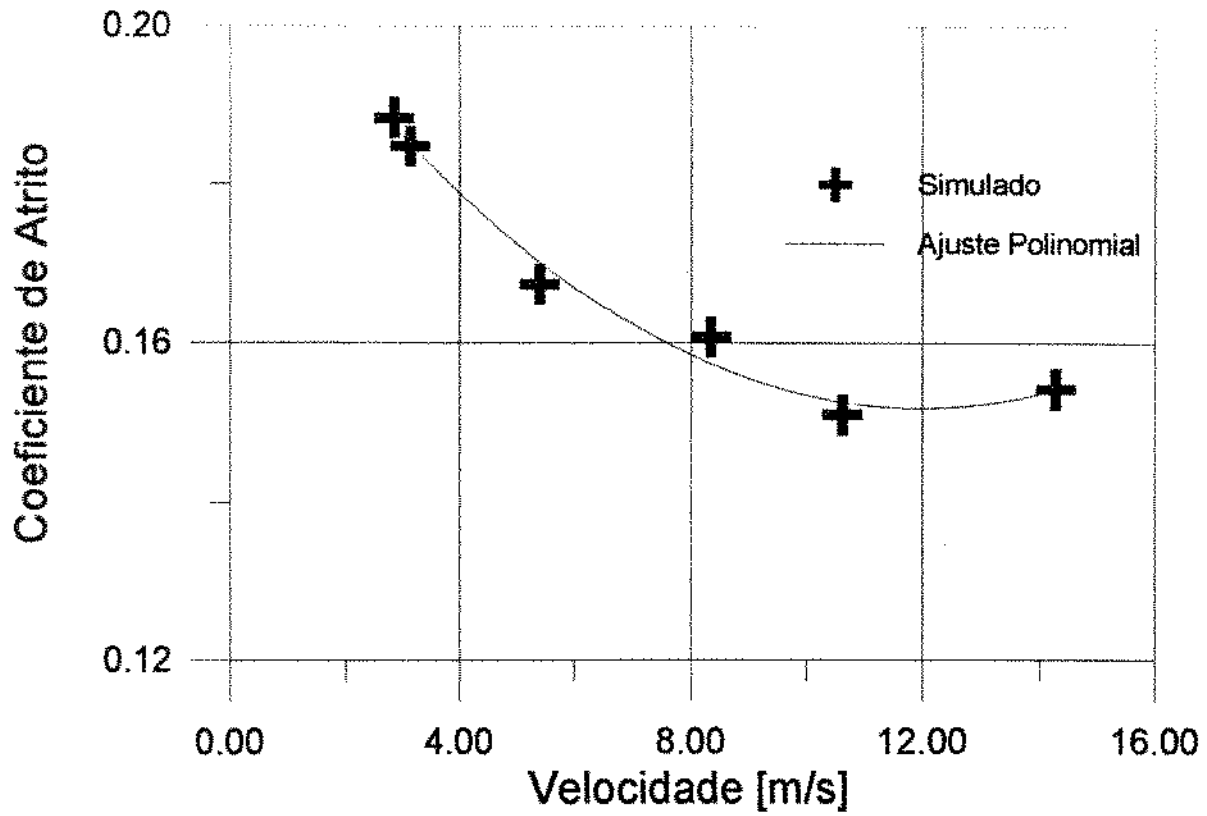


Figura V.2.11 - Coeficiente de atrito x Velocidade com óleo MJF 2 e feira nº 9.

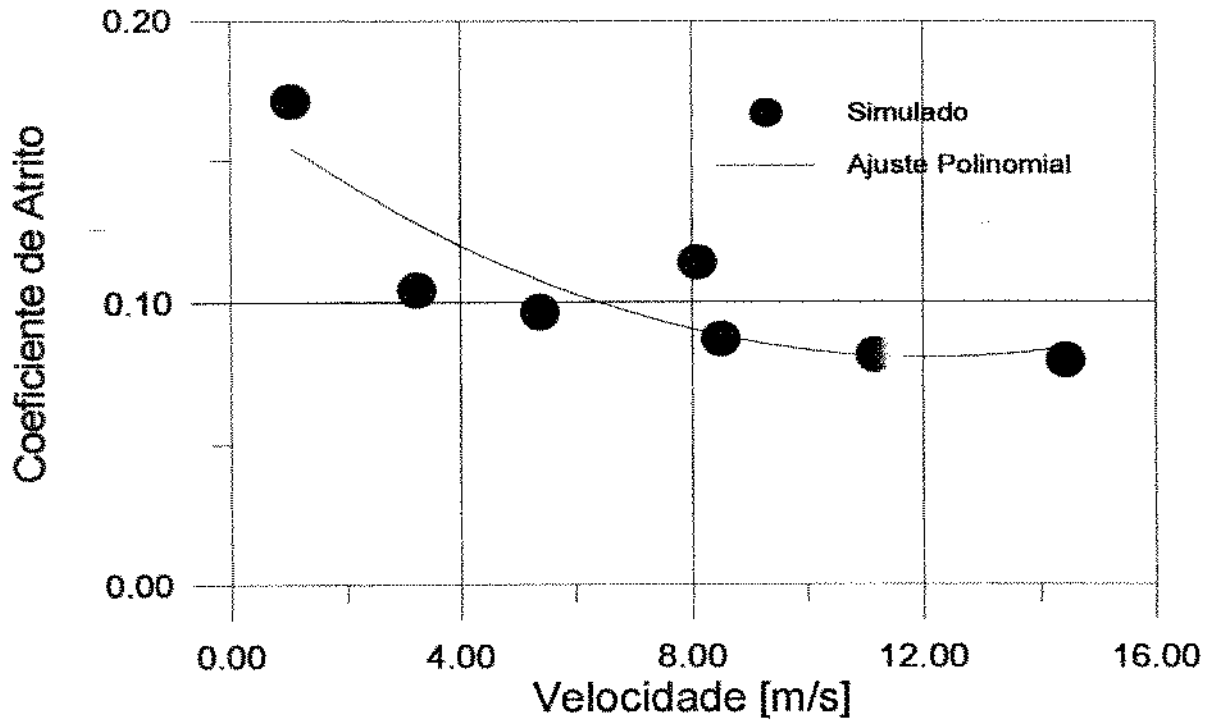


Figura V.2.12 - Coeficiente de atrito x Velocidade com óleo MJF 5 e feira nº 2.

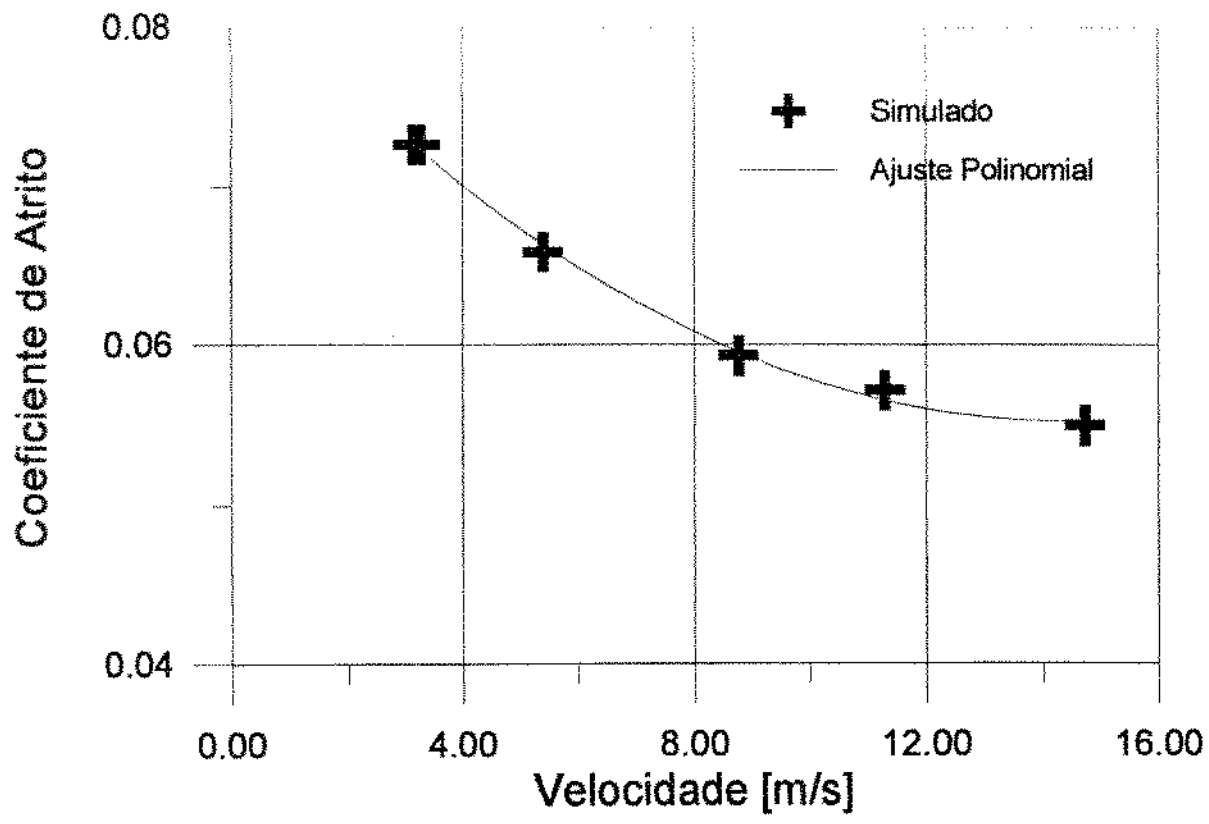


Figura V.2.13 - Coeficiente de atrito x Velocidade com óleo MJF 5 e fieira nº 5.

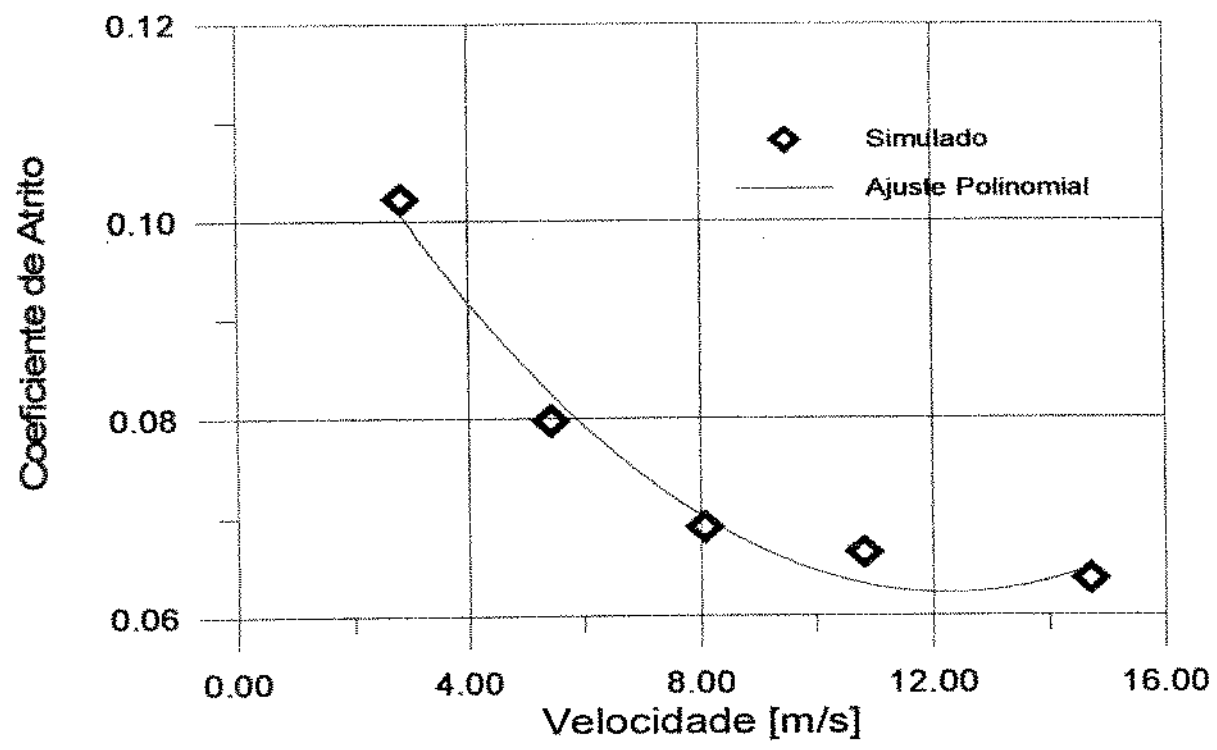


Figura V.2.14 - Coeficiente de atrito x Velocidade com óleo MJF 5 e fieira nº 8.

V.3 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS COM O PRODUTO.

Os resultados dos ensaios de tração para a determinação das propriedades mecânicas dos produtos encontram-se na tabela V.3.1.

Pela análise dessa tabela observa-se que o produto apresenta um esperado aumento da tensão de resistência a tração, resultante do encruamento sofrido devido à redução de secção transversal de 19 %.

Todos os produtos resultantes dos ensaios tiveram seus diâmetros medidos e encontram-se dentro da tolerância dimensional para este tipo de produto. Também passaram por inspeção visual e, apresentaram-se sempre retilíneos e opacos.

A falta de brilho do material trefilado demonstra que os regimes de lubrificação alcançados nos ensaios de trefilação são adequados ao processo, como visto na análise do coeficiente de atrito.

A retilineidade do produto trefilado demonstrar o acerto do alinhamento do conjugado caixa de fieira-cabrestante.

Tabela V.3.1 - Propriedades mecânicas dos produtos trefilados.

Tensão limite de resistência a tração (MPa).	930,5
Tensão de escoamento a 0,2% (MPa).	813,5
Alongamento (%).	12,5

Capítulo VI

Conclusões e Trabalhos Futuros.

VI.1 - CONCLUSÕES.

Dos resultados obtidos nos ensaios realizados e nas simulações efetuadas pode-se concluir que:

- A trefilação do aço inoxidável austenítico ABNT 304 a altas velocidades é viável.
- A tensão de trefilação depende da geometria da feira, mesmo em condições ideais de lubrificação.
- A velocidade de trefilação tem grande influência sobre a força de trefilação.
- O coeficiente de atrito depende do regime de lubrificação estabelecido que é função da rugosidade das superfícies em contato, bem como da velocidade e da geometria da ferramenta.
- Existe uma geometria ótima para cada velocidade de trefilação e óleo lubrificante.
- Existe uma região cilíndrica de calibração correta para cada material a ser trefilado.
- Óleos lubrificantes de elevada viscosidade apresentam um melhor comportamento a altas velocidades de trefilação.

VI.2 - PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.

- Estudo de vida de feiras em produção utilizando-se condições ótimas obtidas nos ensaios.
- Otimização da velocidade de trefilação para outros materiais.
- Desenvolvimento de um modelo matemático para relacionar lubrificação, velocidade e tensão de trefilação.

ÍNDICE DE FIGURAS.

Os números romanos indicam o capítulo onde se encontra a figura e, a numeração ordinal indica a seqüência dentro do capítulo.

- Figura II.3.1 - Efeito do teor de Cr sobre o campo austenítico.
Figura II.3.2 - Secções uniformes dos diagramas Fe-Cr-Ni com vários teores de cromo.
Figura II.3.3 - Diagrama Fe-C com diferentes % de Cr.
Figura II.3.4 - Efeito do Ni sobre a constituição de uma liga com 18 % de Cr e do Cr sobre uma liga com 8 % de Ni.
Figura II.3.6 - Diagrama Fe-Cr com diferentes porcentagens de C.
Figura II.4.1 - Propriedades do aço inoxidável ABNT 310 encruado.
Figura II.4.2 - Curva tensão-deformação de aços inoxidáveis austeníticos.
- Figura III.3.1 - Seqüência de etapas para processamento de fios trefilados.
Figura III.4.1.a - Forno de recozimento contínuo.
Figura III.4.1.b - Forno de campânula.
Figura III.5.1 - Fluxograma de decapagem.
Figura III.6.1 - Representação das superfícies vistas ao microscópio.
Figura III.6.2 - Representação dos regimes de lubrificação em processos de conformação.
Figura III.6.3 - Curva de Stribeck.
Figura III.7.1 - Representação dos ângulos dos cones e da altura e diâmetro do cilindro de calibração.
Figura III.7.2 - Ângulos ótimos e cilindros de calibração para vários aços.
Figura III.7.3 - 2α e H_c em relação ao material a trefilar.
Figura III.7.4 - Fieiras com ângulo do cone de trabalho diferentes.
Figura III.7.5 - Linha de encontro.
- Figura IV.2.2.1 - Trefiladora monobloco.
Figura IV.2.2.2 - Sistema de suporte deslizante da caixa de fieira.
Figura IV.2.2.3 - Curva de calibração da célula de carga.
Figura IV.2.2.4 - Fieira.
- Figura V.2.3 - Influência do comprimento da região cilíndrica de calibração sobre o esforço de trefilação com óleo MJF 2.
Figura V.2.4 - Influência do ângulo de trabalho 2α sobre o esforço de trefilação com óleo MJF 2.
Figura V.2.5 - Influência da Viscosidade do óleo lubrificante MJF 5 sobre o esforço de trefilação.
Figura V.2.6 - Melhores resultados obtidos.

- Figura V.2.7 - Coeficiente de atrito x velocidade com óleo MJF 2 e fieira número 2.
Figura V.2.8 - Coeficiente de atrito x velocidade com óleo MJF 2 e fieira número 5.
Figura V.2.9 - Coeficiente de atrito x velocidade com óleo MJF 2 e fieira número 7.
Figura V.2.10 - Coeficiente de atrito x velocidade com óleo MJF 2 e fieira número 8.
Figura V.2.11 - Coeficiente de atrito x velocidade com óleo MJF 2 e fieira número 9.
Figura V.2.12 - Coeficiente de atrito x velocidade com óleo MJF 5 e fieira número 2.
Figura V.2.13 - Coeficiente de atrito x velocidade com óleo MJF 5 e fieira número 5.
Figura V.2.14 - Coeficiente de atrito x velocidade com óleo MJF 5 e fieira número 8.

ÍNDICE DE TABELAS.

Os números romanos indicam o capítulo onde se encontra a tabela e, a numeração ordinal indica a seqüência dentro do capítulo.

Tabela II.2.1 - Aços inoxidáveis ferríticos.

Tabela II.2.2 - Aços inoxidáveis martensíticos.

Tabela II.2.3 - Aços inoxidáveis austeníticos- família 200.

Tabela II.2.4 - Aços inoxidáveis austeníticos - família 300.

Tabela II.4.1 - Composição química dos aços Villares.

Tabela II.4.2 - Influência do conteúdo de carbono nas características dos aços tipo 18-8.

Tabela II.4.3 - Influência do conteúdo de níquel, tungstênio e molibdênio nas características dos aços austeníticos.

Tabela II.5.1 - Composição química do aço ABNT 304.

Tabela II.5.2 - Propriedades de tração à temperatura ambiente de arames estirados a frio.

Tabela II.5.3 - Propriedades de tração a temperatura ambiente de arames recozidos.

Tabela II.5.4 - Sugestão de tratamento de alívio de tensão.

Tabela III.5.1 - Banhos mais comuns na decapagem.

Tabela III.7.1 - Características de feiras de metal duro.

Tabela III.7.2 - Recomendações de material para feira de trefilação.

Tabela III.7.3 - Valores do ângulo de trabalho de acordo com o material a ser trefilado.

Tabela III.7.4 - Linha de encontro para feiras com 90° de ângulo de saída para selecionar o comprimento da área cilíndrica de calibração.

Tabela IV.2.2.1 - Ponte e registrador - informações complementares.

Tabela IV.2.2.2 - Resultados da simulação para definição da geometria do conjunto de feiras.

Tabela IV.2.2.3 - Classe de metal duro Brassinter para trefilação e estiramento.

Tabela IV.2.2.4 - Composição da geometria das feiras.

Tabela IV.2.2.5 - Características dos lubrificantes.

Tabela V.1.1 - Propriedades mecânicas da matéria-prima.

Tabela V.2.1 - Valores médios e desvios-padrão de cada ensaio.

Tabela V.3.1 - Propriedades mecânicas dos produtos trefilados.

ÍNDICE DE EXPRESSÕES.

Os números romanos indicam o capítulo onde se encontra a expressão e, a numeração ordinal indica a seqüência dentro do capítulo.

Expressão III.7.1 - Equação do método do limite superior desenvolvido por Avitzur.

Expressão V.2.1 - Coeficiente de atrito obtido da equação de Avitzur.