

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DE LUBRIFICANTES
ALTERNATIVOS PARA O
PROCESSO DE EXTRUSÃO A FRIO DE
AÇOS PARA CEMENTAÇÃO**

Autor: **Celio Caminaga**
Orientador: **Prof. Dr. Sérgio Tonini Button**

07/03

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

**ESTUDO DE LUBRIFICANTES
ALTERNATIVOS PARA O
PROCESSO DE EXTRUSÃO A FRIO DE
AÇOS PARA CEMENTAÇÃO**

Autor: **Celio Caminaga**
Orientador: **Prof. Dr. Sérgio Tonini Button**

Curso: Engenharia Mecânica
Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Dissertação de Mestrado Acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2003
S.P. – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

C146e Caminaga, Celio
Estudo de lubrificantes alternativos para o processo
de extrusão a frio de aços para cementação. / Celio
Caminaga.--Campinas, SP: [s.n.], 2003.

Orientador: Sérgio Tonini Button.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Extrusão. 2. Lubrificantes. 3. Aço. 4.
Conformação dos metais. 5. Zinco. I. Button, Sérgio
Tonini. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**ESTUDO DE LUBRIFICANTES
ALTERNATIVOS PARA O
PROCESSO DE EXTRUSÃO A FRIO DE
AÇOS PARA CEMENTAÇÃO**

Autor: **Celio Caminaga**

Orientador: **Prof. Dr. Sérgio Tonini Button**

Prof. Dr. Sérgio Tonini Button
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

Prof. Dr. Iris Bento da Silva
Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP

Campinas, 30 de julho de 2003

Dedicatória:

Ao Deus da minha vida, que sempre me guia e me permitiu chegar até aqui. Obrigado por todas as graças que me dá diariamente. Que cada batida do meu coração renove o hino de agradecimento que eu dirijo a Vós Senhor.

A Raquel, minha querida esposa, que me incentivou e apoiou desde do início, sempre com muita compreensão, paciência e ajuda em todos os momentos.

Aos meus pais, Domingos e Edina (*in memoriam*) por tudo o que sempre fizeram por mim, por todo amor e carinho.

A Sebastiana A. Silva Caminaga, por todo incentivo e apoio.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Sérgio Tonini Button, meu orientador, pela acolhida e convivência, onde aprendi muito sobre Pesquisa e como deve ser um profissional de caráter e competência, respeitando a todos.

À Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) – UNICAMP, pela acolhida e oportunidade de aperfeiçoamento profissional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa que me foi concedida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo auxílio financeiro que permitiu a boa execução desta pesquisa e submissão dos resultados em Congresso (Proc. 2002/03002-0).

Aos professores do Departamento de Materiais (DEMA), pela convivência, formação e disponibilidade a qualquer tempo.

Aos amigos Ângelo Caporalli Filho, Daniel Villas Bôas, Fernando César Gentile, Frederico Ozanan Neves, Mário Nunes da Silva, Wilian Regone e Wyser J. Yamakami, pela ajuda, apoio e discussões dos resultados, que sempre colaboraram para o enriquecimento deste trabalho.

Aos amigos Antônio, Carmo e Suzi, pela ajuda e amizade.

Ao Sr. Pompeu, técnico do Departamento de Engenharia de Petróleo, pelos ensaios realizados, que contribuíram para este trabalho.

Ao técnico Geraldo, pelo empenho na preparação dos corpos de prova e ajustagem das peças para montagem do ferramental de extrusão.

Aos técnicos do Laboratório de Caracterização de Materiais – DEMA – FEM, Claudinete, Jiomar, José Luiz, Sérgio e Rita, pela ajuda e disponibilidade que sempre demonstraram.

Ao secretário do DEMA – FEM, Daniel, pela eficiência prestada sempre que solicitado.

À FUCHS do Brasil S/A., que gentilmente cedeu os lubrificantes líquidos utilizados nesse trabalho.

À Polimec, que de maneira prestativa, providenciou o revestimento de fosfatização de zinco sobre os corpos de prova.

Resumo

CAMINAGA, Celio, *Estudo de Lubrificantes Alternativos para o Processo de Extrusão a Frio de Aços para Cementação*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 91 p. Dissertação (Mestrado).

A lubrificação é muito importante na extrusão a frio de aços, principalmente em relação à redução das forças de extrusão e do desgaste das ferramentas. Os processos de lubrificação utilizados nas indústrias de conformação consomem muito tempo, apresentam custos elevados e podem causar impacto importante ao meio ambiente. Geralmente essa lubrificação é representada pelas camadas de fosfato (zinco ou magnésio) adicionadas aos tarugos e associadas a um sabão de estearato de sódio ou de cálcio. Também podem estar associadas a um lubrificante à base de bissulfeto de molibdênio (MoS_2). A proposta deste trabalho é desenvolver um processo alternativo de lubrificação para extrusão a frio associado a lubrificantes, também alternativos, que sejam menos poluentes e apresentem resultados similares em termos de força de extrusão. Para tanto, foram analisados quatro lubrificantes (*Renoform MZA20*, *Extrudoil 319MOS*, *sabão em pó e farinha de trigo*) e empregados dois procedimentos de lubrificação (*imersão e hidrostático*). Os testes estatísticos aplicados aos resultados dos ensaios indicaram os processos e lubrificantes que podem ser utilizados como alternativa em substituição aos atualmente empregados, e que apresentaram resultados de força de extrusão e qualidade dos produtos extrudados semelhantes aos obtidos na indústria com a lubrificação convencional. Concluiu-se que para apenas um estágio de deformação, o melhor lubrificante foi a *farinha de trigo* e para dois estágios de deformação, o lubrificante que se mostrou mais satisfatório no segundo estágio foi o *Renoform MZA20*.

Palavras Chave:

- extrusão a frio, lubrificantes, fosfatização, aço.

Abstract

CAMINAGA, Celio, *Study of Alternative Lubricants to the Cold Extrusion of Steel Shafts for Carburization*, Campinas: School of Mechanical Engineering, State University of Campinas, 2003. 91 p. Dissertation (Master Degree).

Lubrication is very important in the cold extrusion of steels, mainly regarding to the reduction of the extrusion load and the tool wear. Lubrication processes used in the industries are time consuming and present high costs and important environment impact. The lubricant is generally represented by layers of phosphate (zinc or magnesium) coated to the billet and associated with soaps of sodium or calcium stearates. Those layers can also be associated with MoS₂ lubricant. The proposal of this work is to develop an alternative lubrication process to the cold extrusion associated to lubricants, which are alternative too, less pollutant and that present similar results in terms of extrusion load and product quality. Therefore, four lubricants were analyzed (*Reniform MZA20, Extrudoil 319MOS, powder soap and wheat flour*) and two lubrication processes were applied (*immersion and hydrostatic*). Statistical methods applied to the results of the experimental tests indicated that some processes and lubricants could be used as substitutes for common lubricants used in industry, since they presented results of extrusion load and product quality similar to those obtained in the industry with the conventional lubrication. It was found that for just one deformation stage, the best lubricant was the *wheat flour* and for two deformation stages, *Reniform MZA20* was the best lubricant for the second stage.

Keywords:

- cold extrusion, lubricants, phosphatization, steel.

Sumário

Capítulo 1 - Introdução	1
Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica	4
2.1 Os Processos de Extrusão a Frio e seus Produtos	4
2.2 Aços para Extrusão a Frio	13
2.3 A Lubrificação na Extrusão a Frio	15
2.4 Problemas Ambientais que podem ser Causados pelos Tratamentos na Lubrificação	20
2.5 Os Regimes de Lubrificação na Extrusão e Alternativas para Lubrificantes	21
Capítulo 3 - Procedimento Experimental	28
3.1 Especificação dos Tarugos	28
3.1.1 Composição Química	28
3.1.2 Condição Metalúrgica e Propriedades Mecânicas	28
3.1.3 Acabamento Superficial	31
3.1.4 Tratamento Superficial	32
3.1.5 Dimensões	32
3.2 Escolha dos Lubrificantes	36
3.3 Projeto do Ferramental	37
3.4 Planejamento Experimental	41
3.4.1 Determinação do Tamanho da Amostra	41
3.4.2 Planejamento Fatorial	42
3.4.3 Planejamento Aleatorizado por Níveis	43
3.5 Ensaios	43
3.5.1 Ensaios com a Matéria-Prima	43

3.5.2	Ensaio com o Tarugo	44
3.5.3	Ensaio com os Lubrificantes	44
3.5.4	Ensaio de Extrusão	44
3.5.5	Ensaio com os Tarugos Extrudados	48
Capítulo 4 - Apresentação e Discussão dos Resultados		50
4.1	Ensaio com a Matéria prima, Tarugo e o Lubrificante	50
4.1.1	Matéria Prima	50
4.1.2	Tarugo	54
4.1.3	Lubrificantes	54
4.2	Primeiro Estágio de Deformação	55
4.2.1	Ensaio de Extrusão	55
4.2.2	Análise Estatística	58
4.2.3	Análise Gráfica	62
4.3	Segundo Estágio de Deformação	70
4.3.1	Ensaio de Extrusão	70
4.3.2	Análise Estatística	71
4.3.3	Análise Gráfica	73
4.4	Ensaio com os Produtos Extrudados	78
4.4.1	Ensaio Dimensional	78
4.4.2	Ensaio de Rugosidade Superficial	81
4.5	Considerações Finais	83
Capítulo 5 - Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros		85
5.1	Conclusões	85
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	86
Referências Bibliográficas		87
Anexo A		A-1
Anexo B		B-1
Anexo C		C-1
Anexo D		D-1

Lista de Figuras

2.1	Extrusão direta maciça.	6
2.2	Extrusão direta com rebaixado.	6
2.3	Extrusão inversa maciça.	7
2.4	Extrusão inversa com rebaixado.	7
2.5	Extrusão lateral maciça.	7
2.6	Extrusão lateral com rebaixado.	7
2.7	Esquema de uma extrusão livre.	8
2.8	Montagem convencional da ferramenta de extrusão.	8
2.9	Tarugos e produtos usinado e extrudado. a) Tarugo para usinagem; b) Produto usinado; c) Tarugo para extrusão; d) Produto extrudado (SCHULER, 1998).	9
2.10	Produtos extrudado e soldado: a) Extrudado; b) Soldado (SCHULER, 1998).	10
2.11	Economia de matéria prima para eixos extrudados a frio: a) Típico eixo usinado; b) Eixo extrudado a frio proposto (ASM, 1975).	10
2.12	Produtos obtidos por processos de deformação plástica: a frio, morno e quente. (SCHULER, 1998).	12
2.13	Formas possíveis na extrusão a frio (ASM, 1975).	12
2.14	Produtos extrudados a frio (ASM, 1975).	13
2.15	Micrografia de uma superfície revestida com fosfato de zinco (DUBAR et al., 1998).	18
2.16	Seqüências de operações possíveis para a fosfatização de zinco ou magnésio (DONOFRIO, 2000).	19
2.17	Regimes de lubrificação (WILSON, 1979).	23
2.18	Diagrama μ x S (CHO et al., 2000).	24

3.1	Processo de tratamento térmico de recozimento #1 – recozimento pleno (Recomendado pela Gerdau, s.d.).	30
3.2	Processo de tratamento térmico de recozimento #2 – recozimento convencional.	30
3.3	Morfologia da superfície do tarugo recartilhado.	31
3.4	Tensão x Deformação (verdadeira).	34
3.5	Dimensões iniciais do tarugo.	36
3.6	Dimensões finais do tarugo (1º passe de extrusão).	36
3.7	Esquema geral de montagem da ferramenta na prensa.	38
3.8 (a)	Desenho de Montagem do Conjunto da Ferramenta de Extrusão.	39
3.8 (b)	Montagem do Conjunto da Ferramenta de Extrusão sobre a mesa da prensa.	40
3.9	Faixa tolerada para as amostras.	42
3.10	Sistema de aquisição de dados: a) Célula de carga; b) Conjunto da ferramenta de extrusão; c) Spider8.	48
4.1	Curva $\sigma_x \epsilon$ de Engenharia (Recozido Pleno).	51
4.2	Curva $\sigma_x \epsilon$ Verdadeira (Recozido Pleno).	51
4.3	Curva $\sigma_x \epsilon$ de Engenharia (Normalizado).	51
4.4	Curva $\sigma_x \epsilon$ Verdadeira (Normalizado).	51
4.5	Secção transversal do material "normalizado".	53
4.6	Secção transversal do material "recozido pleno" (Processo 01).	53
4.7	Curva de força (1º estágio): <i>Renoform MZA20</i> – normalizado – recartilhado.	63
4.8	Curva de força (1º estágio): <i>Renoform MZA20</i> – recozido pleno– laminado.	64
4.9	Curva de força (1º estágio): <i>Renoform MZA20</i> – recozido pleno – recartilhado.	65
4.10	Curva de força (1º estágio): <i>sabão em pó</i> – normalizado – recartilhado.	66
4.11	Curva de força (1º estágio): <i>farinha de trigo</i> – normalizado – recartilhado.	67
4.12	Curva de força (1º estágio): <i>farinha de trigo</i> – recozido convencional – laminado.	68
4.13	Curva de força (1º estágio): <i>farinha de trigo</i> – recozido convencional – recartilhado.	69
4.14	Recalque : <i>Renoform MZA20</i> – normalizado – recartilhado (2º Estágio).	72
4.15	Recalque : <i>Renoform MZA20</i> – recozido pleno – recartilhado (2º Estágio).	72
4.16	Curva de força (2º estágio): <i>Renoform MZA20</i> – recozido pleno – laminado.	74

4.17	Curva de força (2º estágio): <i>sabão em pó</i> – normalizado – recartilhado.	75
4.18	Curva de força (2º estágio): <i>farinha de trigo</i> – normalizado – recartilhado.	76
4.19	Curva de força (2º estágio): <i>farinha de trigo</i> – recozido convencional – laminado.	77
4.20	Peças extrudadas após segundo estágio: a) Lubrificante <i>farinha de trigo</i> ; b) Lubrificante Líquido (MoS ₂).	78
4.21	Posições de medição sobre o tarugo extrudado.	79

Lista de Tabelas

2.1	Características dos produtos de diferentes condições do processo de deformação (SCHULER, 1998).	5
2.2	Quantidade de peças economicamente viável para o processo de extrusão a frio (SCHULER, 1998).	5
2.3	Aços para extrusão a frio e cementação (BILLIGMANN & FELDMANN, 1979).	14
3.1	Composição Química do aço AISI 8620 (METALS HANDBOOK, 1990).	28
3.2	Propriedades mecânicas do aço AISI 8620 (MATWEB, 2002).	29
3.3	Parâmetros do processo de tratamento térmico de recozimento.	30
3.4	Lista de peças e acessórios do conjunto de ferramenta de extrusão.	40
3.5	Condições dos Ensaios de extrusão (● não foi realizado o ensaio).	45
4.1	Resultados dos ensaios mecânicas no aço SAE 8620.	51
4.2	Resultados dos ensaios de dureza aço SAE 8620.	52
4.3	Composição química em porcentagem de peso do aço SAE 8620.	52
4.4	Rugosidade superficial média (Ra).	54
4.5	Resultados da força de extrusão para o material normalizado (10^4 N).	56
4.6	Resultados da força de extrusão para o material recozido (10^4 N) – *recozimento pleno; **recozimento convencional.	57
4.7	Resultados da força de extrusão com a utilização do fosfato de zinco – padrão de referência (10^4 N).	58
4.8	Resultados experimentais – força de extrusão média.	61
4.9	Resultados experimentais – força de extrusão máxima (2º estágio de deformação).	70

4.10	Resultados experimentais – força de extrusão média (2º estágio de deformação).	71
4.11	Resultados dimensional – primeiro estágio.	80
4.12	Resultados dimensional – segundo estágio.	81
4.13	Resultados da rugosidade superficial média (Ra) – primeiro estágio.	82
4.14	Resultados da rugosidade superficial média (Ra) – segundo estágio.	83

Nomenclatura

Letras Latinas

A_{tarugo}	Área do tarugo	[mm ²]
C_1	Carbono equivalente	[%]
D_f	Diâmetro final	[mm]
D_i	Diâmetro inicial	[mm]
E	Módulo de elasticidade do aço	[N/mm ²]
F	Ferramenta	[]
$f(\alpha)$	Fator de forma para o ângulo do cone da matriz	[]
F_{ext}	Força de extrusão	[N]
I	Momento de inércia da seção transversal	[mm ⁴]
IT	Qualidade dimensional	[]
k	Coefficiente de resistência	[]
L	Comprimento não sujeito a flambagem	[mm]
\underline{L}	Lubrificante	[]
L'	Comprimento do anel de calibração	[mm]
L_0	Comprimento inicial do tarugo	[mm]
L_e	Comprimento de flambagem	[mm]
n	Número de réplicas	[]
n'	Coefficiente de escoamento	[]
P	Peça	[]
P_{cr}	Carga crítica	[N]
R	Réplica	[]

Ra	Rugosidade superficial média	[μm]
R _f	Raio final do tarugo	[mm]
R _i	Raio inicial do tarugo	[mm]
s	Fator de segurança	[]
S	Desvio padrão da média das réplicas	[]
T	Temperatura	[°C]
t	Tempo	[h]
U	Velocidade	[mm/s]

Letras Gregas

α	Ângulo do cone da matriz	[rad.]
δ	Intervalo de confiança	[]
σ	Tensão	[MPa]
ε	Deformação	[%]
μ	Coeficiente de atrito	[]
$\bar{\mu}$	Média geral	[]
η	Viscosidade do lubrificante	[mm ² /s]
σ_{0M}	Tensão média de escoamento do material normalizado	[MPa]
σ_{ext}	Tensão de extrusão	[MPa]
ε_f	Deformação verdadeira para a redução de área no passe	[]

Resumo dos Capítulos

Capítulo 1 – Descrevem-se os objetivos e as justificativas para o desenvolvimento deste trabalho.

Capítulo 2 – Apresenta-se a revisão bibliográfica sobre os processos de extrusão a frio, seus produtos e os aços extrudados industrialmente. Também se aborda a lubrificação atualmente utilizada na indústria e os potenciais problemas ambientais a ela associados.

Capítulo 3 – Descreve-se o procedimento experimental adotado para a especificação do tarugo inicial, escolha dos lubrificantes, projeto do ferramental, planejamento estatístico e ensaios de extrusão.

Capítulo 4 – Apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos com a análise da matéria-prima, dos tarugos e dos lubrificantes. Analisa-se estatisticamente e graficamente os resultados dos ensaios de extrusão. Também se avaliam os produtos extrudados em termos de qualidade dimensional e acabamento superficial.

Capítulo 5 – Apresentam-se as conclusões extraídas a partir da análise das variáveis de influência estudadas neste trabalho. Apontam-se quais foram os melhores lubrificantes para cada estágio de deformação e sugerem-se propostas para trabalhos futuros.

Esta dissertação de Mestrado Acadêmico gerou um trabalho que foi submetido e está sendo avaliado para apresentação no COBEM/2003 (Congresso Brasileiro de Mecânica), a ser realizado no mês de outubro deste ano em São Paulo.

Capítulo 1

Introdução

O processo de extrusão a frio de aços é altamente importante para a manufatura industrial, devido à ótima qualidade dimensional, geométrica e superficial dos produtos obtidos. Por se tratar de deformação a frio de peças de aço, esse processo requer uma alta quantidade de energia mecânica, que leva ao forte contato da peça com as ferramentas e que pode prejudicar o efeito dos lubrificantes normalmente utilizados na indústria.

A lubrificação tem um papel muito importante na extrusão a frio de aços, desde que lubrificantes eficientes previnam o contato metálico direto entre a peça extrudada e as ferramentas, com significativa redução das forças de extrusão e do desgaste dessas ferramentas.

Os processos de lubrificação atualmente utilizados nas indústrias consomem muito tempo, apresentam custos relativamente elevados e podem causar impacto importante ao meio ambiente, relacionado com o tratamento, armazenamento e descarte de seus resíduos.

Recentemente, observam-se iniciativas em diversos países para o uso de lubrificantes benéficos para a saúde e meio ambiente. Esses lubrificantes substituiriam os atualmente empregados que frequentemente são inflamáveis e apresentam elementos ativos como cloro, enxofre e fósforo, os quais são potencialmente danosos e requerem o uso de solventes orgânicos voláteis para sua remoção (RAO & WEI, 2001).

O principal objetivo deste estudo foi desenvolver um processo alternativo de lubrificação para extrusão a frio associado a lubrificantes, também alternativos. Esses devem apresentar a mesma eficiência que os processos atualmente utilizados pelas indústrias, representado pelo revestimento de fosfato de zinco sobre os tarugos a conformar. Além disso é desejável que os processos de lubrificação e lubrificantes sejam menos prejudiciais ao meio ambiente. O revestimento de fosfato de zinco apresenta problemas potenciais relacionados com o descarte do zinco, como se observa em vários trabalhos publicados recentemente, dentre os quais se destaca o de Nyamangara (1998).

Um ferramental de extrusão a frio foi construído para uso em laboratório, o qual foi empregado para a realização dos ensaios experimentais. O ferramental foi projetado para fácil adaptação aos equipamentos hoje utilizados na indústria, de maneira a evitar problemas operacionais tais como *setup*, manuseio e limpeza.

Os tarugos também receberam alterações em suas condições metalúrgicas por meio de tratamentos térmicos. Alterações no acabamento superficial também foram realizadas mecanicamente, tanto na morfologia, como na rugosidade superficial.

Lubrificantes alternativos associados às variações citadas acima foram testados. Alguns desses lubrificantes já são comercializados para uso em operações de deformação a frio, outros foram testados pela primeira vez no processo de extrusão a frio neste estudo.

Após a realização dos primeiros ensaios, nos quais somente foi feito um único passe de extrusão com redução em área de 22% (dentro do limite para extrusão livre), foram aplicados testes estatísticos de análise de variância dos resultados experimentais obtidos. Com o *planejamento fatorial* foram determinadas as variáveis de influência do processo de lubrificação. O *teste de efeitos fixos* indicou os lubrificantes que apresentaram resultados satisfatórios quando associados às variáveis tratamento térmico e acabamento superficial. Esses resultados foram comparados aos da força de extrusão, quando utilizado o tarugo com fosfato de zinco associado a um lubrificante líquido, à base de bissulfeto de molibdênio.

Também foram realizados ensaios adicionais com os lubrificantes nas condições indicadas satisfatórias no parágrafo anterior. Esses ensaios consistiram em dois passes subsequentes de extrusão, com 22% de redução em área para cada passe, e tiveram por objetivo analisar o comportamento dos lubrificantes em processos de extrusão a frio com múltiplos estágios comuns nas indústrias que empregam a extrusão a frio.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 – Os Processos de Extrusão a Frio e seus Produtos

Os processos de extrusão a frio são convenientes para conformação de peças individuais como produtos semi-acabados ou acabados. Na extrusão a frio os custos são menores comparados aos processos de torneamento e seus produtos apresentam qualidade geral melhor que os obtidos por deformação a quente dos aços, pois não estão presentes a oxidação, a descarbonetação e a contração térmica das peças após o processamento.

A produtividade é alta para peças com geometrias relativamente complexas. Proporcionam boa qualidade dimensional, ou seja, pode-se operar com campos de tolerância menores e também fornece um bom acabamento superficial (MONAGHAN & O'REILLY, 1996).

Devido às altas tensões necessárias para realizar a conformação, o material torna-se encruado, com um nível de resistência mecânica elevado. Assim, pode-se dispensar eventuais tratamentos térmicos para o aumento das propriedades mecânicas relacionadas à resistência mecânica e à dureza superficial.

Alguns parâmetros de processo na deformação a frio são comparados a outros processos, tais como os de deformação a morno e a quente, conforme mostrados na Tab. 2.1.

Tabela 2.1 – Características dos produtos de diferentes condições do processo de deformação (SCHULER, 1998).

Processo de Deformação	QUENTE	MORNO	FRIO
Peso da peça	0,05 – 1500 kg.	0,001 – 50 kg.	0,001 – 30 kg.
Precisão	IT13 – 16	IT11 – 14	IT8 – 11
Rugosidade Superficial (Rz)	50 – 100 μm .	> 30 μm .	> 10 μm .

Do ponto de vista econômico, para que o processo de conformação a frio seja viável quando comparado ao processo de usinagem, deve-se produzir uma quantidade mínima de peças como mostrada na Tab. 2.2.

Tabela 2.2 – Quantidade de peças economicamente viável para o processo de extrusão a frio (SCHULER, 1998).

Peso	Produção anual em peças
0,10 – 0,25 kg	200.000
0,25 – 0,75 kg	150.000
0,75 – 2,50 kg	25.000

Os processos de extrusão a frio são classificados conforme a direção do fluxo do metal em relação ao movimento das ferramentas (direta, inversa ou lateral) e também conforme a geometria da peça após a operação de extrusão, que pode ser maciça ou com rebaixo interno.

Basicamente existem seis processos a partir da combinação das classificações descritas no parágrafo anterior em matriz fechada, isto é, nas quais o tarugo fica contido dentro de um recipiente e é prensado por punções e ferramentas rígidas, como nas Fig. 2.1 a 2.7 (LANGE, 1985).

A Fig. 2.1 representa a *extrusão direta maciça*, na qual o metal é movimentado no mesmo sentido do punção. O tarugo é colocado no interior da matriz e por compressão, é tensionado pelo punção até que o metal atinja sua fase plástica, escoando através de uma matriz cônica. A

extrusão direta com rebaixo interno (Fig. 2.2) ocorre quando o tarugo é colocado dentro de um recipiente e posicionado sobre um contra-punção que exerce a função de *matriz*. Por compressão o punção gera tensões no tarugo resultando no escoamento do metal sobre esse contra-punção.

A Fig. 2.3 apresenta a *extrusão inversa maciça*, pois a movimentação do metal é no sentido oposto ao do punção. O tarugo é posicionado no interior da matriz e é comprimido pelo punção, que apresenta uma geometria diferenciada, ou seja, possui rebaiços internos combinados com ângulos de conformação. Assim quando o metal atinge sua fase plástica, escoar através do punção. Já a Fig. 2.4, representa a *extrusão inversa com rebaixo interno*, que é utilizada para fazer perfurações em peças sem remover material. Nota-se também que o fluxo do metal é no sentido inverso ao movimento do punção.

As Fig.s 2.5 e 2.6 representam respectivamente a *extrusão lateral maciça* e a *extrusão lateral com rebaixo interno*. As extrusões laterais ocorrem quando o material é colocado dentro de um recipiente sobre um contra-punção. A diferença entre esses processos é que a extrusão maciça é caracterizada por uma matriz lateral, que permite o escoamento do metal lateralmente com rebaixo externo. Já a extrusão com rebaixo interno, além de possuir uma matriz lateral, também possui um mandril que tem a função de fazer a perfuração nas peças conformadas.

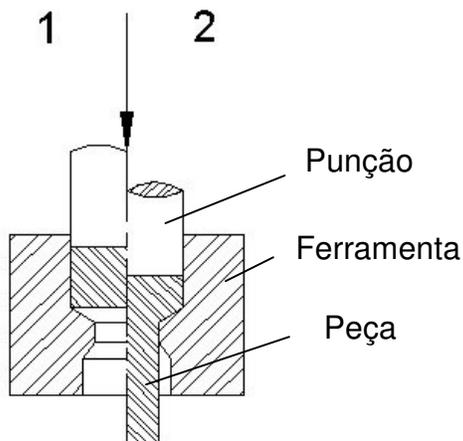


Figura 2.1 – Extrusão direta maciça.

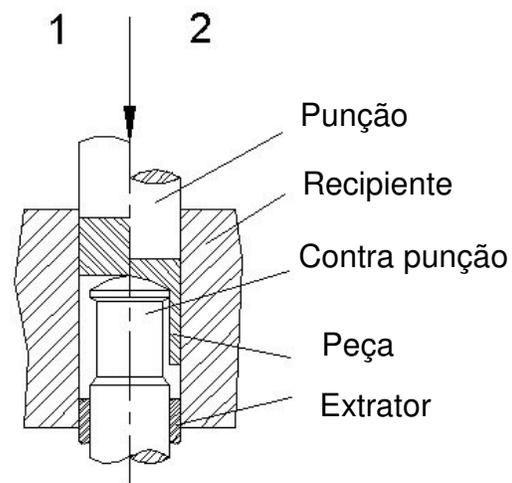


Figura 2.2 - Extrusão direta com rebaixo.

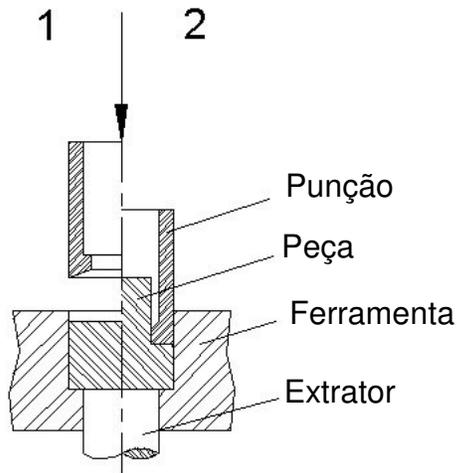


Figura 2.3 - Extrusão inversa maciça.

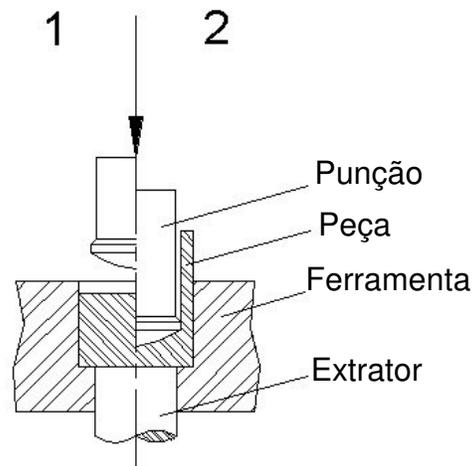


Figura 2.4 - Extrusão inversa com rebaiço.

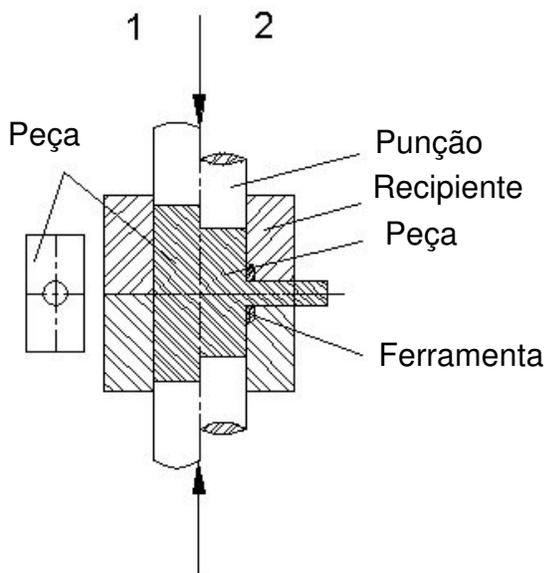


Figura 2.5 - Extrusão lateral maciça.

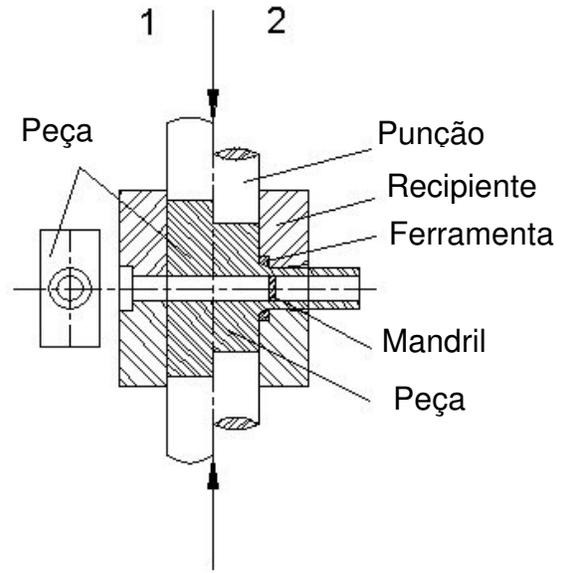


Figura 2.6 - Extrusão lateral com rebaiço.

A extrusão também pode ser feita em matriz aberta, em que as reduções de área por passe devem ser inferiores a aproximadamente 30%. Esse tipo de extrusão mostrada na Fig. 2.7 se caracteriza quando o tarugo não é guiado pelas paredes do recipiente, como no caso da Fig. 2.1. (LANGE, 1985):

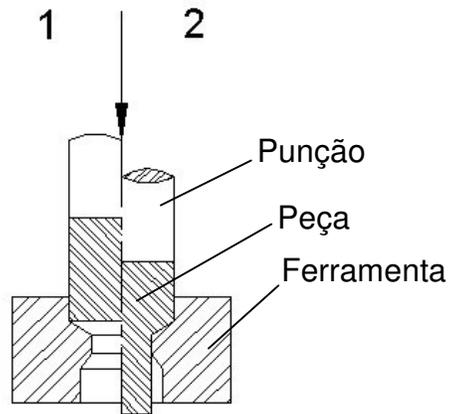


Figura 2.7 - Esquema de uma extrusão livre.

A Fig. 2.8 mostra a montagem de ferramentas mais comum usada para a extrusão direta a frio de peças em aço (LANGE, 1985).

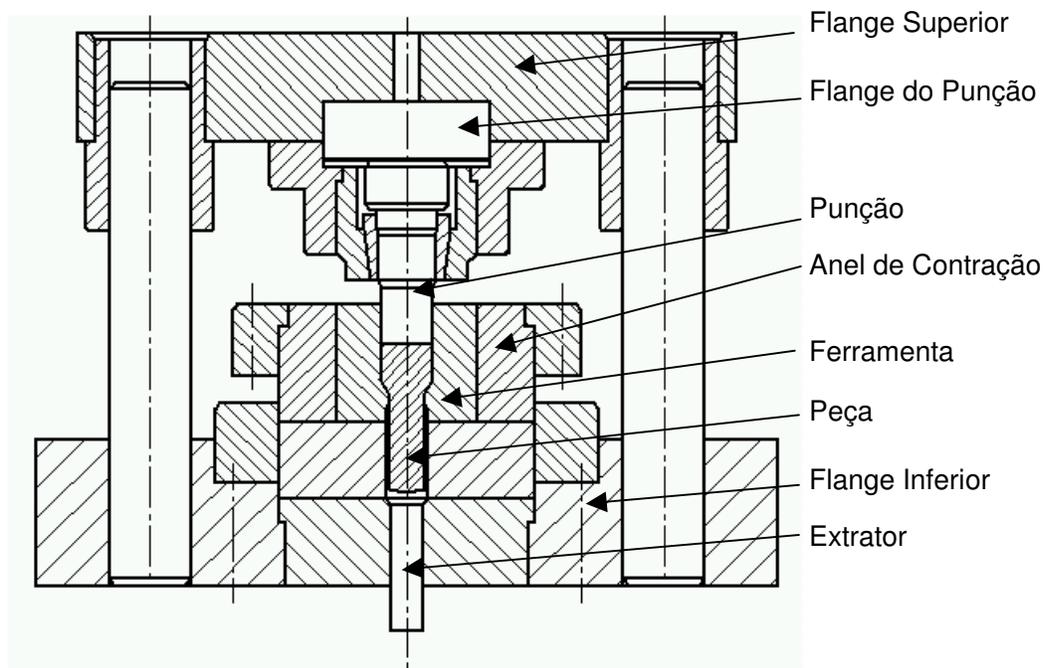


Figura 2.8 – Montagem convencional da ferramenta de extrusão.

As peças obtidas a partir dos processos de extrusão a frio apresentam características muito positivas, pois possuem alto grau de precisão geométrica, campos de tolerâncias menores, qualidade superficial e propriedades mecânicas favoráveis, quando os estágios de extrusão são adequadamente projetados.

As Fig. 2.9 e 2.10 mostram peças obtidas pelo processo de extrusão a frio e outros processos de fabricação. Na Fig. 2.9 nota-se a definição geométrica e a economia de material do tarugo de partida da peça, obtida a partir do processo de extrusão a frio em comparação com a peça totalmente usinada.

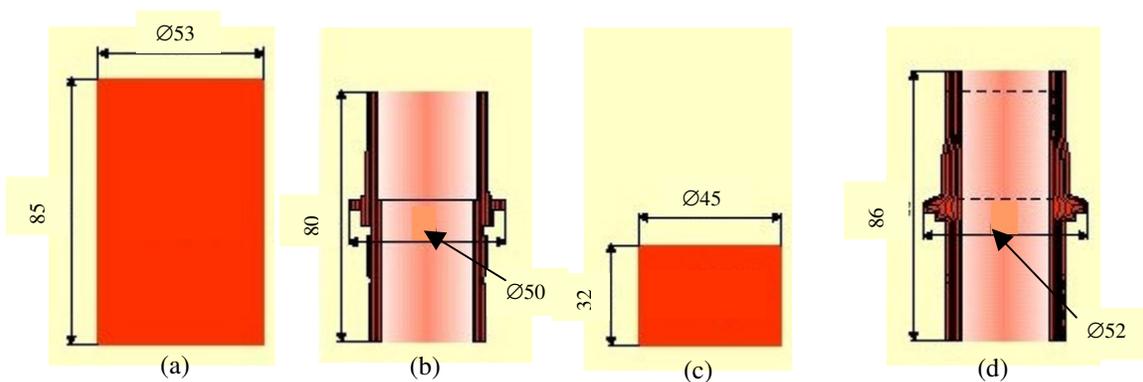


Figura 2.9 – Tarugos e produtos usinado e extrudado. a) Tarugo para usinagem; b) Produto usinado; c) Tarugo para extrusão; d) Produto extrudado (SCHULER, 1998).

A Fig. 2.10b mostra um produto obtido por uma complexa operação de soldagem de flange dianteira, conexão e tubo. Vale a pena lembrar que todos esses componentes passaram por algum outro processo de fabricação para adquirir sua geometria final. O mesmo produto pode ser obtido pelo processo de extrusão (Fig. 2.10a) economizando tempo e matéria prima.

Para eixos extrudados pode-se também destacar a economia de matéria prima e redução do tempo de usinagem para obtenção do produto final. A Fig. 2.11 mostra essa economia de matéria prima quando se utiliza o processo de extrusão a frio.

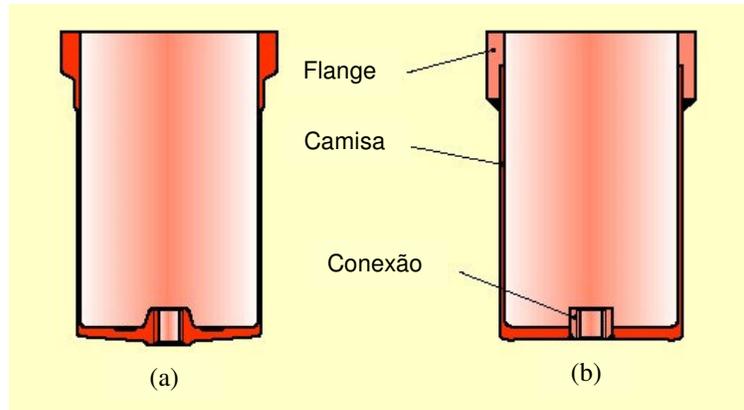


Figura 2.10 – Produtos extrudado e soldado: a) Extrudado;
b) Soldado (SCHULER, 1998).

A parte hachurada da Fig. 2.11(a) representa essa economia de material quando o produto extrudado a frio e usinado é comparado ao produto simplesmente usinado.

A Fig. 2.11(b) mostra um economia ainda maior de material, ao se utilizar o processo de extrusão a frio e modificar o projeto de um eixo que deve suportar cargas de torção na engrenagem.

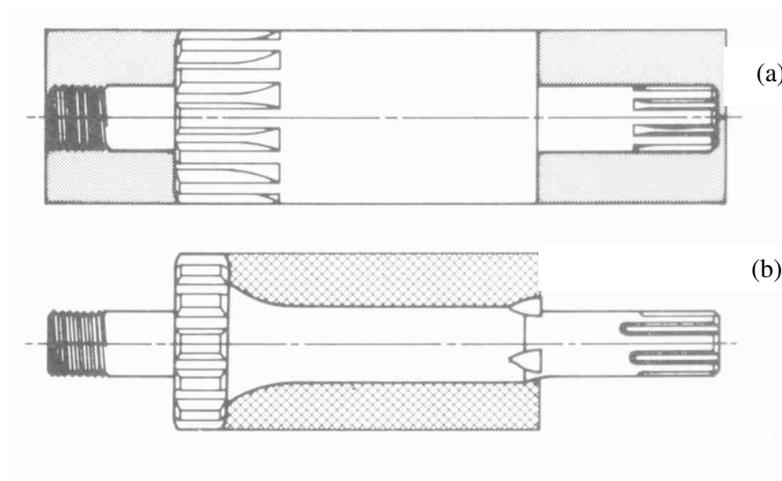


Figura 2.11 – Economia de matéria prima para eixos extrudados a frio: a) Típico eixo usinado;
b) Eixo extrudado a frio proposto (ASM, 1975).

O campo de tolerância no processo de extrusão a frio conforme apresentado na Tab. 2.1 é menor em relação aos processos de conformação a quente e a morno. O grau de precisão dimensional não é igual para todas as dimensões de um componente, e sim restrito às dimensões funcionais e de remoção de material (posterior usinagem).

Os produtos deformados a frio apresentam uma boa qualidade superficial, de tal modo que podem dispensar a usinagem posterior para atingir a rugosidade necessária para o produto final. Estima-se que em tarugos revestidos com fosfatos, a rugosidade superficial após o processo de extrusão a frio seja de $R_a = 0,3$ a $0,8\mu\text{m}$, comparável à obtida nos processos de usinagem para acabamento.

A qualidade superficial é influenciada positivamente pela alta pressão específica e pelas altas velocidades relativas atingidas durante o processo. Essa melhor qualidade superficial também depende da qualidade da superfície do tarugo a ser extrudado.

As propriedades mecânicas (dureza e limite de escoamento e de resistência à tração) das peças extrudadas são aumentadas com a deformação plástica a frio. Dependendo do grau de tensão verdadeira aplicada em aços contendo baixo e médio carbono, a resistência à tração pode aumentar em até 120%, sendo que a tensão de escoamento aumenta entre 100% e 300% e a dureza entre 60% e 150%. Contudo, ao mesmo tempo, a resistência ao impacto, alongamento e estrição são diminuídos.

A Fig. 2.12 apresenta alguns produtos conformados pelos diversos processos de deformação plástica, a frio, morno e quente.

A Fig. 2.13 mostra esquematicamente as formas de alguns produtos que podem ser obtidos pelo processo de extrusão a frio.

A Fig. 2.14 mostra especificamente produtos conformados a frio, a seqüência de conformação, destacando-se os produtos obtidos por processos de extrusão a frio.



Figura 2.12 – Produtos obtidos por processos de deformação plástica: a frio, morno e quente.
(SCHULER, 1998).

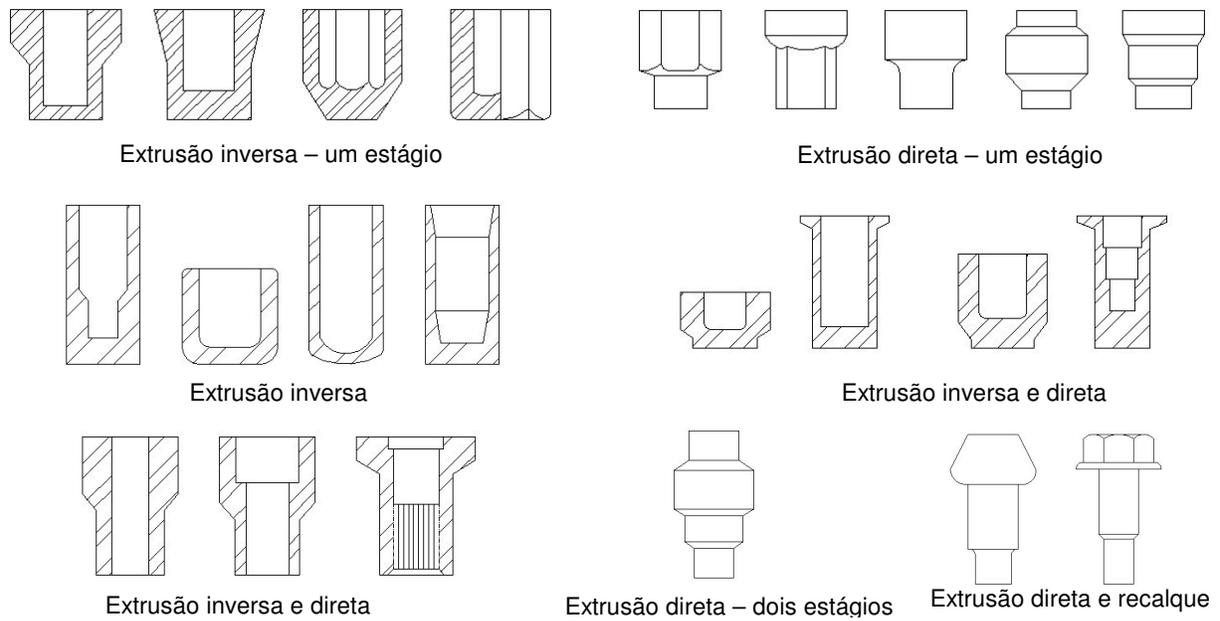


Figura 2.13 – Formas possíveis na extrusão a frio (ASM, 1975).

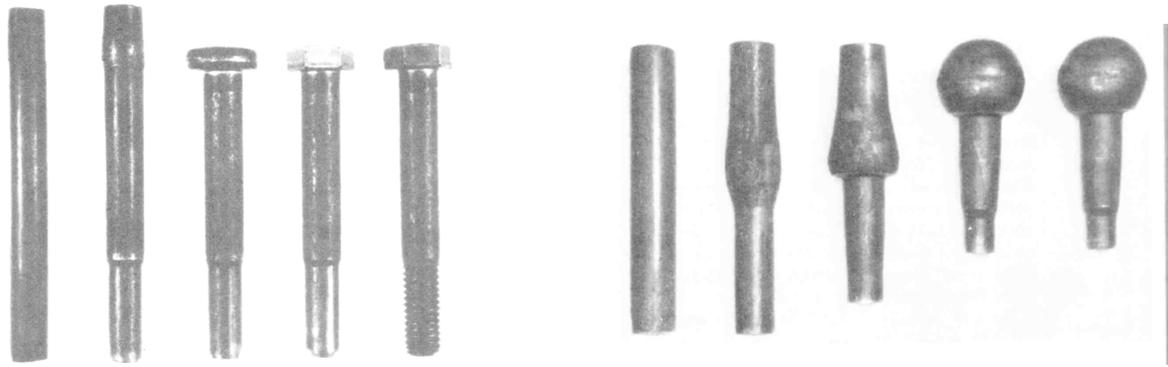


Figura 2.14 – Produtos extrudados a frio (ASM, 1975).

2.2 – Aços para Extrusão a Frio

Os aços para conformação a frio são mais limitados em comparação aos aços para conformação a quente.

Os aços contendo gases, principalmente com alto teor de nitrogênio (0,01 a 0,03%) dificultam a deformação a frio, pois aumentam a dureza a pequenas deformações. Isto conseqüentemente diminui a tenacidade e resulta na fragilização das zonas conformadas.

A composição química também influencia a conformabilidade a frio dos aços. Tanto o aumento do teor de carbono como dos outros elementos de liga podem dificultar a deformação a frio dos aços.

Os aços carbono de baixa liga formam um grupo de aços para cementação que são muito utilizados na conformação a frio para fabricação de peças que necessitam de posterior endurecimento superficial. Os aços mais comuns são listados na Tab. 2.3.

É recomendável utilizar-se o aço na condição *recozido*, pois assim fornece uma microestrutura formada por ferrita e perlita. A ferrita possui boa conformabilidade a frio pois contém pouco carbono. A perlita restringe a conformabilidade a frio pela maior presença de carbono em sua composição. O processo de recozimento fornece um considerável aumento da

porção ferrítica, o que facilita a deformação a frio dos aços (BILLIGMANN & FELDMANN, 1979).

Tabela 2.3 - Aços para extrusão a frio e cementação (BILLIGMANN & FELDMANN, 1979).

Classificação (DIN 17006)	Composição Química (%)				
	C	Mn	Cr	Mo	Ni
Cq 15	0,15	0,45	-	-	-
15 Cr3	0,15	0,50	0,55	-	-
16 Mn Cr5	0,16	1,15	0,95	-	-
20 Mo Cr4	0,20	0,75	0,40	0,45	-
15 Cr Ni6	0,15	0,50	1,55	-	1,55
17 Cr Ni Mo6	0,17	0,50	1,65	0,30	1,55

A composição química dos aços apresenta forte influência sobre a conformabilidade. Segundo a norma VDI 3138 (1980), tanto para os aços sem liga como para os aços ligados, a resistência à deformação pode ser associada diretamente ao teor de carbono presente. Isso é devido a relação direta com a proporção de perlita (menos dúctil) na microestrutura do aço.

Para os aços de baixa liga de Cr e Ni e aqueles com teor elevado de Manganês ($Mn > 0,6\%$) ao invés de se utilizar o teor de Carbono definido na composição química, deve-se utilizar um teor de carbono equivalente C_1 de acordo com a equação 2.1.

$$C_1 = C + \frac{Mn - 0,6}{4} + \frac{Cr}{20} + \frac{Ni}{20} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

A norma também indica que deve-se dar preferência aos aços com baixo teor de carbono e evitar extrudar a frio aços com teor de carbono equivalente superiores a 0,5%.

A norma VDI 3143 (1980) apresenta os critérios para a escolha, tratamento térmico e ensaios de aços para forjamento a frio. Nessa norma, observa-se que os elementos de liga que mais influenciam em ordem decrescente na forjabilidade a frio são: C, Si, Cr, Cu, Mn e Ni.

2.3 – A Lubrificação na Extrusão a Frio

A lubrificação desempenha um papel importante na extrusão a frio pois lubrificantes eficientes previnem o contato metálico direto entre a peça e a ferramenta, reduzem a tensão de atrito entre as superfícies deslizantes, controlam o calor produzido exercendo a função de refrigerantes e prolongam a vida útil das ferramentas.

Contudo, eles não são suficientes para assegurar a lubrificação eficiente de todas as partes conformadas do tarugo (LAZZAROTTO *et al.*, 1998-a).

O processo de extrusão a frio de aços é altamente importante para a manufatura industrial. As principais vantagens desse processo são uma ótima tolerância dimensional, ou seja, pode-se trabalhar com campos de tolerâncias menores, superfície final lisa, redução de material do tarugo e de etapas de usinagem posterior, e melhoria das propriedades mecânicas do material conformado (JANG *et al.*, 2001 & MONAGHAN & O'REILLY, 1996).

Contudo, esse processo requer uma alta quantidade de energia mecânica para a deformação da peça de aço. Isto significa que altas temperaturas podem ocorrer na zona de deformação onde a peça e ferramenta apresentam forte contato, o que pode prejudicar ou até anular completamente o efeito dos lubrificantes normalmente empregados industrialmente.

O regime de lubrificação mista predomina na zona de deformação, ou seja, entre os picos de rugosidade está presente uma extensa camada lubrificante com espessura de muitas camadas moleculares, que previne o desgaste quando as pressões não são tão altas (lubrificação de camada limite). Com o aumento das pressões na interface, a falha do filme é evitada pela presença de um lubrificante eficiente nas depressões entre os picos e os vales de rugosidade. A pressão nesses vales é acumulada na zona de deformação e o lubrificante é carregado para a interface da peça com a ferramenta.

As propriedades químicas e físico-químicas das superfícies da ferramenta e da peça influenciam fortemente o desgaste. Isso pode ser prevenido com tratamentos superficiais, como o revestimento de fosfato de zinco (DONOFRIO, 2000).

Para prevenir o desgaste e o aumento da força de extrusão, os métodos de revestimento fosfático têm sido amplamente empregados. A peça é revestida quimicamente com um tipo de fosfato (por exemplo, de zinco), em que um filme anti-desgaste é formado na peça, antes da conformação a frio (SAIKI, *et al.*, 1997).

Embora seja um excelente carregador de lubrificante, esse método requer muitos passos e é de difícil reprodução, como mostrado na seqüência a seguir (VDI 3160, 1980 & KOMATSUZAKI *et al.*, 1996).

1. *Desengraxamento*: é utilizado para eliminar resíduos, graxas, óleos e outras impurezas aderidas nas superfícies do tarugo. Essa operação emprega soluções ácidas e portanto exige instalações específicas, nas quais os recipientes devem ser resistentes aos ácidos empregados;
2. *Decapagem*: para eliminar as camadas de óxidos que dificultam a conformação a frio. Geralmente são utilizados soluções de ácido sulfúrico e ácido clorídrico. Essas soluções devem ser neutralizadas antes de serem lançadas nas redes de esgoto;
3. *Enxaguamento a frio*;
4. *Enxaguamento a quente*: ambas operações de enxaguamento são empregadas para remover resíduos ácidos da superfície dos tarugos;
5. *Fosfatização*: os fosfatos de zinco ou magnésio desempenham a função de um portador muito eficiente de lubrificante, pois a camada de fosfato é cristalina e porosa, daí sua capacidade de absorção do lubrificante. Outra característica dessa camada é a formação de

um *sabão metálico* gerado pela reação com lubrificantes com teor de ácido graxo (pH 8,5 a 9,0). Porém todos os banhos de fosfato produzem lodo, que devem ser descartados;

6. *Enxaguamento a frio*;
7. *Neutralização*: realizado com banhos alcalinos para neutralizar os resíduos de ácidos presentes na superfície dos tarugos;
8. *Lubrificação*: com sabões ou lubrificantes à base de bissulfeto de molibdênio, de acordo com a severidade do processo;
9. *Secagem*;

Como se observa, as operações 3,4,6 requerem tratamento posterior de neutralização por lavagem e canalização das águas residuais antes de descartá-las para a rede de esgoto.

A fosfatização cristalina de zinco associada com um lubrificante em pó melhora significativamente as condições de atrito na interface da peça com a ferramenta em seqüências severas de deformação a frio, como as que ocorrem na extrusão a frio de peças de aço. Contudo esse processo é de implementação complexa, custosa e de difícil reprodutibilidade (DUBAR *et al.*, 1998). Sua substituição por processos mais fáceis e menos poluentes é o mais interessante do ponto de vista técnico e ambiental. A topografia de uma superfície revestida com fosfato de zinco é apresentada na Fig. 2.15.

Na fosfatização, as camadas são formadas durante um processo químico seqüencial. Após a camada de fosfato de zinco estar formada, um sabão, ou então o bissulfeto de molibdênio no caso de grandes reduções de áreas, é aplicado. O sabão (estearato de sódio ou estearato de cálcio) reage com o fosfato de zinco para formar uma camada de estearato de zinco. Conseqüentemente, a qualidade da camada do estearato depende dos parâmetros químicos e físicos dos banhos de processo, tais como temperatura, concentração, acidez e tempo de submersão (LAZZAROTTO *et al.*, 1999).

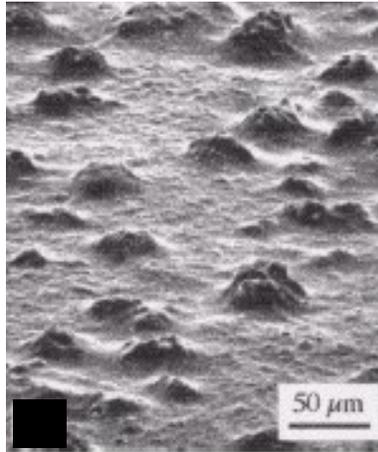


Figura 2.15 – Micrografia de uma superfície revestida com fosfato de zinco (DUBAR *et al.*, 1998).

Muitas seqüências de operações para o tratamento superficial são possíveis, como apresentado na Fig. 2.16 extraída de Donofrio (2000).

Dubois *et al.* (2001) mostrou que para múltiplos passos de deformação a frio, após o primeiro passo, por exemplo de trefilação, a camada de fosfato de zinco não é muito porosa (devido ao aplainamento dos picos) e assim, a aderência do estearato diminui.

Contudo, em um segundo passo de deformação (extrusão direta), grande parte da camada de fosfato de zinco acaba aderindo a ferramenta. Desta forma, a camada de fosfato de zinco não tem uma boa propriedade lubrificante e o coeficiente de atrito aumenta.

Os óleos adicionais utilizados para operações de extrusão podem prevenir o contato metálico direto, mas também podem ser a sua causa, pois esses óleos tem o poder de remover a capacidade da aderência do estearato e assim desproteger o substrato (tarugo), e com isso aumentar o coeficiente de atrito.



Figura 2.16 – Sequências de operações possíveis para a fosfatização de zinco ou magnésio (DONOFRIO, 2000).

2.4 – Problemas Ambientais que podem ser Causados pelos Tratamentos na Lubrificação

O tratamento, o descarte e o controle ambiental do lodo gerado pela fosfatização, durante e depois do processo de deformação a frio, são complexos e de custo elevado. Portanto deve-se buscar lubrificantes que sejam menos poluentes, de fácil descarte e controle ambiental, mas que apresentem desempenho adequado durante o processo de extrusão a frio.

Recentemente, os lodos industriais têm crescido rapidamente em quantidade e complexidade (LEVY, 2000) e a destruição dos detritos desses lodo é um grande problema ambiental (NYAMANGARA, 1998). Isto é especialmente verdade em relação aos lodos resultantes das operações de revestimento de peças metálicas (LEVY, 2000).

Assim, esses lodos representam um grande desafio, pois apresentam larga variação de pH, metais pesados tóxicos, fosfatos, solventes, óleos protetivos e tintas. Esses lodos também são de difícil secagem e sua destruição final pode ser cara e implicar em procedimentos burocráticos complicados (LEVY, 2000), de modo que o custo de sua destruição pode contribuir significativamente no custo da fabricação do produto (BALDY, 1996).

As fontes de contaminantes nos lodos variam de acordo com a natureza do tratamento superficial. Atualmente a maioria dos sólidos encontrados nesses lodos são compostos metálicos como os hidróxidos de cobre, zinco, níquel, cádmio, ferro, alumínio, cromo e cálcio (LEVY, 2000).

As limitações da aplicação de revestimentos de fosfatos devem-se à presença de substâncias fosfóricas, ao lodo gerado e aos ácidos para pré/pós-lavagem que causam grande preocupação ambiental, além de aspectos econômicos relacionados com a construção de tanques resistentes à corrosão pelos ácidos, a energia para aquecimento dos banhos, a limpeza dos tanques, o tratamento das águas de enxaguamento e o descarte dos lodos (NATH & MORIGUCHI, 2001).

Os lodos provenientes desses revestimentos não devem ser incinerados pois certos metais tóxicos como o zinco, o chumbo e o cádmio, podem ser volatilizados nas temperaturas atingidas nos incineradores (LEVY, 2000).

O zinco e o cobre contidos nos detritos dos lodos, especialmente das áreas industriais, limitam a aplicação dos solos para a agricultura. Uma vez que estes metais penetram no solo, eles não são facilmente lixiviados, resultando em sua acumulação nas camadas superiores do solo.

Assim, existe uma grande preocupação ambiental principalmente no que se refere às grandes quantidades de zinco e de cobre que vêm sendo adicionadas às concentrações naturais existentes no solo (NYAMANGARA, 1998).

Um estudo realizado por Saron *et al.* (2000) mostra que o aterro industrial é uma das formas mais comuns de disposição final dos lodos e que tem sido muito questionada. Envolve custos altíssimos, principalmente do terreno e dos estudos de impacto ambiental. Os danos de um aterro industrial mal projetado costumam ser irreversíveis para o meio ambiente. Por isso os estudos para disposição de resíduos perigosos devem ser direcionados para a minimização de sua geração.

Na indústria japonesa de conformação um dos aspectos mais urgentes é desenvolvimento de novos lubrificantes sem o uso de aditivos como o *bondelube* e o *bonderite*, utilizados para favorecer os revestimentos de fosfato antes da extrusão a frio de peças de aço. Assim, não é somente necessário um novo tipo de lubrificante, mas também um novo método de lubrificação (SEKIGUCHI, 2001).

2.5 – Os Regimes de Lubrificação na Extrusão e Alternativas para Lubrificantes

Os óleos minerais são uma boa alternativa para substituir os lubrificantes comumente usados em deformação a frio, desde que condições apropriadas sejam definidas para os

parâmetros de processo como viscosidade, redução de área, velocidade e geometria da ferramenta.

Na extrusão direta as propriedades anti-desgaste podem ser bastante melhoradas quando ácidos fosfóricos condensados são adicionados diretamente nos óleos lubrificantes, juntamente com fosfato de mono-auquila ou fosfato de di-auquila (KOMATSUZAKI *et al.*, 1996).

Lazzarotto *et al.* (1998-b) apresentam um método para seleção de óleos lubrificantes para processos de deformação a frio de metais, a partir de uma ampla faixa de produtos disponíveis no mercado, e consideram que o lubrificante tem uma elevada importância econômica e sua correta seleção pode reduzir os custos de produção.

Com o objetivo de analisar a lubrificação nos processos de conformação, Wilson (1979) definiu quatro diferentes regimes de lubrificação que podem estar presentes na interface da ferramenta com a peça. Estes regimes dependem de variáveis de processo como: rugosidade de superfície da peça e da ferramenta, viscosidade e compressibilidade do lubrificante, temperatura e grau de deformação (BUTTON, 2001).

Na lubrificação hidrodinâmica (Fig. 2.17a) as superfícies são completamente separadas por um filme lubrificante que é muitas vezes mais espesso que a rugosidade de ambas as superfícies em contato. Neste regime a resistência para o movimento relativo das superfícies é definido pelas propriedades químico-físicas do lubrificante. Coeficientes de atrito menores que 0,05 são observados e o desgaste da ferramenta é reduzido.

Com a diminuição da espessura do filme lubrificante (Fig. 2.17b) entre 3 a 10 vezes a média de rugosidade da superfície, a lubrificação hidrodinâmica continua separando as superfícies. Contudo alguns picos de rugosidade podem entrar em contato e desse modo, as superfícies rugosas podem romper o filme e estabelecer um contato metálico direto. Isso aumenta as cargas de conformação e o desgaste da ferramenta.

A lubrificação de camada limite (Fig. 2.17c) é representada por um filme com espessura igual a algumas vezes o tamanho molecular do lubrificante. Sob condições ideais de processo, coeficientes de atrito de 0,1 podem ser observados. Mas se o filme lubrificante for rompido e o fornecimento de lubrificante for dificultado, o atrito será aumentado e coeficientes próximos de 0,4 poderão ser observados.

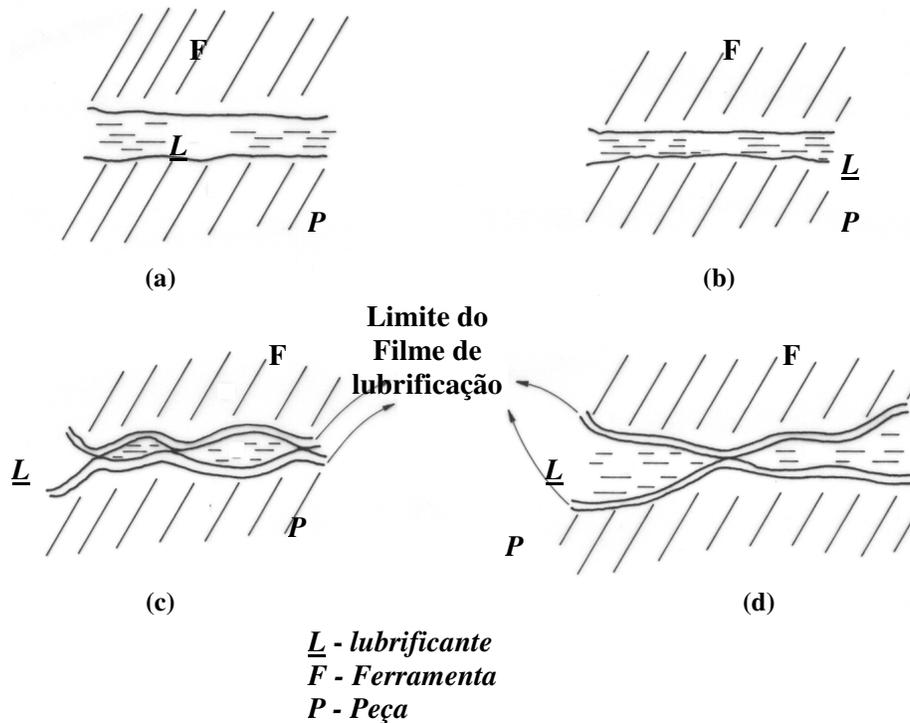


Figura 2.17 – Regimes de lubrificação (WILSON, 1979).

O regime de lubrificação mista (Fig. 2.17d) é definido quando os vales entre os picos de rugosidade são preenchidos com lubrificante em quantidade suficiente para ser continuamente dragado de modo a conservar um estável e contínuo filme lubrificante na interface. Coeficientes de atrito podem variar de 0,05 (similar a lubrificação hidrodinâmica) até 0,4 se o contato metálico ocorrer gerando posterior quebra do filme.

O diagrama apresentado na Fig. 2.18 mostra a variação do coeficiente de atrito (μ) em função da velocidade (U), da viscosidade do lubrificante (η) e da carga na interface para três

regimes: quando a lubrificação de camada limite é estabelecida (região 1), a lubrificação mista (região 2) e a hidrodinâmica com filme espesso e fino (região 3).

Com baixas velocidades (região 1), pouco lubrificante é carregado para a interface e o regime de lubrificação de camada limite pode ser estabelecido. O contato metálico direto pode ocorrer e altos coeficientes de atrito são observados.

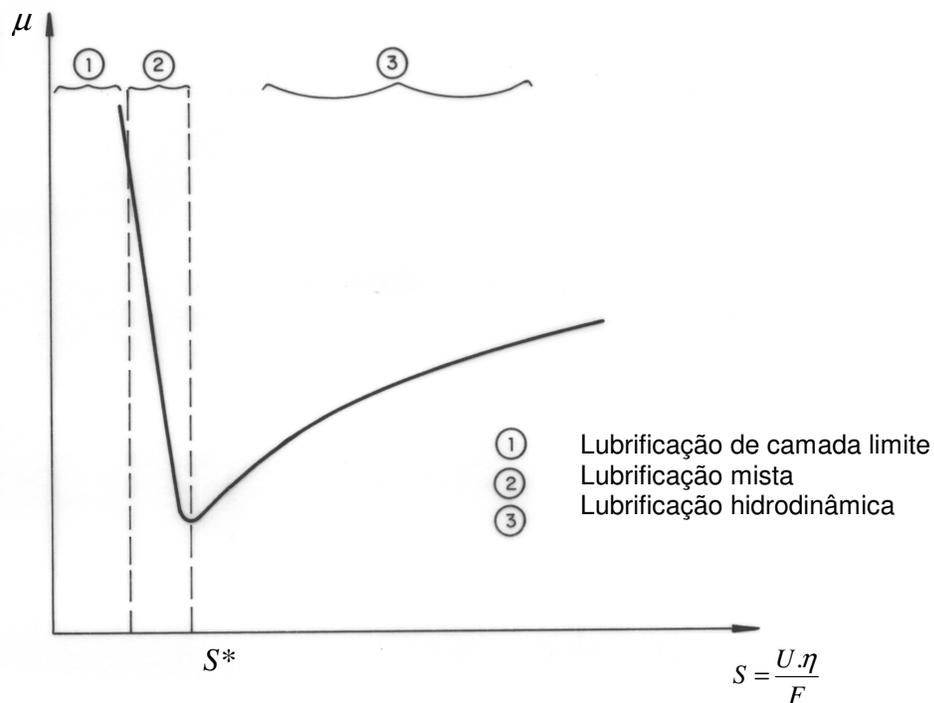


Figura 2.18 – Diagrama $\mu \times S$ (CHO *et al.*, 2000).

Com o aumento da velocidade, mais lubrificante é carregado para a interface, preenchendo os vales, promovendo o regime de lubrificação mista (região 2) com uma importante redução do coeficiente de atrito.

Acima de um valor crítico de S , definido como S^* , os picos de rugosidade são aplainados e mais lubrificante é carregado para a interface e assim, o regime hidrodinâmico está estabelecido

(região 3). Com o aumento da espessura do filme, há também um aumento da tensão necessária para cisalhá-lo e conseqüentemente, um aumento do coeficiente do atrito (BUTTON, 2001).

Para um melhor entendimento dos mecanismos de lubrificação tem-se estudado em detalhes a topografia superficial dos produtos acabados e o uso de óleos lubrificantes alternativos. Resultados experimentais mostraram que para superfícies de tarugo obtidas aleatoriamente, algumas superfícies mais lisas poderiam reter mais lubrificante e diminuir a resistência ao atrito. (HU & DEAN, 2000).

Um trabalho teórico anteriormente feito por Kudo em 1965, sugeriu que o atrito é afetado pelo lubrificante conduzido entre os sulcos das superfícies, o que indica a importância da topografia da superfície.

Mais tarde foi investigado o efeito das diferentes geometrias topográficas das superfícies pela variação dos ângulos dos sulcos, concluindo-se que o ângulo desses sulcos tem um pequeno efeito na tensão de atrito (NELLEMAN *et al.*, 1977).

Mais recentemente, foram identificadas dois tipos de poças (fechadas e conectadas) formadas pela lubrificação, o que permitiu determinar a proporção de área das superfícies em relação à interface de contato, por análise da topografia de superfície. Foi comparada a diferença entre os dois tipos da topografia da superfície, mas não efetuou-se a mesma análise em termos da rugosidade (HU & DEAN, 2000). Um teste foi realizado para determinar a quantidade de retenção de lubrificante em várias superfícies texturizadas de corpos-de-prova em anel ensaiados por compressão. O óleo Shell Tellus 23 foi usado como lubrificante líquido e aplicado somente nas extremidades dos anéis. A diferença do peso do corpo-de-prova, antes e depois da lubrificação, que foi colocado em cima de um cone durante um minuto, é a quantidade de lubrificante retido no final da face. A superfície polida reteve mais lubrificante, cerca de cinco vezes mais que outras superfícies mais rugosas.

Contudo, superfícies polidas não podem ser praticadas industrialmente, sendo necessários trabalhos adicionais para investigar os parâmetros que influenciam a superfície final das

superfícies trabalhadas, que sejam extremamente efetivos para minimizar o atrito quando lubrificantes líquidos são utilizados (HU & DEAN, 2000).

Assim, neste trabalho pretende-se empregar algumas técnicas mecânicas para a preparação da superfície dos tarugos que favoreçam a retenção e a eficiência dos lubrificantes.

Outros autores têm estudado alguns óleos minerais e vegetais como possíveis substitutos dos lubrificantes sólidos atualmente empregados na indústria.

Dentre esses trabalhos, destaca-se o estudo de Ohmori *et al.* (1992), que apresentam um ensaio desenvolvido para avaliar o comportamento de alguns óleos para conformação a frio em termos de aderência (*galling*), considerando a topografia superficial inicial dos tarugos.

Já o trabalho de Obi & Oyinlola (1996) apresenta os resultados para ensaios de trefilação conduzidos com diversos óleos lubrificantes vegetais, propostos em substituição aos sabões comumente empregados nas trefilarias, e conclui que esses óleos são substitutos potenciais principalmente se compostos com óleos minerais que facilitem sua aplicação no material a trefilar.

Shima *et al.* (1997) apresentam resultados de ensaios de desgaste em que avaliaram diversos óleos para lubrificação de processos de conformação, com o objetivo de analisar como cada um desses óleos preenchiam a interface ferramenta-peça trabalhada, qual regime de lubrificação estabeleciam e como reduziam o coeficiente de atrito e o desgaste da ferramenta.

Os trabalhos de Lazzarotto *et al.* (1998-a e 1998-b) apresentam métodos para a escolha de óleos lubrificantes baseados em ensaios de extrusão direta confinada em que avaliam a capacidade de lubrificação de diversos óleos minerais com aditivos para as elevadas pressões verificadas na extrusão a frio.

Um lubrificante não poluente para processos de estampagem de aço comum, aço inox e titânio comercialmente puro foi estudado por Yoshimura *et al.* (2001). Os autores utilizaram

farinha de trigo em várias diluições em água, como lubrificante e avaliaram seu desempenho pela profundidade atingida no teste de Erichsen. As soluções em concentrações de 20% de farinha de trigo apresentam resultados satisfatórios em comparação ao uso de óleo e da graxa como lubrificantes.

Capítulo 3

Procedimento Experimental

3.1 – Especificação dos Tarugos

3.1.1 - Composição Química

O material utilizado para os ensaios de extrusão, com o sistema de lubrificação proposto foi o AISI 8620. Esse aço possui boa temperabilidade e é recomendado para casos em que se deseja endurecimento superficial por cementação ou carbonitreção. Outra característica desse aço é a sua ótima forjabilidade (METALS HANDBOOK, 1990). A Tab. 3.1 fornece a composição química recomendada para o aço AISI 8620.

Tabela 3.1 - Composição Química do aço AISI 8620 (METALS HANDBOOK, 1990).

Classificação (AISI)	Composição Química (% de massa)				
	C	Mn	Cr	Mo	Ni
8620	0,18 - 0,23	0,7 - 0,9	0,4 - 0,6	0,15 - 0,25	0,4 - 0,7

3.1.2 - Condição Metalúrgica e Propriedades Mecânicas

Para avaliar a influência das condições metalúrgicas do aço utilizado neste trabalho, foram empregados os tratamentos térmicos de recozimento e normalização. A condição recozido, como descrito na revisão bibliográfica, é a mais recomendável, por facilitar a deformação plástica.

Mas como o objetivo deste trabalho também é a redução dos custos de processo, ensaiou-se o aço na condição normalizado, visto que essa condição foi a fornecida comercialmente.

Os ensaios na condição recozido foram realizados para estudar a viabilidade econômica e técnica dessa condição. A Tab. 3.2 mostra algumas propriedades mecânicas do aço AISI 8620, após o recozimento e após a normalização.

Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas do aço AISI 8620 (MATWEB, 2002).

Condição Metalúrgica	Propriedades Mecânicas			
	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento máximo (%)	Dureza (Brinell)
<i>recozido</i>	385	530	31	149
<i>normalizado</i>	360	635	26	183

O processo de tratamento térmico de recozimento foi realizado com dois tempos diferentes de permanência no forno. Isto ocorreu devido à limitação da dureza resultante para o processo de extrusão livre, pois dependendo do lubrificante para uma mesma dureza o tarugo pode sofrer recalque antes de sua passagem pela ferramenta, que associado à dureza do material pode resultar no aumento da força de extrusão, e ultrapassar o limite de carga da instrumentação, empregada nesses ensaios, descaracterizando totalmente os resultados obtidos.

Os parâmetros de processo utilizados nos tratamentos térmicos são mostrados na Tab. 3.3 e nas Fig. 3.1 e 3.2. O processo de recozimento #1 (recozimento pleno) foi utilizado para os lubrificantes líquidos. Para os lubrificantes sólidos foi empregado o processo de recozimento #2 (recozimento convencional).

Para esses tratamentos térmicos de recozimento foi utilizado um forno de aquecimento por resistências elétricas, marca EDG, modelo MC 2 do Laboratório de Conformação Mecânica – DEMA – FEM – UNICAMP.

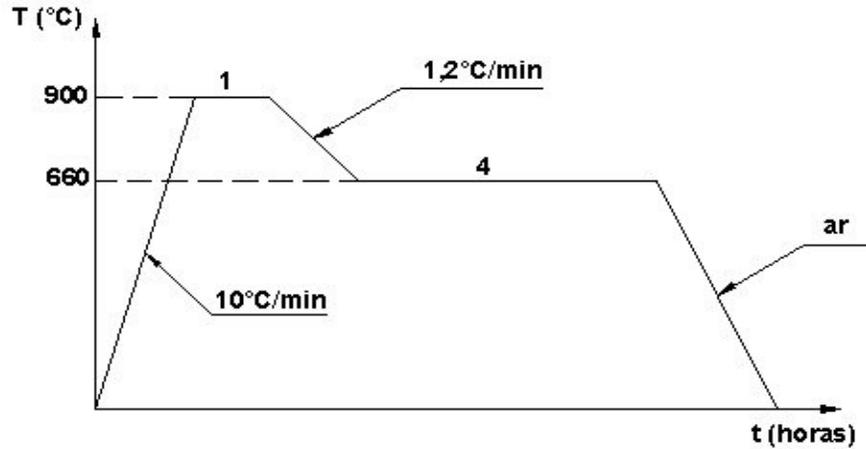


Figura 3.1 – Processo de tratamento térmico de recozimento #1 – recozimento pleno
(Recomendado pela Gerdau, s.d.)

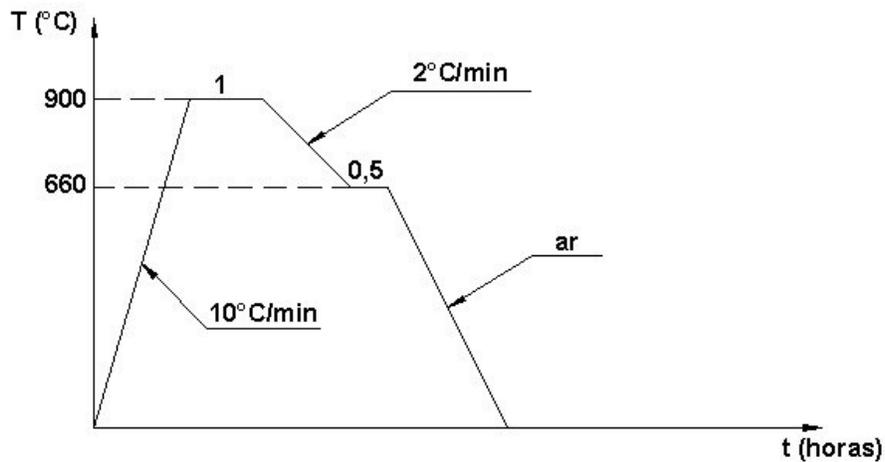


Figura 3.2 – Processo de tratamento térmico de recozimento #2 – recozimento convencional.

Tabela 3.3 – Parâmetros do processo de tratamento térmico de recozimento.

Processo	Temperatura de aquecimento (°C)	Taxa de aquecimento (°C/min)	Patamar na Temperatura de aquecimento (h)	Resfriamento controlado até (°C):	Taxa de resfriamento (°C/min)	Patamar na Temperatura após resfriamento (h)	Resfriamento final	Dureza (Brinell)
1	900	10	1	660	1,2	4	Ar	116-121
2	900	10	1	660	2	0,5	Ar	144-149

3.1.3 - Acabamento Superficial

Um dos acabamentos superficiais dos tarugos utilizados nos ensaios deste trabalho foi a condição como laminado, pois também é fornecido comercialmente e seu custo é menor com relação ao material trefilado. Outro fator que levou à escolha do material laminado é que o mesmo apresenta a superfície externa mais rugosa e com uma certa lubrificação proveniente da proteção superficial usada para o armazenamento.

Outro acabamento superficial utilizado, foi o recartilhado sobre o aço laminado, buscando se reproduzir a textura superficial esperada na fosfatização de zinco, necessária para carregar o lubrificante na interface da peça com a ferramenta.

A rugosidade superficial média (R_a) especificada entre 7 a 10 μm para esse procedimento foi baseada em medidas de R_a feitas em peças fosfatizadas utilizadas na indústria. Para as medidas de rugosidade superficial empregou-se um rugosímetro Mitutoyo modelo Surf test – 211.

Esse acabamento superficial recartilhado foi realizado em um torno mecânico convencional com uma ferramenta de recartilho fino, resultando em uma superfície riscada com sulcos cruzados, favorecendo o transporte do lubrificante. A morfologia resultante após o processo de recartilhado é mostrado na Fig. 3.3.

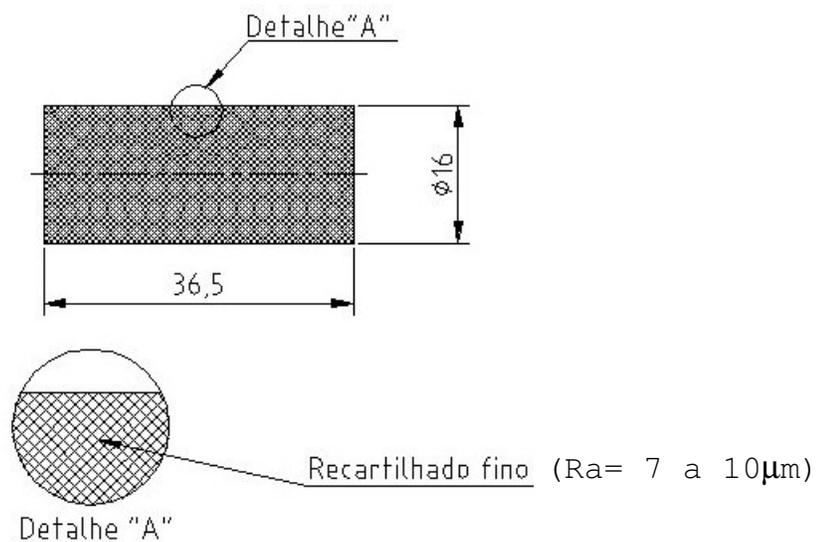


Figura 3.3 – Morfologia da superfície do tarugo recartilhado.

3.1.4 - Tratamento Superficial

Para fins de comparação dos resultados obtidos nos diversos ensaios de extrusão, a fosfatização de zinco foi usada em um desses ensaios, que foi adotado como **padrão de referência**, visto que essa é a condição atualmente utilizada pela indústria. Os demais ensaios não receberam nenhum tratamento superficial.

Para medir a camada de fosfato depositada sobre os tarugos foi utilizado um aparelho Mitutoyo denominado Medidor de Camada, modelo NEO-DERM 179-701.

3.1.5 – Dimensões

Para a determinação das dimensões iniciais do tarugo e da peça extrudada após o primeiro passe de extrusão, foram feitas as seguintes considerações:

- empregar dimensões de fornecimento comercial;
- redução de área que não excedesse 22% para o material utilizado, pois é um fator limitante para a extrusão livre, com o qual se deseja evitar o recalque do tarugo;
- força de extrusão que não ultrapassasse 100 kN, devido à limitação da célula de carga empregada nos ensaios;
- comprimento inicial do tarugo, conforme a fórmula de EULER (BEER & JOHNSTON Jr, 1989) e conforme índice de esbeltez (LANGE, 1985);

Diâmetro inicial (D_i):

Valor adotado: 16 mm ($\cong 5/8$ ").

Diâmetro final (D_f):

Valor adotado: 14,15 mm (atendendo a redução máxima de 22% de área).

$$\text{Redução de área: } \left(1 - \left(\frac{D_f}{D_i} \right)^2 \right) \cdot 100 = 21,79\%$$

Força de extrusão:

Para o cálculo da força de extrusão foi usado o Método do Limite Superior, no qual calcula-se a tensão de extrusão (σ_{ext}), conforme a expressão 3.1 (AVITZUR, 1964). Esse método assume as hipóteses de que o tarugo a ser extrudado é isotrópico, incompressível e que não apresenta o efeito do endurecimento a frio (Silva, 1989).

$$\sigma_{\text{ext}} = \sigma_{0M} 2 f(\alpha) \left\{ \ln \frac{R_i}{R_f} + \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) + \mu \left[\cot \alpha \left(1 + \ln \frac{R_i}{R_f} \right) \ln \frac{R_i}{R_f} + \frac{L'}{R_f} \right] \right\} \quad (3.1)$$

Onde:

σ_{ext} = Tensão de extrusão

R_i = raio inicial do tarugo (8 mm)

R_f = raio final do tarugo (7,065 mm)

α = ângulo do cone da matriz ($15^\circ \equiv 0,2618$ radianos)

μ = coeficiente de atrito (adotado 0,1)

L' = comprimento do anel de calibração (3,15 mm)

$f(\alpha)$ = fator de forma para o ângulo do cone da matriz (adimensional), que é dado pela expressão 3.2 (AVITZUR, 1964):

$$f(\alpha) = (1 - \cos \alpha) \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha} + \frac{1 - \frac{11}{12}}{\sqrt{\frac{11}{12}}} \ln \frac{1 + \sqrt{\frac{11}{12}}}{\sqrt{\frac{11}{12}} \cos \alpha + \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2 \alpha}} \frac{1}{\sin^2 \alpha} \quad (3.2)$$

Substituindo pelos valores acima e o ângulo em radianos, temos: $f(\alpha) = 1,0014$

σ_{0M} = Tensão média de escoamento do material normalizado, calculado pela expressão 3.3 (HELMAN & CETLIN, 1983) e representado na Fig. 3.4.

$$\sigma_{0M} = \left(\frac{1}{\epsilon_f} \right) \left(\frac{k (\epsilon_f)^{n'+1}}{n'+1} \right) \quad (3.3)$$

onde k e n' são obtidos conforme descrito no item item 3.5.1 e os valores utilizados conforme Tab. 4.1 (normalizado):

k = coeficiente de resistência.

n' = coeficiente de escoamento.

ϵ_f = deformação verdadeira para a redução de área no passe

$$\epsilon_f = 2 \ln \left(\frac{R_0}{R_f} \right) = 0,24575.$$

Assim, tem-se que a $\sigma_{0M} = 694,40$ MPa.

Substituindo os valores acima na expressão 3.1, tem-se:

$$\sigma_{ext} = 442,33 \text{ MPa.}$$

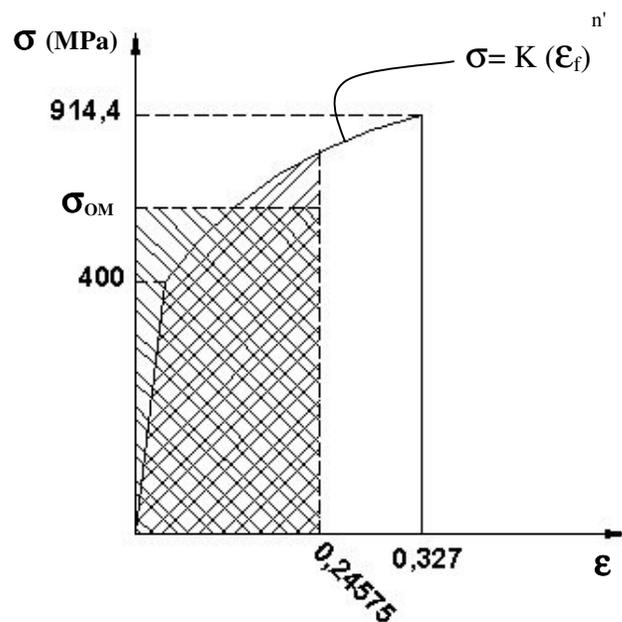


Figura 3.4 – Tensão x Deformação (verdadeira).

O cálculo da força de extrusão é dado pela expressão 3.4:

$$F_{\text{ext}} = \sigma_{\text{ext}} \cdot A_{\text{tarugo}} \quad (3.4)$$

onde:

F_{ext} = força de extrusão

A_{tarugo} = área inicial do tarugo (201,06 mm²)

Tem-se:

$$F_{\text{ext}} = 88935,72 \text{ N}$$

Comprimento inicial do tarugo:

Para se evitar a flambagem do tarugo, o comprimento foi calculado segundo a fórmula de EULER (BEER & JOHNSTON Jr, 1989):

$$P_{\text{cr}} = \frac{\pi^2 E I}{L_e^2 s} \quad (3.6) \qquad L = \frac{L_e}{0,5} \quad (3.7)$$

Onde:

P_{cr} = carga crítica, ou seja, é a força de extrusão (N).

E = módulo de elasticidade do aço (210000 N/mm²).

I = momento de inércia da seção transversal ($I = \frac{\pi D_i^4}{64} = \text{mm}^4$).

L_e = comprimento de flambagem (mm).

s = fator de segurança (adimensional = 3).

L = comprimento não sujeito a flambagem (mm).

Substituindo os valores, temos:

$$L_e = 89,19 \text{ mm}$$

$$L = 178,37 \text{ mm}$$

Comprimento do tarugo = $L - \text{Comprimento do punção} = 178,37 - 126 = 52,37 \text{ mm}$.

Conforme Lange (1985), o comprimento do tarugo não deve exceder o índice de esbeltez.

Então:

Comprimento do tarugo $\leq 2,3 \cdot D_i \leq 36,8 \text{ mm}$.

Portanto o comprimento inicial do tarugo adotado (L_0) foi de **36,5 mm**.

As dimensões iniciais e finais após o primeiro passe de extrusão do tarugo são mostradas nas Fig. 3.5 e 3.6.

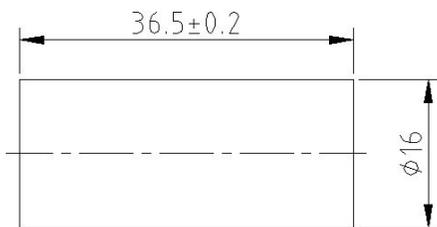


Figura 3.5 – Dimensões iniciais do tarugo.

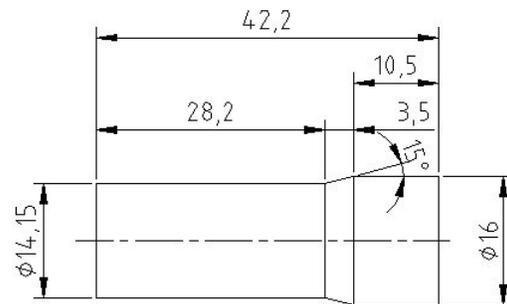


Figura 3.6 – Dimensões finais do tarugo (1º passe de extrusão).

3.2 - Escolha dos Lubrificantes

Foram escolhidos quatro tipos de lubrificantes, sendo dois deles comerciais. Um terceiro lubrificante já utilizado na indústria em operações de conformação a frio no processo de trefilação de tubos e por fim um quarto lubrificante baseado em *farinha de trigo*. A seguir, enumeram-se os lubrificantes empregados:

- *Reniform MZA 20* (FUCHS do Brasil S.A.).
- *Extrudoil 319 MOS* (FUCHS do Brasil S.A.).

- Sabão em pó para máquinas de lavar roupa.
- Farinha de trigo comercial.

O lubrificante *Reniform MZA20* escolhido é baseado em óleo mineral, formulados com aditivos de extrema pressão e matéria graxa. O *Extrudoil 319MOS* é um óleo semi sintético. Embora estes lubrificantes já sejam usados nas operações de conformação, os mesmos são utilizados acompanhados pelo revestimento de fosfato de zinco nos tarugos.

Os procedimentos realizados para revestir os tarugos com o *sabão em pó* e com a *farinha de trigo* foram semelhantes, como descritos a seguir:

Lubrificante *sabão em pó*:

- a) Passar o tarugo em uma solução de água com 10% de *sabão em pó*;
- b) Passar o tarugo no *sabão em pó* seco;
- c) Retirar o excesso, movimentando o tarugo entre as mãos.
- d) Colocar o tarugo em uma estufa à 100°C durante 5 minutos para retirar a umidade.

Lubrificante *farinha de trigo*:

- e) Passar o tarugo em uma solução de água com 10% de *farinha de trigo*;
- f) Passar o tarugo na *farinha de trigo* seca;
- g) Retirar o excesso, movimentando o tarugo entre as mãos.
- h) Colocar o tarugo em uma estufa à 100°C durante 5 minutos para retirar a umidade.

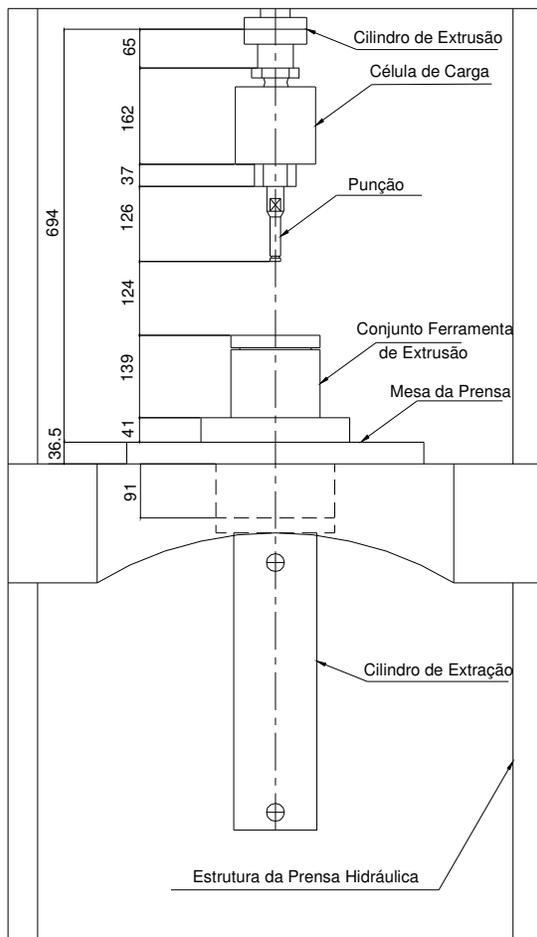
3.3 - Projeto do Ferramental

As ferramentas foram projetadas de modo a permitir a lubrificação eficiente da região de deformação, com fornecimento contínuo do lubrificante para os ensaios com os óleos mineral e semi sintético empregados. Assim, o lubrificante pode ser pressurizado pelo próprio processo de extrusão e permanecer contido num circuito hidráulico facilitando seu manuseio, evitando vazamentos e possíveis problemas operacionais.

Esse tipo de lubrificação foi denominado *hidrostático*, enquanto os ensaios realizados sem a pressurização do lubrificante foram denominados *por imersão*.

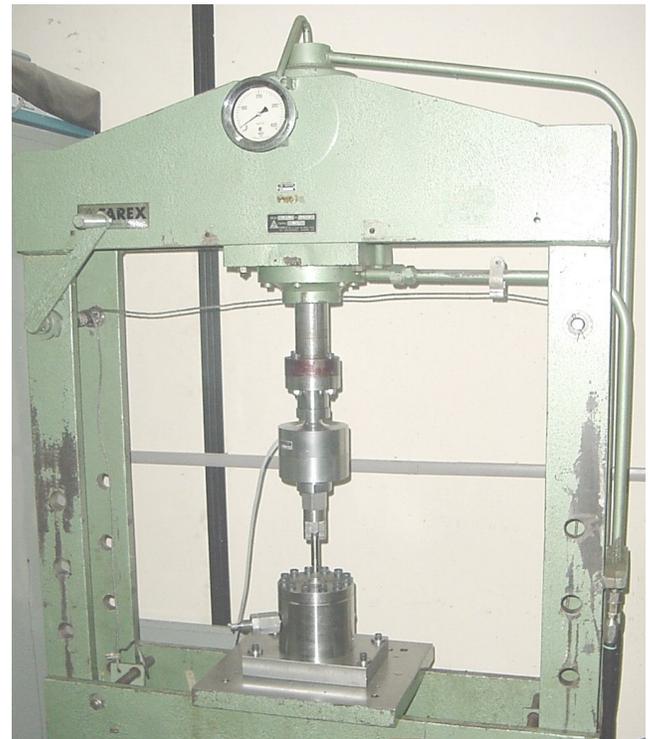
Com essas ferramentas é possível empregar os equipamentos de extrusão atualmente utilizados na indústria, que a princípio não aceitariam o uso de lubrificantes líquidos.

O esquema geral de montagem da ferramenta do equipamento de laboratório e a adaptação na prensa hidráulica após a fabricação são mostrados na Fig. 3.7. A Fig. 3.8(a) mostra o desenho de montagem da ferramenta de extrusão, e na Fig. 3.8(b) tem-se a mesma ferramenta sobre a mesa da prensa para os ensaios de laboratório. A Tab. 3.4 mostra os componentes e acessórios utilizados na montagem do conjunto da ferramenta de extrusão.



Dimensões em mm

(a)



(b)

Figura 3.7 – Esquema geral de montagem da ferramenta na prensa.

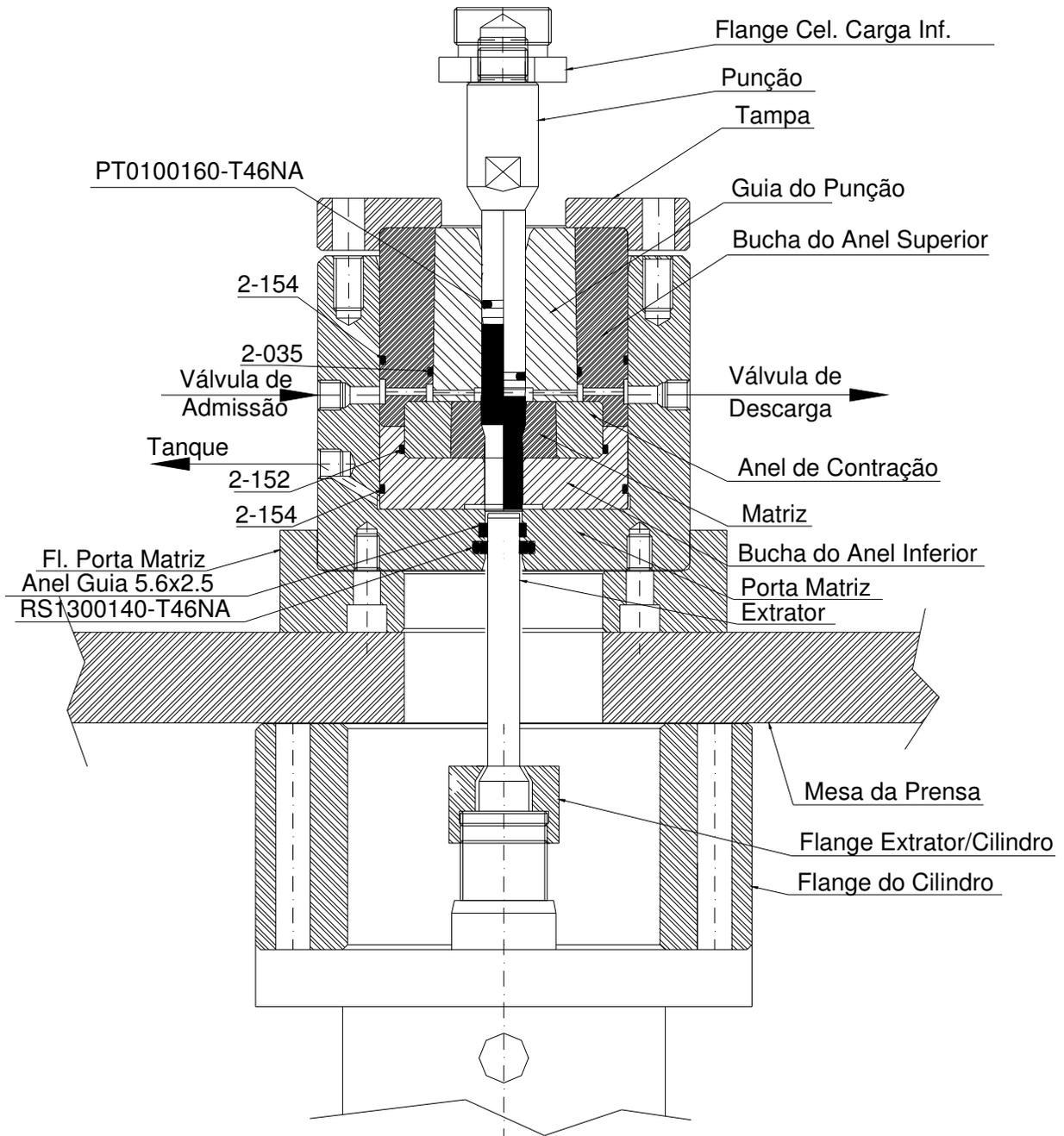


Figura 3.8 (a) – Desenho de Montagem do Conjunto da Ferramenta de Extrusão.

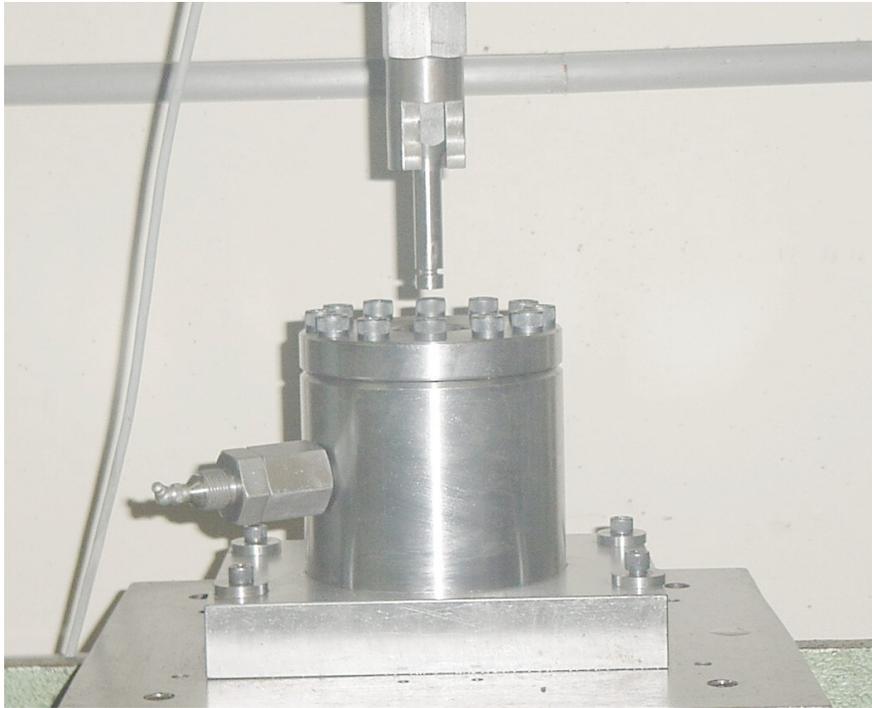


Figura 3.8 (b) – Montagem do Conjunto da Ferramenta de Extrusão sobre a mesa da prensa.

Tabela 3.4 – Lista de peças e acessórios do conjunto de ferramenta de extrusão.

DENOMINAÇÃO	QUANTIDADE	MATERIAL	ANEXO
Flange da Célula de Carga Inferior	01	Aço SAE 4140	A
Punção	01	Aço ASTM M2	
Tampa	01	Aço SAE 1045	
Guia do Punção	01	Aço ASTM M2	
Bucha do Anel Superior	01	Aço ASTM H13	
Anel de Contração	01	Aço ASTM H13	
Matriz (1º estágio)	01	Aço ASTM M2	
Matriz (2º estágio – montagem)	01	Aço ASTM M2	
Bucha do Anel Inferior	01	Aço SAE 4340	
Porta Matriz	01	Aço SAE 4140	
Extrator	01	Aço ASTM H13	

DENOMINAÇÃO	QUANTIDADE	MATERIAL	ANEXO
Flange do Extrator / Cilindro	01	Aço SAE 1045	A
Flange de Apoio da Ferramenta	01	Aço SAE 1045	
Flange do Cilindro	01	Aço SAE 1020	
Flange da Célula Superior	01	Aço SAE 4140	
PT0100160-T46NA	01	Turcite + Buna"n"	B
RS1300140-T46NA	01	Turcite + Buna"n"	
Anel o'ring (2-154)	02	buna "n"	
Anel o'ring (2-035)	01	buna "n"	
Anel o'ring (2-152)	01	buna "n"	
Anel Guia	01	Turcite	
Célula de Carga de 10t.	01	---	

3.4 – Planejamento Experimental

3.4.1 – Determinação do Tamanho da Amostra

Foram realizados 3 réplicas no mínimo para cada ensaio de extrusão, obedecendo as seguintes condições, definidas por Dally (1993), conforme fig. 3.9:

- intervalo de confiança $2\delta \rightarrow$ faixa tolerada $\pm 10\%$ do valor da média da amostragem.
- nível de confiança de 90%.
- distribuição de t de Student para pequenas amostras, ou seja, $n < 20$ réplicas.

Estimou-se o valor de n (número de réplicas por ensaio) pela expressão 3.8:

$$n = \left(\frac{tS}{\delta} \right)^2 \quad (3.8)$$

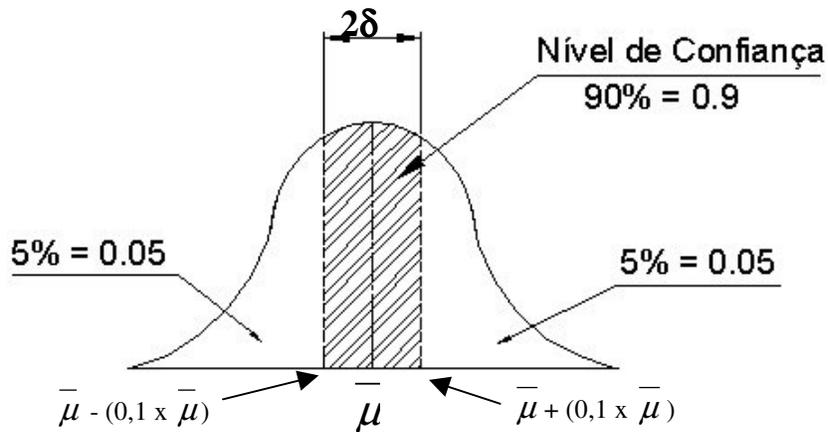


Figura 3.9 – Faixa tolerada para as amostras.

3.4.2 – Planejamento Fatorial

O planejamento fatorial é indicado quando deseja-se estudar os efeitos de duas ou mais variáveis de influência. Nesse planejamento todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável são investigadas, ou seja, analisa-se a influência de cada variável. Quando o efeito de uma variável depende do nível das outras variáveis, diz-se que há interação entre as variáveis (MONTGOMERY, 1991).

Devido ao pequeno número de ensaios utilizados no planejamento fatorial, esse planejamento é indicado para o início do procedimento experimental quando há necessidade de definir-se as variáveis de influência e estudar seus efeitos sobre a variável de resposta escolhida.

As variáveis de influência definidas para o nosso estudo foram:

- **tratamento térmico** em 2 níveis (normalizado e recozido).
- **acabamento superficial** em 2 níveis (laminado e recartilhado).
- **processo de lubrificação** em 2 níveis (imersão e hidrostático).
- **lubrificante** em 4 níveis (*Renoform MZA20, Extrudoil 319MOS, sabão em pó e farinha de trigo*).

A variável de resposta medida nos ensaios de extrusão foi a **força de extrusão**. O Anexo C apresenta o procedimento estatístico utilizado.

3.4.3 – Planejamento Aleatorizado por Níveis

Esse planejamento é recomendado para procedimentos experimentais nos quais realizam-se ensaios com *a* diferentes níveis de uma única variável de influência, com *n* réplicas para cada nível (MONTGOMERY, 1991). Neste trabalho, a variável de influência estudada foi o lubrificante.

O Anexo D apresenta os procedimentos para se utilizar esse planejamento segundo Montgomery (1991).

3.5 – Descrição dos Ensaios

3.5.1 – Ensaios com a Matéria-Prima

Foram realizados os seguintes ensaios:

- ensaio de tração uniaxial para levantamento da curva σ_x e do material e obtenção da equação de tendência da curva do material na região plástica. Estas informações foram usadas no cálculo do comprimento inicial do tarugo. Os ensaios foram realizados com uma máquina universal de ensaios MTS, modelo TestStar II-810 do Laboratório de Propriedades Mecânicas – DEMA – FEM – UNICAMP.
- ensaio metalográfico para caracterização das condições metalúrgicas normalizada e recozida, pela análise de micrografia no microscópio Neophot do Laboratório de Caracterização de Materiais – DEMA – FEM – UNICAMP.

- validação do certificado de qualidade do material fornecido pelo fabricante, quanto à composição química, foi realizado pelo método de análise semi-quantitativa em porcentagem de massa, no Laboratório de Caracterização por Fluorescência de Raios X – DEMA – FEM – UNICAMP.

3.5.2 – Ensaio com o Tarugo

Os ensaios de rugosidade superficial e controle dimensional foram realizados nos tarugos nas seguintes condições:

- ausência de tratamento superficial (laminado, recartilhado, normalizado e recozido).
- com tratamento superficial (laminado e normalizado).

A rugosidade foi medida com um rugosímetro Mitutoyo, modelo SurfTest – 211 e o controle dimensional foi feito com um paquímetro (0-150mm / 0,05mm)

3.5.3 – Ensaio com os Lubrificantes

Para os lubrificantes líquidos utilizados nos ensaios de extrusão foi realizado o ensaio de viscosidade dinâmica, empregando-se um reômetro rotativo de geometria de placas paralelas do Departamento de Engenharia de Petróleo – FEM – UNICAMP.

3.5.4 – Ensaio de Extrusão

Foram realizados os ensaios de extrusão para o primeiro estágio (primeira redução de área de 22%) listados na tabela 3.5 de forma aleatória, para se obter como variável de resposta a força de extrusão e, com os resultados de força, analisar o desempenho do lubrificante e das demais variáveis de influência no processo de extrusão.

Tabela 3.5 – Condições dos Ensaios de extrusão (● não foi realizado o ensaio).

Lubrificante	Tratamento Térmico	Acabamento Superficial	Processo de Lubrificação	Número da Réplica	Seqüência da réplica
Renoform MZA20	Normalizado	Laminado	Imersão	3	19
				2	15
				1	5
			Hidrostático	2	17
				1	7
				3	20
		Recartilhado	Imersão	2	9
				1	2
				3	11
			Hidrostático	3	14
				1	4
				2	12
	Recozido Pleno	Laminado	Imersão	2	16
				3	21
				1	3
			Hidrostático	2	18
				1	13
				3	23
		Recartilhado	Imersão	3	22
				1	6
				2	8
			Hidrostático	1	1
				2	10
				3	24
Extrudoil 319MOS	Normalizado	Laminado	Imersão	3	24
				2	20
				1	17
			Hidrostático	3	21
				1	5
				2	14
		Recartilhado	Imersão	3	19
				2	11
				1	1
			Hidrostático	1	8
				2	9
				3	16
	Recozido Pleno	Laminado	Imersão	2	6
				3	22
				1	4

Tabela 3.5 – Condições dos Ensaios de extrusão (• não foi realizado o ensaio) – continuação.

Lubrificante	Tratamento Térmico	Acabamento Superficial	Processo de Lubrificação	Número da Réplica	Seqüência da Réplica
Extrudoil 319MOS	Recozido Pleno	Laminado	Hidrostático	3	18
				1	3
				2	15
		Recartilhado	Imersão	2	12
				3	23
				1	2
			Hidrostático	3	13
				2	10
				1	7
				•	•
Farinha de Trigo	Normalizado	Laminado	Imersão	3	10
				1	1
				2	5
			Hidrostático	•	•
				•	•
				•	•
		Recartilhado	Imersão	1	2
				2	4
				3	8
			Hidrostático	•	•
				•	•
				•	•
Farinha de Trigo	Recozido Convencional	Laminado	Imersão	3	12
				1	3
				2	6
				4	13
			Hidrostático	•	•
				•	•
		Recartilhado	Imersão	2	9
				3	11
				1	7
			Hidrostático	•	•
				•	•
				•	•
Sabão em Pó	Normalizado	Laminado	Imersão	1	7
				3	11
				2	9
			Hidrostático	•	•
				•	•
				•	•

Tabela 3.5 – Condições dos Ensaios de extrusão (● não foi realizado o ensaio) – continuação.

Lubrificante	Tratamento Térmico	Acabamento Superficial	Processo de Lubrificação	Número da Réplica	Seqüência da Réplica
Sabão em Pó	Normalizado	Recartilhado	Imersão	2	5
				1	4
				3	10
			Hidrostático	●	●
				●	●
				●	●
	Recozido Convencional	Laminado	Imersão	3	8
				1	2
				2	6
			Hidrostático	●	●
				●	●
				●	●
		Recartilhado	Imersão	3	12
				1	1
				2	3
Hidrostático	●	●			
	●	●			
	●	●			
Fosfatização de zinco+Molicote	Normalizado	Laminado	Imersão	1	1
				2	2
				3	3

Para o segundo estágio de extrusão (segunda redução de área de 22%), as condições de ensaio foram definidas a partir dos resultados obtidos nos ensaios listados na tabela 3.5. Assim somente foram realizados ensaios com os lubrificantes considerados satisfatórios, ou seja, com valores de forças de extrusão estatisticamente menores ou iguais do que os obtidos com o padrão de referência.

Os ensaios para o segundo estágio de extrusão foram realizados de forma individual, ou seja, procedeu-se a deformação no primeiro estágio para todas as réplicas, utilizando cada lubrificante associado a uma determinada condição metalúrgica e de acabamento superficial. Em seguida, realizou-se o segundo estágio de deformação para as mesmas réplicas, assim caracterizando-se passes subseqüentes de extrusão. Esse procedimento foi aplicado para todos os lubrificantes avaliados nos ensaios do segundo estágio de extrusão.

No caso dos lubrificantes sólidos, o processo de lubrificação utilizado para o ensaio foi o revestimento do tarugo com o lubrificante conforme apresentado no item 3.2. Revestiu-se o tarugo para o primeiro estágio e antes de executar o segundo estágio, a peça já conformada recebeu novamente o revestimento do lubrificante sólido. Para os ensaios com os lubrificantes líquidos foi realizado apenas uma lubrificação (*por imersão*) antes do primeiro estágio e para o segundo estágio utilizou-se o lubrificante remanescente do primeiro estágio de extrusão.

A força de extrusão foi medida ao longo do processo com uma célula de carga HBM modelo U2A. Os valores medidos foram condicionados e arquivados, empregando-se o sistema de aquisição Spider8. A Fig. 3.10 ilustra a montagem da célula de carga e o sistema de aquisição.



Figura 3.10 – Sistema de aquisição de dados: a) Célula de carga;
b) Conjunto da ferramenta de extrusão; c) Spider8.

3.5.5 – Ensaio com os Produtos Extrudados

Foram realizadas as seguintes medições nos produtos após o processo de extrusão, a fim de compará-los com os obtidos no processo atualmente utilizado na indústria, que é representado pelo tratamento superficial de fosfatização de zinco associado ao lubrificante a base de MoS_2 .

- monitoramento da rugosidade superficial dos produtos.
- monitoramento dimensional do diâmetro extrudado.

A rugosidade foi medida com um rugosímetro Mitutoyo, modelo Surf test – 211 e o controle dimensional foi feito com um micrômetro (0-25mm / 0,001mm).

Capítulo 4

Apresentação e Discussão dos Resultados

4.1 – Ensaios com a Matéria Prima, Tarugo e o Lubrificante

4.1.1 – Matéria Prima

Nos ensaios de tração uniaxial com a matéria-prima, foram obtidos os valores para as curvas $\sigma \times \varepsilon$ do material SAE 8620 na condição metalúrgica *recozido*, tendo sido utilizado o processo de recozimento #1 (recozimento pleno), conforme descrito no Capítulo 3 (Tab. 3.3) e também na condição metalúrgica *normalizado*.

Os valores médios do limite de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento foram extraídos das Fig. 4.1 e 4.3.

As Fig. 4.2 e 4.4 apresentam as curvas de escoamento (tensão verdadeira em função da deformação logarítmica). Com essas curvas, obtém-se a expressão para o material na condição normalizado que foi utilizada para o cálculo da tensão média de escoamento relativa à redução de área efetuada no processo.

Os valores médios das propriedades mecânicas obtidas dos ensaios de tração uniaxial e a equação da curva do material na condição *normalizado* e *recozido pleno* são listados na Tab. 4.1.

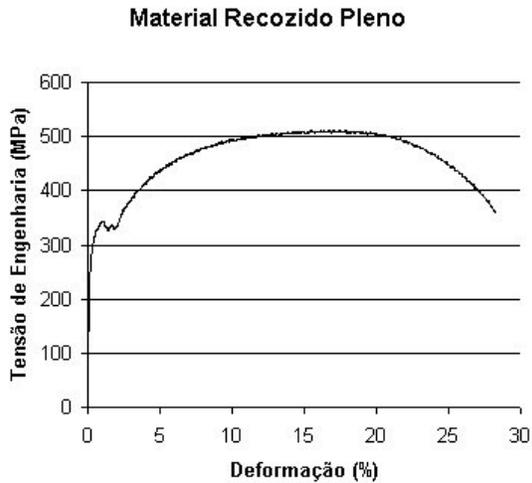


Figura 4.1 – Curva $\sigma_x \epsilon$ de Engenharia (Recozido Pleno).

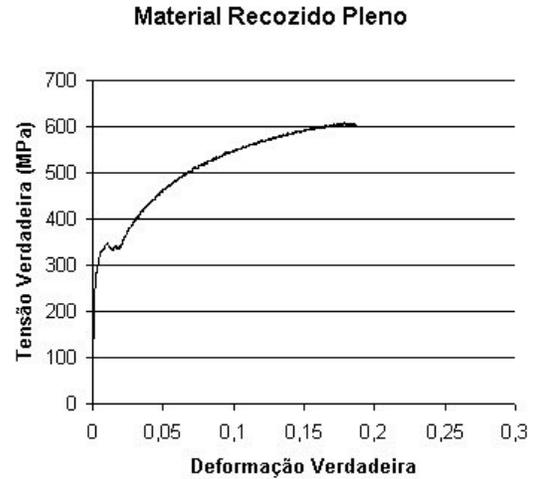


Figura 4.2 – Curva $\sigma_x \epsilon$ Verdadeira (Recozido Pleno).

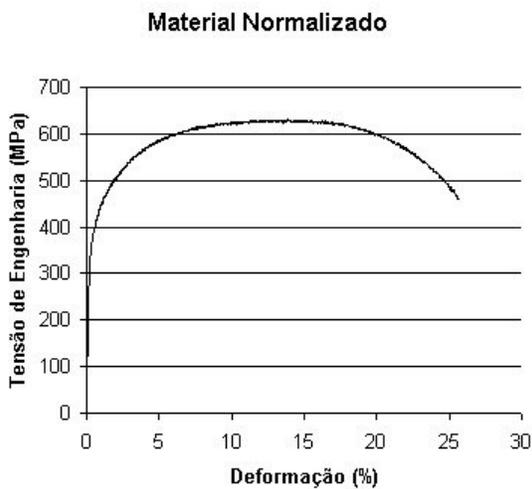


Figura 4.3 – Curva $\sigma_x \epsilon$ de Engenharia (Normalizado).

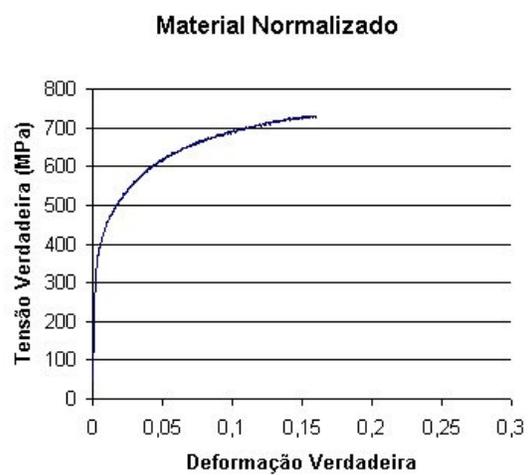


Figura 4.4 – Curva $\sigma_x \epsilon$ Verdadeira (Normalizado).

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios mecânicos no aço SAE 8620.

Condição Metalúrgica	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão última de resistência à tração (MPa)	Alongamento máximo (%)	Equação da curva ($\sigma = k \cdot \epsilon^{n'}$)
<i>recozido pleno</i>	340	510	28,5	$\sigma = 911,3 \cdot \epsilon^{0,2301}$
<i>normalizado</i>	360	630	26	$\sigma = 1185,4 \cdot \epsilon^{0,2322}$

Também foram realizados ensaios de dureza Brinell nos corpos de prova tratados termicamente, cujos resultados são mostrados na Tab. 4.2.

A Tab. 3.2 (item 3.1.2) mostra as propriedades mecânicas para o material na condição metalúrgica recozida comercial, que equivale a um recozimento convencional e também na condição metalúrgica normalizada. Como se observa, as propriedades mecânicas apresentadas na Tab. 4.1 para o material recozido pleno são um pouco menores do que as mostrados na Tab. 3.2. Já para o material normalizado, essas propriedades são semelhantes. Os valores de dureza Brinell para todas as condições (recozimento convencional e normalização) encontram-se próximos dos valores recomendados.

Também analisou-se a composição química dos principais componentes do material, com exceção da quantidade de carbono. A Tab. 4.3 fornece os valores obtidos conforme o procedimento indicado no item 3.5.1, e os indicados no certificado de qualidade fornecido pelo fabricante da matéria-prima.

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de dureza aço SAE 8620.

Condição Metalúrgica	Processo	Parâmetros do Instrumento	Dureza
<i>recozido pleno</i>	01	força 31,25 e esfera ϕ 2,5 mm	115 - 121 Brinell
<i>recozido convencional</i>	02	força 62,5 e esfera ϕ 2,5 mm	146 - 150 Brinell
<i>normalizado</i>	---	força 62,5 e esfera ϕ 2,5 mm	174 - 185 Brinell

Tabela 4.3 - Composição química em porcentagem de peso do aço SAE 8620.

	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% de Massa)							
	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al
Laboratório	0.223	0.785	0.015	0.021	0.437	0.444	0.298	0,045
Certificado	0.220	0.710	0.015	0.012	0.420	0.420	0.180	0,028

As diferenças observadas na Tab. 4.3 podem estar relacionadas com a limitação do equipamento (Fluorescência de Raios X) utilizado para verificação da matéria-prima recebida. O

equipamento realiza uma análise semi-quantitativa, utilizando o método *FP – Fundamental Parameter*, que calcula a quantidade do componente do aço (% de massa) conforme a intensidade de fluorescência de Raios X medida e comparada com a intensidade teórica do banco de dados do *software* de análise. Portanto, o equipamento não tem uma curva calibrada para o aço analisado, e conseqüentemente ocorrem pequenas diferenças de composição entre as análises.

O ensaio metalográfico resultou em micrografias que caracterizam o aço como sendo de baixo carbono. O material foi atacado com Nital a 10% e suas micrografias são apresentadas nas Fig. 4.5 e 4.6.

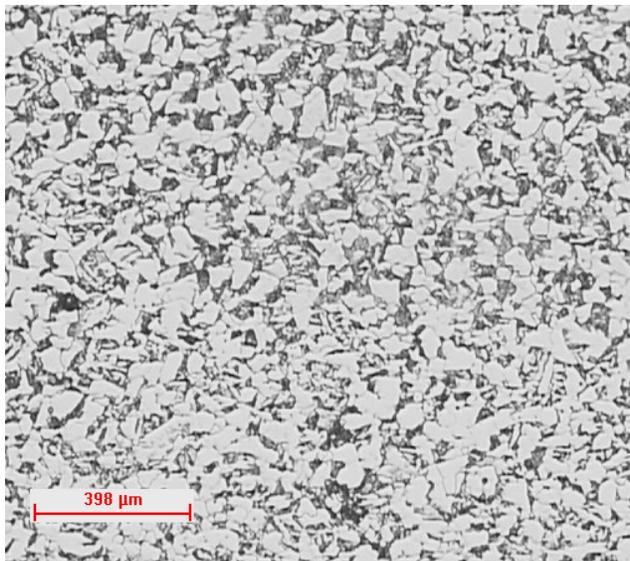


Figura 4.5 – Secção transversal do material *normalizado*.

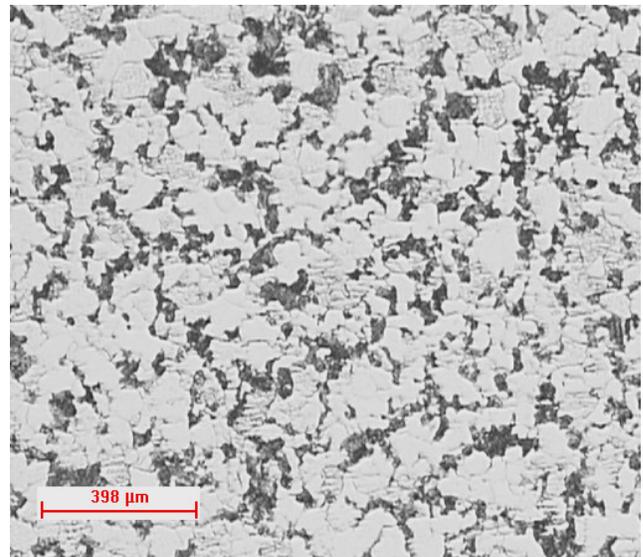


Figura 4.6 – Secção transversal do material *recozido pleno* (Processo #1).

Como se observa nessas figuras, ambas micrografias apresentam grãos ferríticos e perlíticos, típicos de estruturas recristalizadas com grãos equiaxiais homogeneamente distribuídos. O material recozido apresenta grãos maiores que o normalizado, o que explica os maiores valores encontrados para a dureza e para o limites de escoamento e resistência na condição como normalizado.

4.1.2 – Tarugo

Foram realizadas medidas de rugosidade superficial e os resultados mínimos e máximos obtidos a partir de diferentes condições do tarugo inicial são mostrados na Tab. 4.4.

Nota-se que os tarugos normalizado/recartilhado e recozido/recartilhado apresentam valores de rugosidade média que excedem o campo de tolerância especificado no item 3.1.3. Isto ocorreu em um primeiro lote de tarugos encaminhados para a operação de recartilhamento (aproximadamente 30% do total dos tarugos recartilhados), sendo que os demais tarugos estavam dentro do campo de tolerância com Ra entre 7 e 10 μm .

Tabela 4.4 – Rugosidade superficial média (Ra).

	CONDIÇÃO METALÚRGICA / ACABAMENTO SUPERFICIAL				
	Normalizado Laminado	Normalizado Recartilhado	Recozido Laminado	Recozido Recartilhado	Normalizado Laminado (Fosfatizado)
RUGOSIDADE (Ra)	2,3 – 3,6 μm	5 – 10,8 μm	2,1 – 3,5 μm	4,1 – 10 μm	3,9 – 5 μm

Os tarugos que receberam tratamento superficial de fosfatização de zinco foram também analisados quanto à espessura da camada de fosfato depositada sobre o metal base. Os resultados das medições estão entre 14 μm e 22 μm , ou seja, conforme a camada praticada nos processos de extrusão a frio industriais e recomendada pela norma VDI 5-3164 (1980).

4.1.3 – Lubrificantes

Os ensaios de viscosidade dinâmica nos óleos lubrificantes fornecidos pela FUCHS do Brasil S.A., mostraram-se satisfatórios, visto que os resultados obtidos estão coerentes com as informações das fichas técnicas dos produtos. Para o lubrificante *Reniform MZA20* o valor da viscosidade dinâmica média foi de 197,3 cSt e para o lubrificante *Extrudoil 319MOS* foi de 69,3 cSt.

4.2 – Primeiro Estágio de Deformação

4.2.1 – Ensaio de Extrusão

Esses ensaios de extrusão foram realizados de acordo com as condições estabelecidas na Tab. 3.5. Os resultados desses ensaios de extrusão em termos de força, que foi definida como variável de resposta, são apresentados nas Tab. 4.5 e 4.6, para as condições *normalizado* (condição de fornecimento pelo fabricante) e *recozido* (recozido pleno - processo #1 - para os lubrificantes *Renoform MZA20* e *Extrudoil 319MOS*, e recozido convencional – processo # 2 - para os lubrificantes *sabão em pó* e *farinha de trigo* respectivamente).

Pode-se notar que ambas as tabelas apresentam números de réplicas diferentes entre os ensaios, contudo todos os ensaios contemplam as condições apresentadas no item 3.4.1 (método usado para a determinação do tamanho da amostra).

Na Tab. 4.5 para os ensaios com o lubrificante *Renoform MZA20* com acabamento superficial laminado e com processo de lubrificação hidrostático, tem-se apenas 2 réplicas pois durante os ensaios houve necessidade de invalidar uma réplica.

Para o ensaio com o lubrificante *Extrudoil 319MOS* associado ao acabamento laminado e aos processos de lubrificação por imersão e hidrostático, tem-se apenas 1 réplica para cada ensaio, pois a força de extrusão excedeu 150 kN, e não foi possível registrar essa força pela limitação da célula de força.

Para os lubrificantes *farinha de trigo* e *sabão em pó* não foram realizados ensaios na condição de processo de lubrificação hidrostático, pois esses lubrificantes são sólidos e portanto incompressíveis.

Na Tab. 4.6 para os ensaios com o lubrificante *Renoform MZA20* com acabamento superficial laminado e com processo de lubrificação por imersão, tem-se 2 réplicas, pois foram perdidas as informações da réplica nº 2.

Tabela 4.5 – Resultados da força de extrusão para o material normalizado (10^4 N).

	TRATAMENTO TÉRMICO (NORMALIZADO)															
	ACABAMENTO SUPERFICIAL								ACABAMENTO SUPERFICIAL							
	LAMINADO								RECARILHADO							
	PROCESSO DE LUBRIFICAÇÃO				PROCESSO DE LUBRIFICAÇÃO				PROCESSO DE LUBRIFICAÇÃO				PROCESSO DE LUBRIFICAÇÃO			
	IMERSÃO				HIDROSTÁTICO				IMERSÃO				HIDROSTÁTICO			
LUBRIFICANTE	R1	R2	R3	R4	R1	R2	R3	R4	R1	R2	R3	R4	R1	R2	R3	R4
RENOFORM MZA20	13,02	13,72	14,01	-	13,03	-	13,45	-	8,12	8,45	8,72	-	8,13	9,55	9,63	-
EXTRUDOIL 319MOS	14,58	-	-	-	-	14,40	-	-	8,89	9,92	11,48	-	8,24	8,27	8,90	-
FARINHA DE TRIGO	9,29	10,45	9,47	-	-	-	-	-	8,42	8,62	8,37	-	-	-	-	-
SABÃO EM PÓ	10,94	10,84	10,80	-	-	-	-	-	9,04	8,08	8,21	-	-	-	-	-

Tabela 4.6 – Resultados da força de extrusão para o material recozido (10^4 N) – *recozimento pleno; **recozimento convencional.

	TRATAMENTO TÉRMICO (RECOZIDO)															
	ACABAMENTO SUPERFICIAL								ACABAMENTO SUPERFICIAL							
	LAMINADO								RECARTILHADO							
	PROCESSO DE LUBRIFICAÇÃO				PROCESSO DE LUBRIFICAÇÃO				PROCESSO DE LUBRIFICAÇÃO				PROCESSO DE LUBRIFICAÇÃO			
	IMERSÃO				HIDROSTÁTICO				IMERSÃO				HIDROSTÁTICO			
LUBRIFICANTE	R1	R2	R3	R4	R1	R2	R3	R4	R1	R2	R3	R4	R1	R2	R3	R4
RENOFORM MZA20 (*)	8,66	-	8,06	-	9,82	8,68	9,47	-	7,30	8,24	7,87	-	7,62	7,84	8,58	-
EXTRUDOIL 319MOS (*)	11,48	10,99	10,66	-	8,80	8,07	9,05	-	9,80	12,66	9,34	-	11,2	12,13	12,62	-
FARINHA DE TRIGO (**)	9,41	7,98	8,31	8,28	-	-	-	-	6,91	6,86	6,77	-	-	-	-	-
SABÃO EM PÓ (**)	8,82	10,23	8,39	9,57	-	-	-	-	9,81	9,91	9,94	-	-	-	-	-

Para os ensaios com os lubrificantes *farinha de trigo* e *sabão em pó* associados ao acabamento laminado e ao processo de lubrificação por imersão, tem-se 4 réplicas para atender as condições do cálculo do tamanho da amostra (expressão 3.8).

Para os lubrificantes *farinha de trigo* e *sabão em pó* não foram realizados ensaios na condição de processo de lubrificação hidrostático, como já explicado para a condição *normalizado*.

A Tab. 4.7 fornece os valores da força de extrusão para os ensaios com tarugos com tratamento superficial de fosfatização de zinco associado com um lubrificante líquido à base de MoS₂. O material está na condição *normalizado*, com acabamento superficial laminado e o processo de lubrificação com MoS₂ por imersão. Esses ensaios foram realizados para simular-se o processo atualmente utilizado pela indústria e seus resultados foram usados como padrão de referência na análise da força de extrusão.

Tabela 4.7 – Resultados da força de extrusão com a utilização do fosfato de zinco – padrão de referência (10⁴ N).

NORMALIZADO + LAMINADO + IMERSÃO + FOSFATIZAÇÃO CRISTALINA DE ZINCO			
LUBRIFICANTE	R1	R2	R3
À base de MoS ₂	8,31	8,17	8,20

4.2.2 – Análise Estatística

A – Planejamento Fatorial

Os ensaios de extrusão foram realizados de forma aleatória, para que se permitisse o uso do planejamento fatorial. Como descrito no item 3.4.2, pela análise deste planejamento pode-se avaliar os efeitos das variáveis de influência e possíveis interações dessas variáveis.

O planejamento fatorial forneceu os seguintes resultados (com 95% de nível de confiança):

- **existe influência** das variáveis: lubrificante, tratamento térmico e acabamento superficial.
- **não existe influência** da variável processo de lubrificação.
- **existe interação** entre as 2 (duas) variáveis: lubrificante e tratamento térmico; lubrificante e acabamento superficial; tratamento térmico e acabamento superficial.
- **não existe interação** entre as 2 (duas) variáveis: lubrificante e processo de lubrificação; tratamento térmico e processo de lubrificação; acabamento superficial e processo de lubrificação.
- **existe interação** entre as 3 (três) variáveis: lubrificante, tratamento térmico e acabamento superficial.
- **existe interação** entre as 3 (três) variáveis: tratamento térmico, acabamento superficial e processo de lubrificação.
- **não existe interação** entre as 3 (três) variáveis: lubrificante, tratamento térmico e processo de lubrificação.
- **não existe interação** entre as 4 (quatro) variáveis: lubrificante, tratamento térmico, acabamento superficial e processo de lubrificação.

A partir dessas informações foi desconsiderada a influência do processo de lubrificação na força de extrusão. Pode-se observar a não influência desta variável e a não existência de interação isolada do processo de lubrificação com as outras variáveis de influência.

O processo de lubrificação hidrostático não atingiu os níveis de resultados esperados, possivelmente pelo fato de estar associado a um sistema deficiente de alimentação de lubrificante

dentro da ferramenta durante o processo de extrusão. Entretanto, não foi possível sanar essa deficiência até o término deste trabalho, o que se propõe realizar na sua seqüência.

B – Planejamento Aleatorizado por Níveis – Teste de Contraste

Após desconsiderar-se a influência do processo de lubrificação, prosseguiu-se a análise pelo contraste dos níveis do lubrificante com a associação isolada das diferentes condições de tratamento térmico e acabamento superficial.

Assim, analisou-se o lubrificante com o tarugo normalizado/laminado, normalizado/recartilhado, recozido/laminado e recozido/recartilhado.

O teste de contraste foi utilizado com 95% de nível de confiança e permitiu identificar as melhores condições em que se obtém a menor força de extrusão para cada associação.

Após identificar as melhores condições para cada associação do lubrificante com o tratamento térmico e acabamento superficial, realizou-se novamente o contraste dessas condições, agora incluindo o padrão de referência.

O teste de contraste mostrou que as médias apresentadas na Tab. 4.8 são estatisticamente iguais à média obtida no ensaio padrão tomado como referência.

O lubrificante *Extrudoil 319MOS*, um óleo semi sintético, mostrou-se o pior lubrificante comparado aos demais, pois apresentou desempenho inferior em todos os testes de contraste realizados.

Os quatro lubrificantes testados associados ao tarugo normalizado/laminado também foram insatisfatórios quando comparados ao padrão de referência. Isso está perfeitamente de acordo com o apresentado na revisão bibliográfica, na qual é recomendada utilizar-se o aço na condição

recozido, que apresenta a maior conformabilidade a frio (BILLIGMANN & FELDMANN, 1979).

Tabela 4.8 – Resultados experimentais – força de extrusão média.

Condições dos Ensaios	Força de extrusão (10^4 N)
Padrão de Referência: Fosfato de Zinco com MoS_2 – Normalizado – Laminado	8,23
Renoform MZA20 – Normalizado – Recartilhado	8,77
Renoform MZA20 – Recozido Pleno – Laminado	8,94
Renoform MZA20 – Recozido Pleno – Recartilhado	7,85
Sabão em Pó – Normalizado – Recartilhado	8,44
Farinha de Trigo – Normalizado – Recartilhado	8,47
Farinha de Trigo – Recozido Convencional – Laminado	8,50

Os lubrificantes *Renoform MZA20*, *farinha de trigo* e *sabão em pó* ensaiados com o tarugo na condição metalúrgica normalizado apresentaram-se satisfatórios, o que pode ser explicado pelo processo de recartilhado realizado na superfície do tarugo, que possibilitou que o lubrificante fosse carregado com maior facilidade para a região de conformação. O trabalho realizado por Kudo (1965), já sugeria que o atrito é afetado pelo lubrificante conduzido entre os sulcos das superfícies, o que indica a importância da topografia superficial do tarugo.

Para o lubrificante *Renoform MZA20*, utilizando os tarugos na condição metalúrgica recozido pleno, os resultados também foram satisfatórios, o que pode ser explicado por ter sido utilizado o processo de recozimento pleno. Já com o recozimento convencional a força de extrusão seria elevada e inviabilizaria o processo, pois o tarugo sofreria recalque preenchendo o recipiente e dificultaria o início da extrusão.

O lubrificante *sabão em pó* associado à condição metalúrgica recozido convencional e acabamento superficial laminado, não foi classificado como satisfatório quando comparado ao padrão de referência, pois apresentou resultados de força de extrusão com grande faixa de variação quando utilizado com acabamento laminado.

Para o mesmo lubrificante com o tarugo recartilhado não ocorreu grande variação na força de extrusão, mas os tarugos apresentaram recalque de até 0,15mm e força de extrusão superior ao padrão de referência.

Entretanto, nos ensaios com o lubrificante *sabão em pó* associado aos tarugos normalizados e recartilhados, os resultados foram satisfatórios (Tab. 4.8).

O lubrificante *farinha de trigo* mostrou-se satisfatório quando comparado ao padrão de referência, associado ao tarugo na condição metalúrgica normalizado e com acabamento superficial recartilhado, e também com o tarugo na condição recozido convencional e acabamento laminado.

Para o lubrificante *farinha de trigo* associado ao tratamento térmico de **recozimento convencional** e acabamento superficial **recartilhado**, a força de extrusão obtida foi de **6,85 (10⁴ N)**. O teste de contraste mostrou que essa força de extrusão é **estatisticamente menor** que a obtida no ensaio com o tarugo fosfatizado (padrão de referência), o que demonstra a eficiência desse lubrificante associado à superfície recartilhada como uma portadora para a região de deformação.

4.2.3 – Análise Gráfica

Pode-se observar nas Fig. 4.7 a 4.13, o comportamento das curvas de força de extrusão para os lubrificantes nas condições apresentadas no item anterior, em que estão associados ao tratamento térmico e acabamento superficial do tarugo.

As curvas foram traçadas junto com a curva de força média do padrão de referência (tarugo fosfatizado associado ao lubrificante MoS₂, condição metalúrgica normalizado e acabamento superficial laminado).

Como estatisticamente não existe influência do processo de lubrificação, somente foram traçadas as curvas de força para o processo por imersão.

A – *Reniform MZA20*

A Fig. 4.7 apresenta as curvas de força de extrusão para o lubrificante *Reniform MZA20* associado ao tarugo normalizado e recartilhado. Nota-se que as curvas das 3 réplicas do ensaio de extrusão apresentam-se semelhantes à curva do padrão de referência.

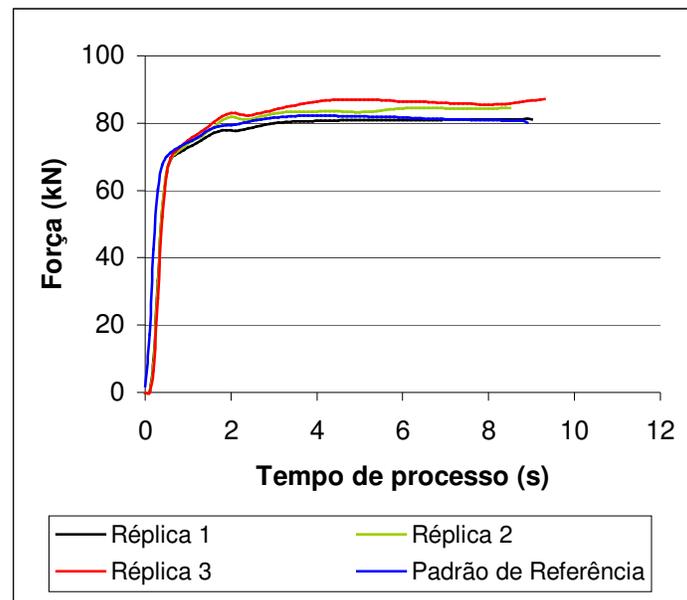


Figura 4.7 – Curva de força (1º estágio): *Reniform MZA20* – normalizado – recartilhado.

As curvas atingem um valor máximo e permanecem praticamente constantes até o final do processo de deformação.

Isso significa que o atrito foi praticamente constante durante todo o processo de conformação (ALTAN *et al.*, 1999).

Tal ocorrência deve-se ao processo de recartilhado sobre o diâmetro externo do tarugo, visto que ensaios com o mesmo lubrificante, com o tarugo normalizado, com acabamento

superficial laminado e com os processos de lubrificação por imersão ou pressurizado, apresentam uma força média de extrusão de 13,45 (10^4 N), superior ao do padrão de referência.

Esses tarugos também apresentaram recalque de cerca de 0,30 mm, antes de iniciar o processo de deformação na matriz de redução, o que não ocorreu para o tarugo recartilhado.

A Fig. 4.8 apresenta as curvas de força de extrusão para o lubrificante *Reniform MZA20* associado ao tarugo recozido pleno e acabamento superficial laminado.

As curvas das 2 réplicas do ensaio de extrusão apresentam-se semelhantes à curva do padrão de referência, com destaque para a réplica 1 que apresentou um comportamento um pouco diferenciado, ou seja, atingiu um pico de força e diminuiu durante o processo de deformação, caracterizando uma diminuição do atrito. Para essa condição de ensaio, os tarugos apresentaram recalque entre 0,20 a 0,45mm, antes de iniciar o processo de deformação na matriz de redução.

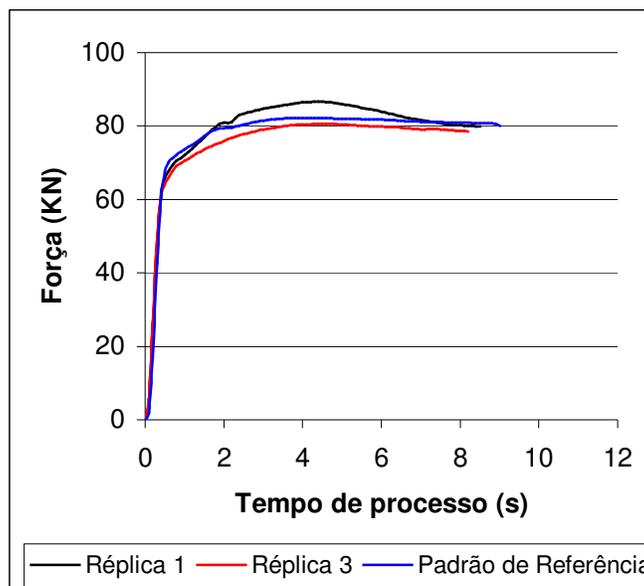


Figura 4.8 – Curva de força (1º estágio): *Reniform MZA20* – recozido pleno– laminado.

A Fig. 4.9 apresenta as curvas de força de extrusão para o *Reniform MZA20* com os tarugos na condição metalúrgica recozido pleno e acabamento superficial recartilhado. A réplica 1 apresenta a força máxima de extrusão muito abaixo do padrão de referência, conseqüentemente

o tempo de deformação também foi inferior. A mesma réplica sofreu recalque de 0,05mm, apesar da força menor. As réplicas 2 e 3 apresentam comportamento similar ao padrão, mas com força máxima igual a força média do padrão, ou seja, graficamente melhor. Essas réplicas sofreram recalque de 0,20 e 0,10mm respectivamente.

As forças de extrusão na Fig. 4.9 apresentaram-se menores que as do padrão de referência, devido ao tratamento térmico de recozimento pleno realizado nos tarugos. Caso fosse realizado um recozimento convencional as forças de extrusão seriam muito elevadas. Outro fator que contribuiu para a diminuição das forças foi o processo de recartilhamento sobre a superfície laminada, que aumentou a rugosidade superficial modificando a morfologia para a forma de sulcos cruzados para condução do lubrificante até a zona de deformação.

Já o recalque sofrido pelas peças conformadas, pode ser relacionado ao limite de conformabilidade do material (nessa condição de recozido pleno) ser inferior a 22%, mesmo com baixas forças de extrusão.

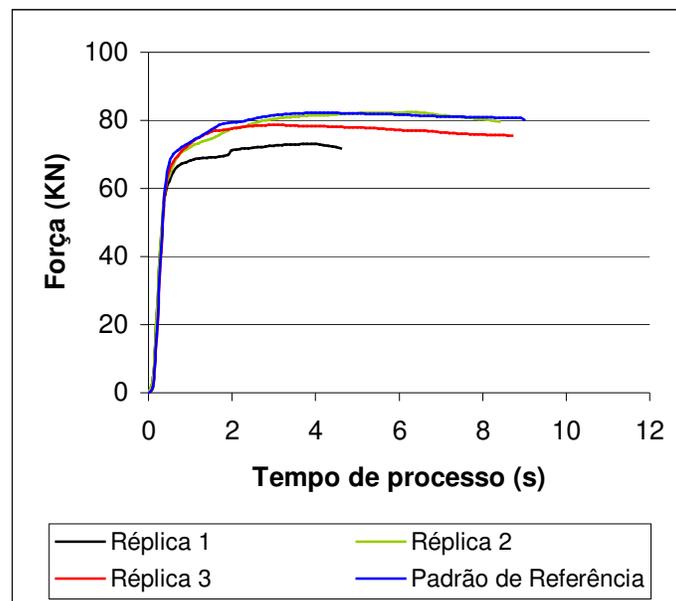


Figura 4.9 – Curva de força (1º estágio): *Renoform MZA20* – recozido pleno – recartilhado.

B – Sabão em Pó

Para o lubrificante *sabão em pó*, as curvas de força de extrusão são apresentadas na Fig. 4.10, com os tarugos na condição metalúrgica normalizado e acabamento superficial recartilhado. O processo de lubrificação utilizado para o ensaio foi somente o revestimento do tarugo com o lubrificante conforme apresentado no item 3.2.

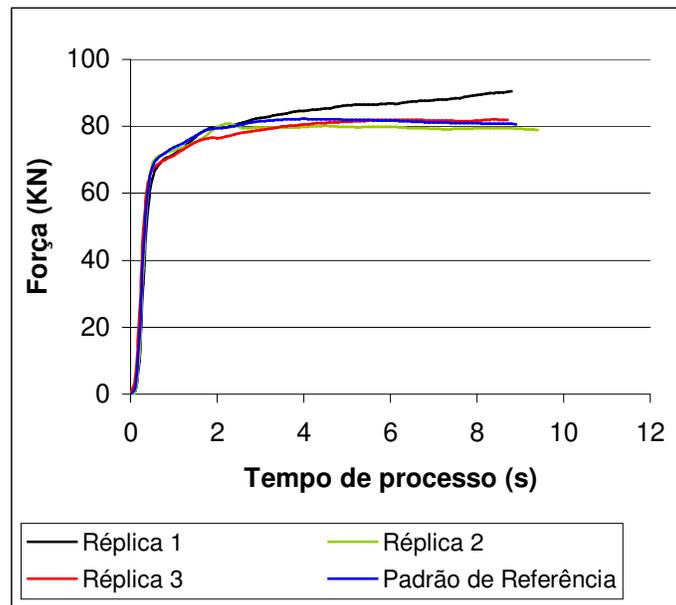


Figura 4.10 – Curva de força (1º estágio): *sabão em pó* – normalizado – recartilhado.

A curva de força da réplica 1 apresentou um constante aumento durante o processo de deformação, mas a peça conformada não apresentou recalque. Vale a pena lembrar que para os testes estatísticos foram utilizados os valores máximos da força de extrusão para cada réplica, ou seja, graficamente observa-se que somente no final do processo de deformação a força é aumentada, ou seja, uma parte do processo é bem semelhante ao padrão. As réplicas 2 e 3 apresentaram forças de extrusão iguais à média do padrão de referência. Essas peças também não apresentaram recalque.

C – Farinha de Trigo

As curvas de força de extrusão para o lubrificante *farinha de trigo* são apresentadas nas Fig. 4.11 a 4.13. O processo de lubrificação utilizado para os ensaios foi o descrito no item 3.2.

A Fig. 4.11 apresenta as curvas de força para o tarugo na condição metalúrgica normalizado e acabamento superficial recartilhado.

Pode-se observar que as curvas apresentam um comportamento diferente da do padrão de referência. As curvas atingem um valor máximo de força de extrusão no início do processo de deformação e no decorrer do processo diminuem acentuadamente. Isso mostra que o lubrificante associado às condições acima, favorece a lubrificação na zona de deformação. Assim, graficamente as curvas das réplicas 1 e 3 indicam uma maior eficiência do lubrificante comparado ao padrão de referência. Nessa condição os tarugos não sofreram recalque.

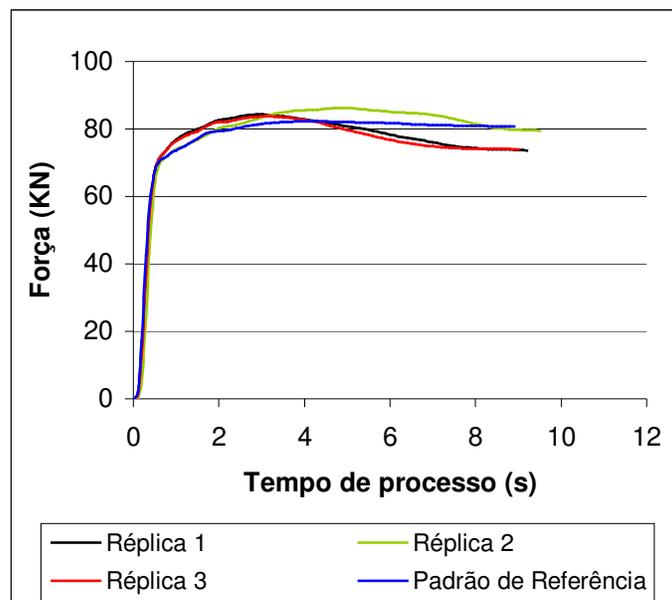


Figura 4.11 – Curva de força (1º estágio): *farinha de trigo* – normalizado – recartilhado.

As curvas de força da Fig. 4.12 representam tarugos na condição metalúrgica de recozimento convencional e acabamento superficial laminado. A réplica 1 apresenta curva de

força maior durante o processo de deformação do tarugo, mas diminui no final do processo, enquanto que a curva do padrão se mantém inalterada em todo o processo, ou seja, força e atrito constante.

Para as demais réplicas (2,3 e 4), as curvas apresentaram o mesmo comportamento da Fig. 4.11, atingindo um valor máximo de força de extrusão no início do processo de deformação, e no decorrer do processo, diminuíram acentuadamente.

Portanto, graficamente as curvas dessas réplicas indicam uma melhor eficiência do lubrificante comparado ao padrão de referência, pois diminuem o atrito durante o processo de deformação. As peças conformadas apresentaram recalque de 0,30mm para a réplica 1 e para as demais réplicas, um recalque de 0,15mm.

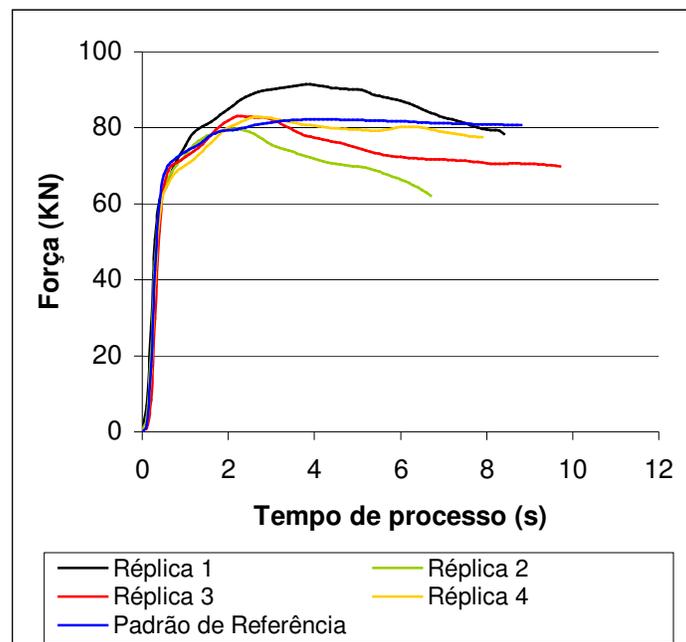


Figura 4.12 – Curva de força (1º estágio): *farinha de trigo* – recozido convencional – laminado.

A Fig. 4.13 mostra as curvas de força para os tarugos na condição metalúrgica de recozimento convencional e acabamento superficial recartilhado.

Essas curvas mostram uma diminuição acentuada da força de extrusão e conseqüentemente do tempo de deformação.

Nota-se que as curvas também atingem um valor máximo de força e diminuem durante o processo de deformação. Os tarugos não sofreram recalque justamente pela diminuição da força de extrusão.

Os testes estatísticos já haviam mostrado que a força de extrusão é inferior ao observado no padrão de referência. Gráficamente foi comprovado que não é somente inferior, mas que o lubrificante apresenta um comportamento muito mais favorável com a diminuição da força e do atrito durante todo o processo. Vale salientar novamente que o teste estatístico levou em consideração somente a força máxima de extrusão para cada réplica.

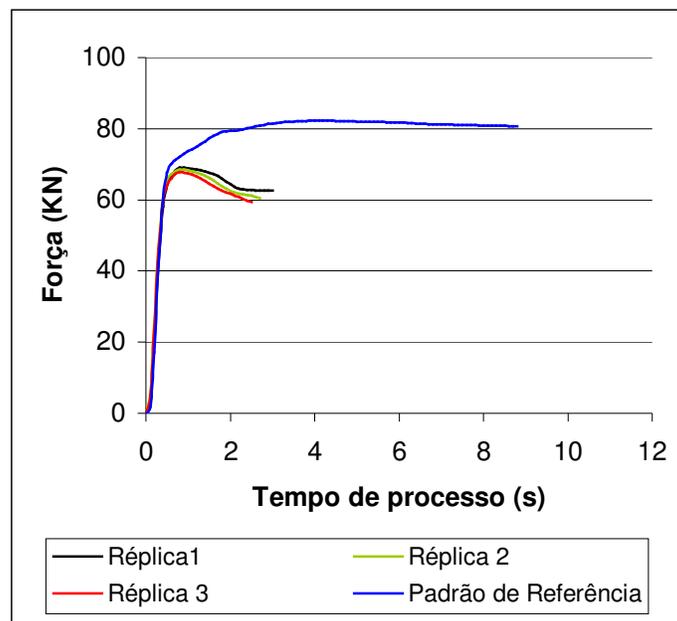


Figura 4.13 – Curva de força (1º estágio): *farinha de trigo* – recozido convencional – recartilhado.

4.3 – Segundo Estágio de Deformação

4.3.1 – Ensaio de Extrusão

Realizados os ensaios de extrusão com apenas um estágio de deformação e feitas as análises estatísticas e gráficas, foram realizados outros ensaios de extrusão com os lubrificantes considerados satisfatórios, ou seja, aqueles com valores de força de extrusão estatisticamente menores ou iguais ao padrão de referência. Como estatisticamente o processo de lubrificação não influencia a força de extrusão, não foram realizados ensaios com o lubrificante pressurizado dentro da ferramenta.

Cada ensaio realizado consistiu em dois estágios de deformações sequenciais, o que permitiu analisar a eficiência do lubrificante, pela análise da força de extrusão, quando submetido a mais de um estágio de deformação. A Tab. 4.9 apresenta os valores máximos da força de extrusão obtidos no segundo estágio de deformação.

Tabela 4.9 – Resultados experimentais – força de extrusão máxima (2º estágio de deformação).

Condições dos Ensaio	Força de extrusão (10^4 N)				
	R1	R2	R3	R4	R5
Padrão de Referência: Fosfato de Zinco com MoS_2 – Normalizado – Laminado	7,75	7,67	7,60	7,65	--
Renoform MZA20 – Normalizado – Recartilhado	>15	>15	>15	--	--
Renoform MZA20 – Recozido Pleno – Laminado	6,67	6,54	6,53	6,55	--
Renoform MZA20 – Recozido Pleno – Recartilhado	>15	>15	>15	--	--
Sabão em Pó – Normalizado – Recartilhado	8,64	8,54	8,11	--	--
Farinha de Trigo – Normalizado – Recartilhado	7,38	8,20	8,55	--	--
Farinha de Trigo – Recozido convencional – Laminado	7,84	7,20	8,06	8,25	7,77
Farinha de Trigo – Recozido convencional – Recartilhado	10,28	12,91	10,53	--	--

4.3.2 – Análise Estatística

A – Planejamento Aleatorizado por Níveis – Teste de Contraste

O teste de contraste foi realizado com 95% de nível de confiança e mostrou que as médias apresentadas na tabela 4.10 são estatisticamente iguais à média do padrão referência quando realizado o segundo estágio de deformação.

Durante o segundo estágio de deformação, o lubrificante *Renoform MZA20* associado ao tarugo normalizado e recartilhado, apresentou força de extrusão estatisticamente maior em relação ao padrão de referência.

A peça já conformada pelo primeiro estágio de deformação apresentou recalque de aproximadamente 2mm antes de iniciar a deformação do segundo estágio. Tal recalque preencheu o ângulo de entrada da ferramenta e conseqüentemente elevou bruscamente a força de extrusão, sendo necessário interromper o processo de deformação (ver Fig. 4.14). Isso pode ter ocorrido devido à perda da capacidade de lubrificação pelo aplainamento dos picos de rugosidade gerados mecanicamente no tarugo inicial.

Tabela 4.10 – Resultados experimentais – força de extrusão média (2º estágio de deformação).

Condições dos Ensaio	Força de extrusão (10^4 N)
Padrão de Referência: Fosfato de Zinco com MoS ₂ – Normalizado – Laminado	7,67
Renoform MZA20 – Recozido Pleno – Laminado	6,57
Sabão em Pó – Normalizado – Recartilhado	8,43
Farinha de Trigo – Normalizado – Recartilhado	8,04
Farinha de Trigo – Recozido Convencional – Laminado	7,82

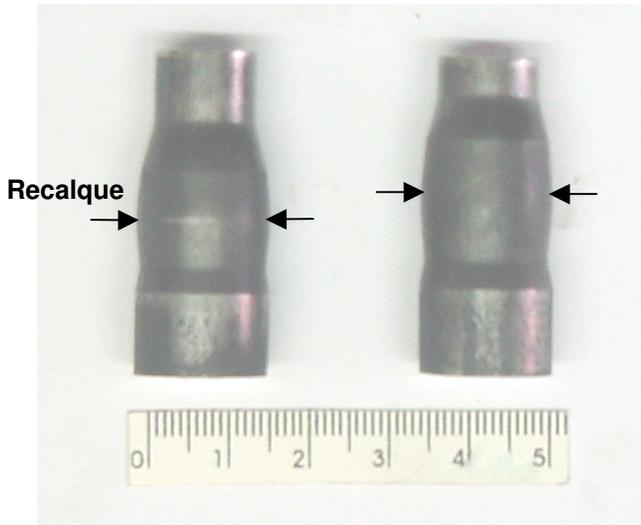


Figura 4.14 – Recalque : *Reniform MZA20* – normalizado – recartilhado (2º Estágio).

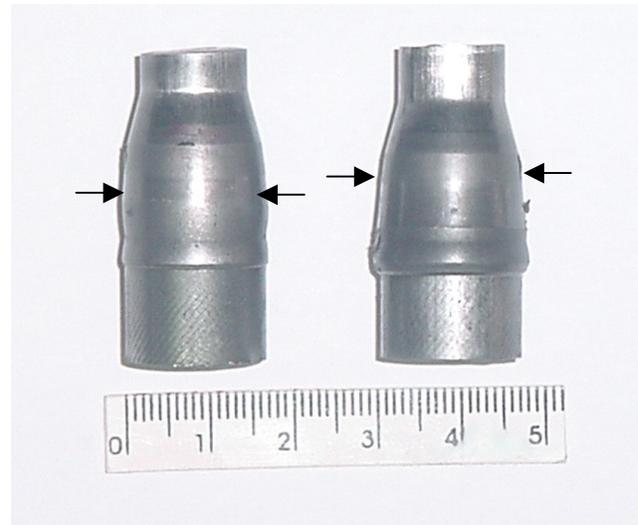


Figura 4.15 – Recalque : *Reniform MZA20* – recozido pleno – recartilhado (2º Estágio).

O lubrificante *Reniform MZA20* associado ao tarugo recozido e recartilhado também apresentou força de extrusão estatisticamente superior ao padrão de referência. A peça já conformada pelo primeiro estágio também apresentou recalque de aproximadamente 2mm antes de iniciar o segundo estágio de deformação. Isso aumentou bruscamente a força de extrusão, inviabilizando processo de deformação (ver Fig. 4.15).

A causa do fracasso da deformação pode estar relacionada também com o aplainamento dos picos de rugosidade, pois para esse caso, após o primeiro estágio de deformação, os valores mínimos de rugosidade média (Ra) obtidos para as réplicas foram bem pequenos (entre 0,08 a 0,28 μ m).

A baixa dureza do tarugo inicial (116 – 121 Brinell) associada ao recartilhado sobre sua superfície resultou após a primeira deformação na elevada qualidade do acabamento superficial, que desfavorecem a lubrificação na zona de deformação.

A *farinha de trigo* associada ao tarugo recozido convencional e recartilhado obteve maior eficiência no primeiro estágio de deformação, mas não demonstrou a mesma eficiência no segundo estágio, quando apresentou força de extrusão estatisticamente superior ao padrão de

referência, também possivelmente pelo aplainamento dos picos de rugosidade após o primeiro estágio de deformação. Isso impediu que o lubrificante fosse carregado de forma estável e contínua na zona de deformação, visto que a rugosidade média (R_a) observada antes do primeiro estágio de deformação era entre 7 a 10 μm , e após, foi de 0,64 a 2,09 μm .

4.3.3 – Análise Gráfica

Nas Fig. 4.16 a 4.19 observa-se o comportamento das curvas da força de extrusão para os lubrificantes nas condições apresentadas na Tab. 4.10, na qual estão associados o tratamento térmico e acabamento superficial do tarugo, juntamente com a curva de força média do padrão de referência durante o segundo estágio de deformação.

A – *Renoform MZA20*

A Fig. 4.16 mostra as curvas de força de extrusão durante o segundo estágio de deformação para o lubrificante *Renoform MZA20* associado ao tarugo na condição metalúrgica recozido e acabamento superficial laminado.

Graficamente as curvas de força apresentadas pelo lubrificante *Renoform MZA20* têm valores menores quando comparadas ao padrão de referência. Observa-se que as réplicas apresentam curvas com um valor máximo de força no início da deformação e posteriormente a força é diminuída durante o processo de extrusão e conseqüentemente, o atrito também é diminuído.

Pode-se notar que o tempo da deformação também é diminuído em função da baixa força de extrusão. A eficiência do lubrificante nesse caso pode ser atribuída ao recozimento pleno realizado no tarugo inicial e pelo acabamento superficial laminado que resultou em uma rugosidade média (R_a) entre 1,61 – 2,52 μm (valores máximos encontrados para cada réplica)

após o primeiro estágio de deformação. Essa condição de rugosidade superficial favoreceu o transporte do lubrificante até a zona de deformação.

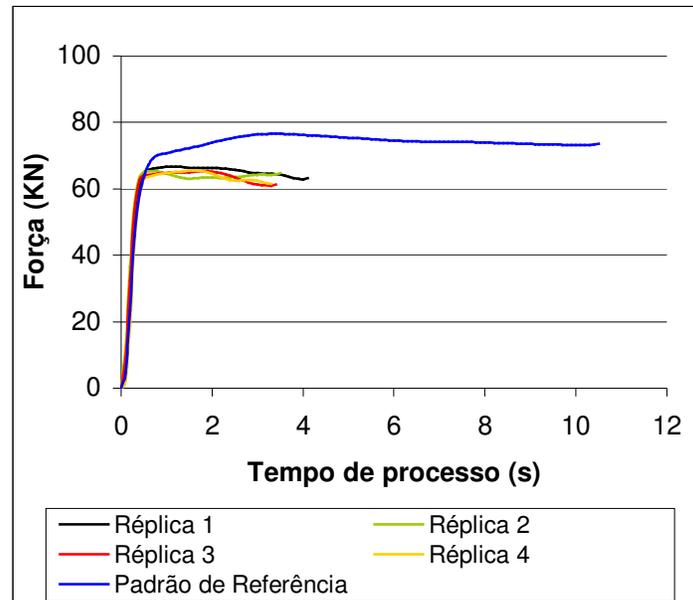


Figura 4.16 – Curva de força (2º estágio): *Reniform MZA20* – recozido pleno – laminado.

Os recalques apresentados no diâmetro maior das réplicas após o segundo estágio de deformação são os mesmos apresentados no primeiro estágio de deformação (0,20 a 0,45mm), ou seja, não ocorreu recalque durante o segundo estágio de deformação.

A rugosidade média (R_a) apresentada pelas réplicas após os dois estágios de extrusão está entre 0,05 e 0,40 μ m. Pode-se imaginar que para o próximo estágio de deformação o lubrificante tenha sua eficiência diminuída devido ao aplainamento dos picos de rugosidade. Embora o material pudesse estar com dureza relativamente baixa, sua superfície teria perdido o portador do lubrificante até a zona de deformação.

B – Sabão em Pó

As curvas de força de extrusão para o lubrificante *sabão em pó* são apresentadas na Fig. 4.17, com os tarugos na condição metalúrgica normalizado e acabamento superficial recartilhado.

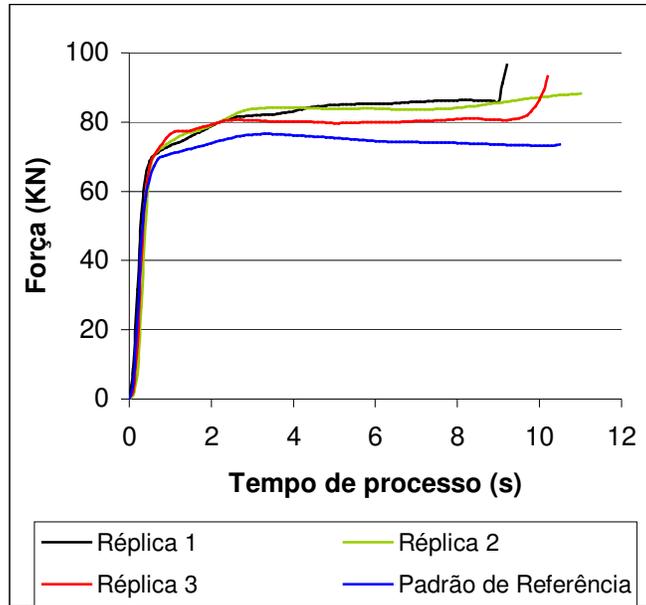


Figura 4.17 – Curva de força (2º estágio): *sabão em pó* – normalizado – recartilhado.

As curvas de força das réplicas apresentam-se graficamente maiores comparadas ao padrão de referência, com um aumento da força de extrusão no final do processo de deformação para as réplicas 1 e 3. Esse aumento ocorreu devido ao lubrificante ser utilizado em seu estado sólido, e por isso ao final do ensaio, ele foi acumulado entre o cone de entrada da matriz de extrusão e o diâmetro maior da peça já extrudada pelo primeiro estágio. Isso ocorreu com pouca intensidade ao final do processo de deformação, atingindo aproximadamente 95% do comprimento de deformação esperado.

Nenhuma das réplicas apresentou recalque. A rugosidade média (R_a) apresentada pelas réplicas após os dois estágios de extrusão esteve entre 0,06 e 0,23 μm , resultado que foi inferior aos apresentados após o primeiro estágio, que estavam entre 0,76 e 1,13 μm (valores máximos encontrados para cada réplica).

C – Farinha de Trigo

As curvas de força de extrusão para o lubrificante *farinha de trigo* são apresentadas nas Fig. 4.18 e 4.19.

A Fig. 4.18 apresenta as curvas de força para o tarugo na condição metalúrgica normalizado e acabamento superficial recartilhado. Pode-se observar que as curvas apresentam um comportamento semelhante ao padrão de referência. Nota-se que ao final do processo de extrusão a força aumenta bruscamente como no caso do *sabão em pó*. Esse aumento também ocorreu devido ao lubrificante ser utilizado em seu estado sólido, e ao final do processo ficar acumulado entre o cone de entrada da matriz de extrusão e o diâmetro maior da peça já extrudada pelo primeiro estágio.

Tal ocorrência não foi observada quando o lubrificante foi utilizado no estado líquido (ver Fig. 4.20), em que se obteve o comprimento total extrudado após o segundo estágio igual a 32mm, sendo possível extrudar a peça até o cone de entrada da ferramenta.

Para o lubrificante *farinha de trigo* o comprimento máximo obtido foi de 25 mm, portanto, apenas 78% do total obtido com o lubrificante líquido (óleo mineral). Essas réplicas não sofreram recalque após o segundo estágio de extrusão. A rugosidade média (R_a) apresentada por essas réplicas após os dois estágios de extrusão esteve entre 0,16 e 2,04 μm , sendo menor que a apresentada após apenas um estágio de extrusão (0,76 – 2,25 μm).

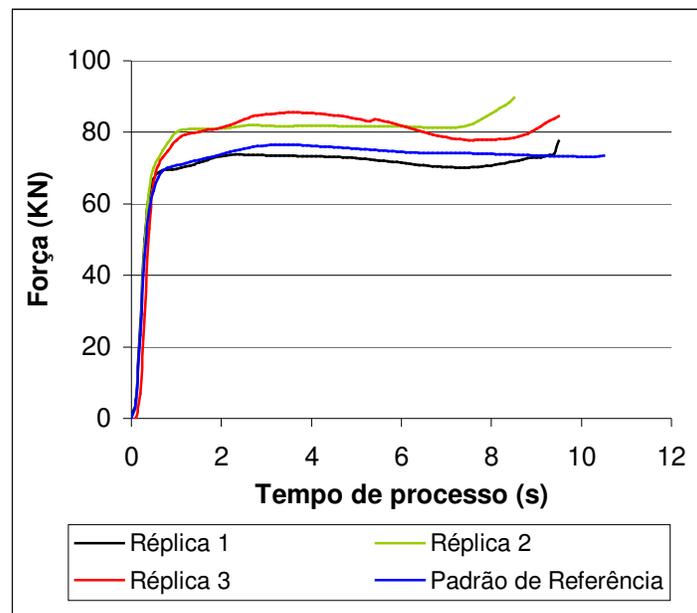


Figura 4.18 – Curva de força (2º estágio): *farinha de trigo* – normalizado – recartilhado.

Na Fig. 4.19 são apresentadas as curvas de força para o tarugo na condição metalúrgica recozido convencional e acabamento superficial laminado.

Pode-se observar que essas curvas também apresentam um comportamento semelhante ao padrão de referência. Nota-se também que ao final do processo de extrusão a força aumenta bruscamente. Esse aumento ocorreu da mesma forma que explicado anteriormente, como as curvas das Fig. 4.17 e 4.18.

A rugosidade média (Ra) apresentada pelas réplicas após os dois estágios de extrusão estava entre 0,25 e 5,31 μm , de maneira que a rugosidade superficial variou muito entre as réplicas e ao longo da própria réplica. Os valores da rugosidade superficial das réplicas individuais em cada ensaio considerado satisfatório são mostrados na Tab. 4.14.

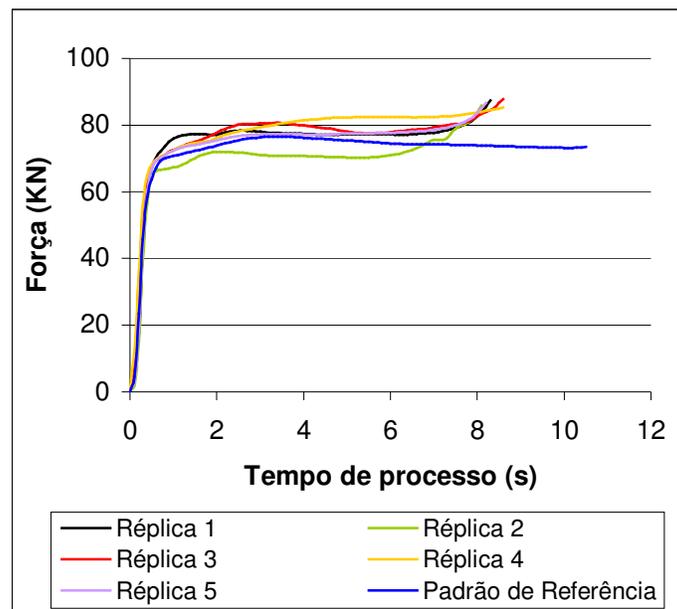


Figura 4.19 – Curva de força (2º estágio): *farinha de trigo* – recozido convencional – laminado.

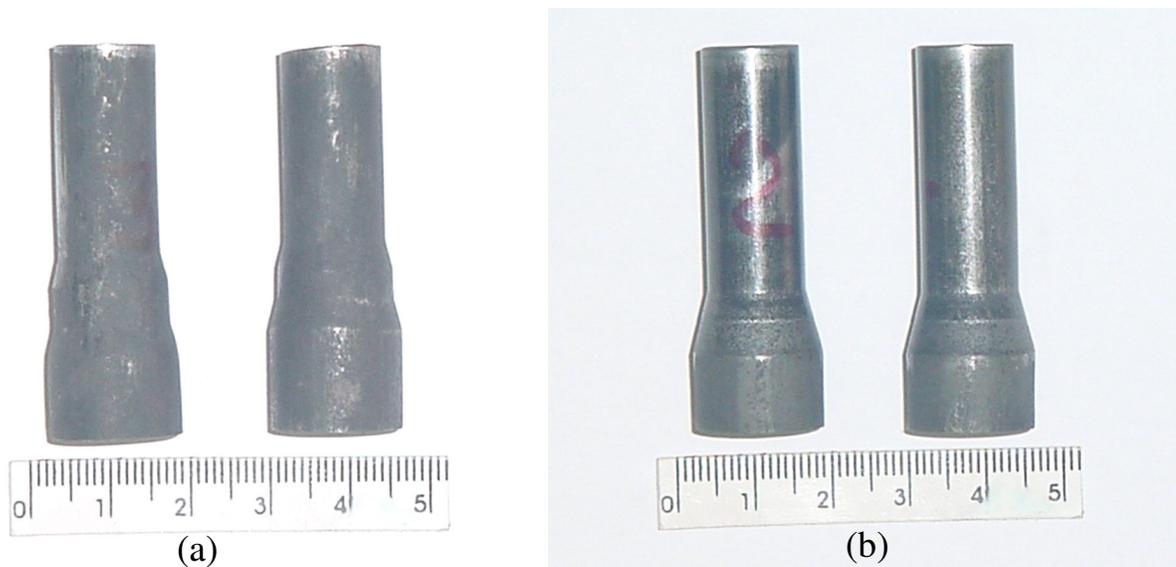


Figura 20 – Peças extrudadas após segundo estágio: a) Lubrificante *farinha de trigo*; b) Lubrificante líquido (MoS_2).

4.4 – Ensaio com os Produtos Extrudados

Os ensaios foram realizados com as peças extrudadas consideradas satisfatórias no primeiro e segundo estágio de deformação. Tais ensaios consistiram na medição do diâmetro externo e da rugosidade superficial das peças extrudadas para cada estágio.

4.4.1 – Ensaio Dimensional

O ensaio dimensional foi realizado sobre os diâmetros extrudados em três posições no sentido longitudinal das peças e em duas posições no sentido radial, resultando em seis posições de medição, conforme esquematizado na fig. 4.21 a seguir:

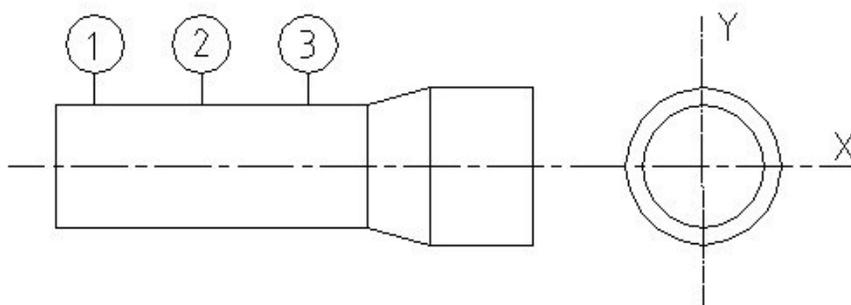


Figura 4.21 – Posições de medição sobre o tarugo extrudado.

As barras trefiladas geralmente apresentam qualidade dimensional entre IT9 e IT11, sendo mais comuns no mercado as barras com qualidade IT11.

Eventualmente, essas barras podem ser fabricadas com qualidade IT8, mas somente por encomenda e em grandes quantidades (AGOSTINHO *et al.*, 1977).

Para peças extrudadas a qualidade dimensional deve estar dentro do campo de tolerância apresentado no capítulo 2, entre IT8 a IT11 (SCHULER, 1998). Essa qualidade dimensional expressa em milímetros (mm) para o diâmetro extrudado deve estar entre 0 e 0,027 mm para IT8, até 0 e 0,110mm para IT11 (AGOSTINHO *et al.*, 1977).

A Tab. 4.11 mostra as dimensões mínimas e máximas obtidas no primeiro estágio de deformação para cada condição dos lubrificantes testados. Observa-se que as peças extrudadas pelo primeiro estágio de deformação apresentam qualidade dimensional entre IT7 e IT9, classificadas a partir da diferença máxima entre os diâmetros das réplicas para cada ensaio.

As dimensões mínimas e máximas obtidas após o segundo estágio de deformação são apresentadas na Tab. 4.12. As peças extrudadas apresentam qualidade dimensional entre IT7 e IT10, também classificadas a partir da diferença máxima entre os diâmetros das réplicas para

cada ensaio. Nota-se que o padrão de referência apresentou-se com a mesma tolerância dimensional após os dois estágios de deformação, demonstrando a eficiência do processo.

Tabela 4.11 – Resultados dimensional – primeiro estágio.

Condições dos Ensaio	Diâmetro Externo (mm)					Qualidade Dimensional
	R1	R2	R3	R4	R5	
Padrão de Referência: Fosfato de Zinco com MoS ₂ – Normalizado – Laminado	14,182	14,180	14,176	--	--	IT7 (até 18 µm)
	14,190	14,190	14,188	--	--	
Renoform MZA20 – Normalizado – Recartilhado	14,170	14,180	14,178	--	--	IT8 (até 27 µm)
	14,186	14,190	14,190	--	--	
Renoform MZA20 – Recozido Pleno – Laminado	14,164	14,170	14,178	--	--	IT8 (até 27 µm)
	14,186	14,178	14,188	--	--	
Renoform MZA20 – Recozido Pleno – Recartilhado	14,180	14,160	14,174	--	--	IT9 (até 43 µm)
	14,188	14,192	14,182	--	--	
Sabão em Pó – Normalizado – Recartilhado	14,176	14,180	14,180	--	--	IT7 (até 18 µm)
	14,188	14,190	14,192	--	--	
Farinha de Trigo – Normalizado – Recartilhado	14,190	14,162	14,178	--	--	IT9 (até 43 µm)
	14,192	14,188	14,192	--	--	
Farinha de Trigo – Recozido Convencional – Laminado	14,164	14,155	14,148	14,156	--	IT9 (até 43 µm)
	14,190	14,190	14,178	14,180	--	
Farinha de Trigo – Recozido Convencional – Recartilhado	14,178	14,180	14,173	--	--	IT7 (até 18 µm)
	14,185	14,187	14,180	--	--	

O lubrificante que obteve a pior qualidade dimensional para o segundo estágio foi a *farinha de trigo* associado ao tarugo recozido e laminado, pois a diferença máxima entre os diâmetros foi de 46µm (0,046mm), portanto classificado como IT10 (até 70µm). Os demais lubrificantes com suas respectivas condições do tarugo também apresentaram qualidade dimensional dentro do esperado, entre IT8 e IT11, com destaque para o lubrificante *renoform MZA20* que obteve IT7, sendo assim de qualidade superior.

Tabela 4.12 – Resultados dimensional – segundo estágio.

Condições dos Ensaio	Diâmetro Externo (mm)					Qualidade Dimensional
	R1	R2	R3	R4	R5	
Padrão de Referência: Fosfato de Zinco com MoS ₂ – Normalizado – Laminado	12,464	14,466	12,464	12,458	--	IT7 (até 18 µm)
	12,468	12,476	12,472	12,472		
Renoform MZA20 – Re cozido Pleno – Laminado	12,452	12,450	12,456	12,454	--	IT7 (até 18 µm)
	12,468	12,458	12,460	12,460		
Sabão em Pó – Normalizado – Recartilhado	12,460	12,470	12,476	--	--	IT9 (até 43 µm)
	12,488	12,486	12,486			
Farinha de Trigo – Normalizado – Recartilhado	12,488	12,468	12,466	12,468	--	IT8 (até 27 µm)
	12,490	12,488	12,488	12,480		
Farinha de Trigo – Re cozido Pleno – Laminado	12,470	12,446	12,450	12,456	12,450	IT10 (até 70 µm)
	12,492	12,468	12,474	12,480	12,480	

4.4.2 – Ensaio de Rugosidade Superficial

O ensaio de rugosidade superficial foi realizado sobre os diâmetros extrudados em três posições no sentido radial da peça, equidistantes a 120° na região central do diâmetro extrudado.

A Tab. 4.13 mostra os resultados mínimos e máximos da rugosidade superficial média (Ra) obtida sobre os tarugos extrudados após o primeiro estágio de deformação. Essa qualidade superficial deve atender as especificações apresentadas no capítulo 2 ($R_z > 10\mu\text{m}$). A norma UNI3963 (1960) apud Agostinho *at al.* (1977), fornece indicações supondo que exista uma relação entre a rugosidade superficial média (Ra) e a qualidade dimensional (IT). Portanto para o diâmetro extrudado onde espera-se qualidade dimensional entre IT8 e IT11, a rugosidade superficial média (Ra) deve estar com 0,8µm a 3µm, respectivamente.

Tabela 4.13 – Resultados da rugosidade superficial média (Ra) – primeiro estágio.

Condições dos Ensaios	Rugosidade Superficial Média – Ra (μm)				
	R1	R2	R3	R4	R5
Padrão de Referência: Fosfato de Zinco com MoS ₂ – Normalizado – Laminado	0,11	0,12	0,16	--	--
	0,12	0,50	0,20	--	--
Renoform MZA20 – Normalizado – Recartilhado	0,53	0,44	0,44	--	--
	2,28	0,62	0,65	--	--
Renoform MZA20 – Recozido Pleno – Laminado	0,66	0,41	0,30	--	--
	2,52	1,62	1,61	--	--
Renoform MZA20 – Recozido Pleno – Recartilhado	0,17	0,28	0,08	--	--
	1,94	0,66	0,32	--	--
Sabão em Pó – Normalizado – Recartilhado	0,46	0,48	0,25	--	--
	1,05	0,76	1,13	--	--
Farinha de Trigo – Normalizado – Recartilhado	1,34	0,35	1,32	--	--
	2,21	0,76	2,25	--	--
Farinha de Trigo – Recozido Convencional – Laminado	0,65	1,09	0,63	0,66	--
	1,21	3,33	4,02	3,36	--
Farinha de Trigo – Recozido Convencional – Recartilhado	1,03	0,64	0,74	--	--
	1,61	2,09	1,48	--	--

Pode-se observar que após o primeiro estágio de deformação somente o lubrificante *farinha de trigo* associado ao tarugo recozido e laminado, excedeu o limite de $Ra=3\mu\text{m}$, conforme definido no parágrafo anterior. Contudo, observa-se que esse resultado não excede o especificado no Capítulo 2, ou seja, $Rz > 10\mu\text{m}$.

As rugosidades mínimas e máximas obtidas após o segundo estágio de deformação são apresentadas na Tab. 4.14. Nota-se que os lubrificantes *renoform MZA20* e o *sabão em pó* apresentaram excelente qualidade superficial comparável a acabamentos alcançados em operações de retificação e polimento.

Pode-se observar novamente que somente o lubrificante *farinha de trigo* associado ao tarugo recozido e laminado, excedeu o limite de $Ra=3\mu m$. Para o lubrificante *farinha de trigo* associado ao tarugo normalizado e recartilhado, a qualidade superficial foi melhor considerando-se processos de extrusão a frio.

Tabela 4.14 – Resultados da rugosidade superficial média (Ra) – segundo estágio.

Condições dos Ensaios	Rugosidade Superficial Média – Ra (μm)				
	R1	R2	R3	R4	R5
Padrão de Referência: Fosfato de Zinco com MoS ₂ – Normalizado – Laminado	0,17	0,11	0,08	0,07	--
	0,55	0,22	0,21	0,36	--
Renoform MZA20 – Recozido Pleno – Laminado	0,05	0,14	0,09	0,10	--
	0,40	0,36	0,35	0,40	--
Sabão em Pó – Normalizado – Recartilhado	0,10	0,06	0,06	--	--
	0,13	0,23	0,14	--	--
Farinha de Trigo – Normalizado – Recartilhado	0,67	0,28	0,16	0,61	--
	0,80	2,04	0,53	1,44	--
Farinha de Trigo – Recozido Convencional – Laminado	0,48	0,25	1,02	0,70	2,00
	1,00	3,72	5,31	3,34	3,67

4.5 – Considerações Finais

Os resultados experimentais mostraram que algumas condições utilizadas para os ensaios de extrusão apresentaram força de extrusão estatisticamente menor ou igual ao observado no padrão de referência. A influência de cada variável analisada e que afeta a força de extrusão é descrita a seguir.

O **tratamento térmico** influencia a força de extrusão, pois como apresentado na revisão, o tarugo utilizado na condição recozido apresenta maior conformabilidade a frio. Entretanto, quando esse tratamento térmico é associado a um acabamento superficial de recartilhamento para

múltiplos passes de deformação, a força de extrusão aumenta para todos os lubrificantes ensaiados nessa condição (recozido – recartilhado).

O **acabamento superficial** também influencia a força de extrusão, porém quando são realizados vários estágios de deformação, o acabamento superficial de recartilhamento sobre o tarugo inicial proporciona melhor qualidade superficial das peças extrudadas e conseqüentemente, diminui o poder de transporte do lubrificante até a zona de deformação e aumenta a força de extrusão. Já os lubrificantes ensaiados na condição recozido e acabamento laminado, apresentaram resultados satisfatórios para o segundo estágio de deformação, pois o acabamento laminado do tarugo no primeiro passe forneceu produtos com maior rugosidade superficial.

Analisando-se apenas um estágio de deformação, as alternativas satisfatórias foram os lubrificantes sólidos e o lubrificante líquido que apresentou a maior viscosidade.

Para o segundo estágio de deformação, esses mesmos lubrificantes também mostraram-se satisfatórios, entretanto com menor número de associações das variáveis de influência.

O acabamento superficial de recartilhamento foi insatisfatório para o lubrificante *Reniform MZA20*, tanto na condição metalúrgica de normalização, como na de recozido pleno associado ao acabamento superficial de recartilhamento. Já o lubrificante sólido *farinha de trigo* tornou-se desinteressante quando associado ao acabamento superficial de recartilhamento e condição metalúrgica de recozimento convencional, pois apresentou maiores forças de extrusão.

Os lubrificantes *sabão em pó* e *farinha de trigo* na condição metalúrgica normalizado associado ao acabamento superficial de recartilhamento foram considerados satisfatórios possivelmente pelo poder de lubrificação desses lubrificantes, visto que, apresentaram qualidade superficial após o primeiro estágio de deformação similares ao do *Reniform MZA20*.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

5.1 – Conclusões

- **Os Processos de lubrificação** (por imersão e hidrostático) não apresentaram influência sobre a força de extrusão. Como a ferramenta projetada mostrou-se satisfatória quanto ao sistema de vedação, deve-se corrigir o sistema de alimentação do lubrificante de modo a garantir que realmente ocorra sua pressurização e assim, seja possível uma melhor avaliação dessa variável de influência.
- **Os Tratamentos térmicos empregados** influenciaram a força de extrusão, como mostrado pelos resultados experimentais e que confirmaram os relatos apresentados na literatura consultada.
- **O Acabamento superficial dos tarugos** também influencia a força de extrusão, pois sua escolha adequada favorece a lubrificação na zona de deformação, como é o caso da superfície recartilhada analisada neste trabalho.
- **Para os Lubrificantes** tem-se que para apenas **um estágio de deformação**, a *farinha de trigo* associada ao recozimento convencional e acabamento superficial de recartilhamento, apresenta força de extrusão estatisticamente menor que o padrão de referência. Outros lubrificantes em diferentes associações também foram

estatisticamente iguais a esse padrão. Para o segundo estágio de deformação, o lubrificante mais viável foi o *Renoform MZA20* associado ao recozimento pleno e acabamento laminado, pois apresentou força de extrusão estatisticamente igual e graficamente menor que o padrão de referência, força essa obtida com o lubrificante remanescente do primeiro estágio de deformação.

- **Em relação aos possíveis Problemas Ambientais**, o uso da *farinha de trigo* como lubrificante é o mais viável sob esse ponto de vista, pois não é potencialmente poluente. Ela também poderia ser utilizada para múltiplos estágios de deformação, desde que fosse desenvolvido um processo de lubrificação mais eficiente do que o empregado neste trabalho.

5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros

Seria interessante estudar-se futuramente os seguintes aspectos:

- outros lubrificantes alternativos para extrusão a frio de aços: maisena (amido de milho), fécula de mandioca (utilizada para perfuração de poços de petróleo em águas profundas) e materiais recicláveis tais como vidro e plásticos (ambos em pó).
- outros procedimentos de lubrificação, de maneira a tornar viável a utilização dos lubrificantes já estudados e os propostos neste item.
- realizar ensaios com diferentes relações de reduções de área e em diferentes diâmetros (maiores e menores dos que os já ensaiados), para analisar o comportamento dos lubrificantes em outras situações de deformação e carregamento.
- desenvolver um processo viável (escala industrial) para modificar a morfologia da superfície externa das barras laminadas e dos tarugos, pois o processo utilizado neste estudo (recartilho) foi somente para escala de laboratório.

Referências Bibliográficas

Agostinho, O. L., Rodrigues, A. C. S. & Lirani, J., *Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões*, São Paulo, Edgard Blücher Ltda, 1.ed., 1977, 295p.

Altan, T., Oh, S. & Gegel, H.L., *Conformação de Metais – Fundamentos e Aplicações*, São Carlos, EESC – USP, 1999, 1.ed., cap. 15, Forjamento a Frio, pp. 239-256.

ASM – American Society for Metals, *Source Book on Cold Forming*, 1975.

Avitzur, B., Analysis of Wire Drawing and Extrusion Through Conical Dies of Large Cone Angle, *Journal of Engineering for Industry*, Tras. ASME, pp. 305-316, Nov. 1964.

Baldy, C. J., Recycling Zinc Phosphate Sludge, *Metal Finishing*, pp. 23-30, Nov. 1996.

Beer, F.P. & Johnston Jr., E.R, *Resistência dos Materiais*, McGraw-Hill Ltda., 1989, 2.ed., cap. 11, Colunas, pp. 577-522.

Billigmann, J. & Feldmann, H. D., *Estampado y Prensado a Máquina*, 2º Edición, Reverté S.A, 1979.

Button, S.T., Numerical Simulation of Hydrodynamic Lubrication in Cold Extrusion, In: *Anais do XXII CILAMCE*, CD-ROM, Campinas, 2001.

- Cho, S.W., Choi, S.M. & Bae, C.S., Frictional modes of barrel shaped piston rings under flooded lubrication, *Tribology International*, vol. 33, n. 8, pp. 545-551, 2000.
- Dally, J.W., Riley, W.F. & McConnell, K.G., *Instrumentation for Engeneering Measurements*, John Wiley and Sons, 2rd Ed., 1993, 586p.
- Donofrio, J., Zinc Phosphating, *Metal Finishing*, vol. 98, n. 6, pp. 57-73, 2000.
- Dubar, L., Bricout, J.P., Wierre, C. & Meignan, P., New surface processes for cold forging of steels, *Surface and Coatings Technology*, vol. 102, n. 1-2, pp.159-167, 1998.
- Dubois, A., Lazzarotto, L., Dubar, L. & Oudin, J., A multi-step lubricant evaluation strategy for wire drawing-extrusion-cold heading sequence, vol. 249, pp. 951-961, 2001.
- Gerdau, Sequência de processamento recomendada, *Aços para Construção Mecânica Gerdau – 8620*, pp-164/04/7, s.d.
- Helman, H. & Cetlin, P.R., Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais, Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois S.A., 1983.
- Hu, Z.M. & Dean, T.A., A study of surface topography, friction and lubricants in metalforming, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 40, pp. 1637-1649, 2000.
- Jang, D.H., Ryou, T.K., Yoon, D.Y. & Hwang, B.B., The process sequence design of a power-assisted steering part, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 113, n. 1-3, pp. 87-92, 2001.
- Komatsuzaki, S., Uematsu, T. & Narahara, T., Cold forming of steel with lubricating oils, *Lubrication Engineering*, vol. 52, n. 3, pp. 259-266, 1996.
- Kudo, H., *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 7, pp. 383, 1965.

Lange, K. (ed.), *Handbook of Metal Forming*, 1^a edition, McGraw-Hill, 1985.

Lazzarotto, L., Dubar, L., Dubois, A., Bricout, J.P., Oudin, J. & Ravassard, P.A., Selection methodology for lubricating oils in cold metal forming processes, *Wear*, vol. 215, pp. 1-9, 1998-b.

Lazzarotto, L., Dubar, L., Dubois, A., Ravassard, P. & Oudin, J., Three selection criteria for the cold metal forming lubricating oils containing extreme pressure agents, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 80-81, pp. 245-250, 1998-a.

Lazzarotto, L., Maréchal, C., Dubar, L., Dubois, A. & Oudin, J., The effects of processing bath parameters on the quality and performance of zinc phosphate stearate coatings, *Surface and Coatings Technology*, vol. 122, n. 2-3, pp. 94-100, 1999.

Levy, N., Sludge Treatment in the Metal-Finishing Industry, *Metal Finishing*, pp. 80-83, 2000.

Matweb Material Property Data, AISI 8620, Acesso em 09 jul. 2002.

Metals Handbook, *Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys*, ASM International, 10th, vol. 1, 1990.

Monaghan, J. O'Reilly, M., Influence of lubrication on the surface finish of cold forged components, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 56, pp. 678-690, 1996.

Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley and Sons, 3rd Ed., 1991, 649p.

Nath, K. & Moriguchi, I., Automotiva applications for an alternate cold forming lubricant, *IV Conferência Nacional de Conformação de Chapas - V Conferência Internacional de Forjamento – XXI SENAFOR*, Porto Alegre, 2001.

Nelleman, T., Bay, N. & Wanheim, T., Real Area of contact and friction stress – The role of trapped lubricants, *Wear*, vol. 43 (1), pp. 45-53, 1977.

Nyamangara, J., Use of sequential extraction to evaluate zinc and copper in a soil amended with sewage sludge and inorganic metal salts, *Agriculture Ecosystems & Environment*, vol. 69, pp. 135-141, 1998.

Obi, A. I. & Oyinlola, A. K., Frictional characteristics of fatty-based oils in wire drawing, *Wear*, vol. 194, pp. 30-37, 1996.

Ohmori, T., Kitamura, K., Danno, A. & Kawamura, M., Evaluation of galling prevention properties of cold-forging oils by ball penetration test, *Wear*, vol. 155, pp. 183-192, 1992.

Rao, K.P., Wei, J.J., Performance of a new dry lubricant in the forming of aluminum alloy sheets, *Wear*, vol. 249, pp. 86–93, 2001.

Saiki, H., Ngaile, G. & Ruan, L., Influence of die geometry on the workability of conversion coatings combined with soap lubricant in cold forming of steels, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 67, pp. 238-243, 1997.

Saron, A., Lobo, A. C., Santos, A. F., Bazan, M. M. C. L., Pereira Jr., O. D. & Kida, S. M. S., Tratamento de águas residuárias de indústrias de galvanoplastia, *IX SILUBESA – Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambientais*, 2000.

Schuler, *Metal Forming Handbook*, Berlin, Springer, 1998.

Sekiguchi, H., Some topics in japanese forging industry, *IV Conferência Nacional de Conformação de Chapas - V Conferência Internacional de Forjamento – XXI SENAFOR*, Porto Alegre, 2001.

Shima, M., Suetake, H., McColl, I.R., Waterhouse, R.B. & Takeuchi, M., On the behaviour of an oil lubricated fretting contact, *Wear*, vol. 210, pp. 304-310, 1997.

Silva, I. B., *Método da simulação para determinar a tensão de extrusão a frio*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 1989, 198p., Dissertação de Mestrado.

VDI 3138, *Forjamento a Frio de Aços e Metais Não Ferrosos*, Tradução: Equipamentos Clark Ltda., vol. 1, 1980, p.37.

VDI 3143, *Aços para Forjamento a Frio - Escolha e Tratamento Térmico*, Tradução: Equipamentos Clark Ltda., vol. 1, 1980, p.28.

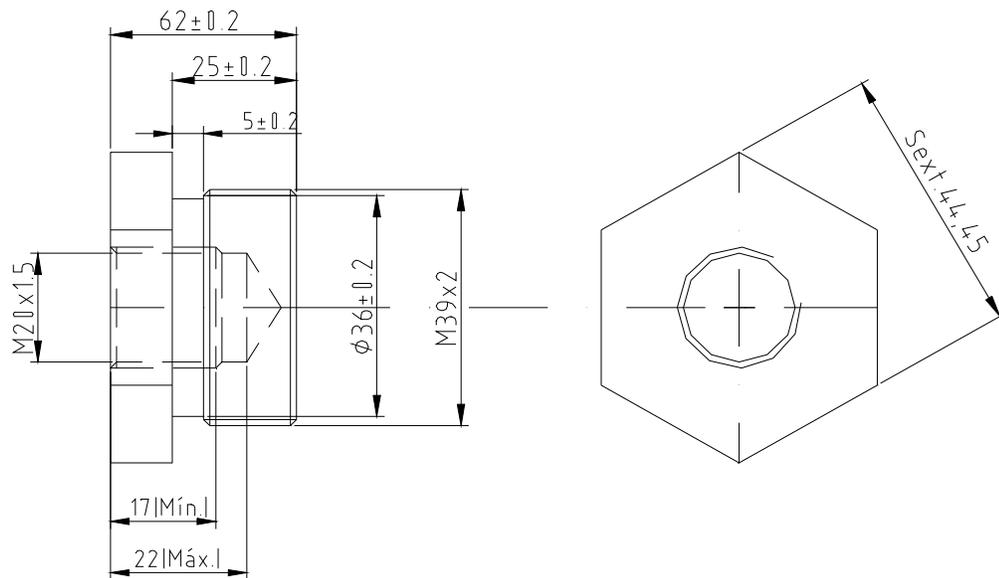
VDI 3160, *Tratamento da Superfície antes da Deformação a Frio – Generalidades*, Tradução: Equipamentos Clark Ltda., 1980, p.5.

VDI 5-3164, *Fosfatização para Facilitar o Forjamento a frio*, Tradução: Equipamentos Clark Ltda., 1980, p.8.

Wilson, W.R.D., Friction and lubrication in bulk metal forming processes, *Journal of Applied Metalworking*, vol. 1, n. 1, pp. 7-19, 1979.

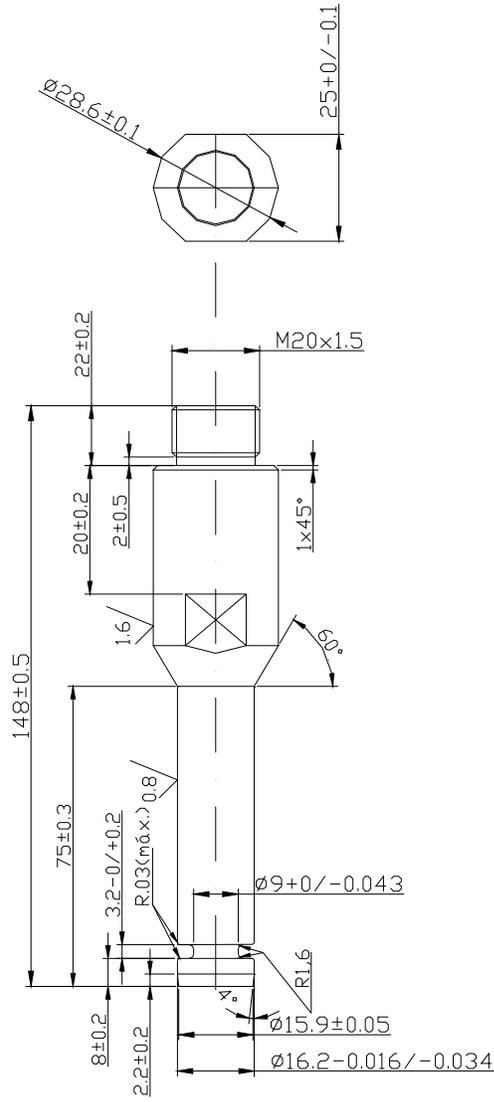
Yoshimura H., Nishihara T., Nonishi T., Inouchi N., Improvement of the Erichsen values of titanium sheets using various cereal flour lubricants, TETSU TO HAGANE – *Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, vol. 87 (7), pp. 474-479, 2001.

ANEXO - A



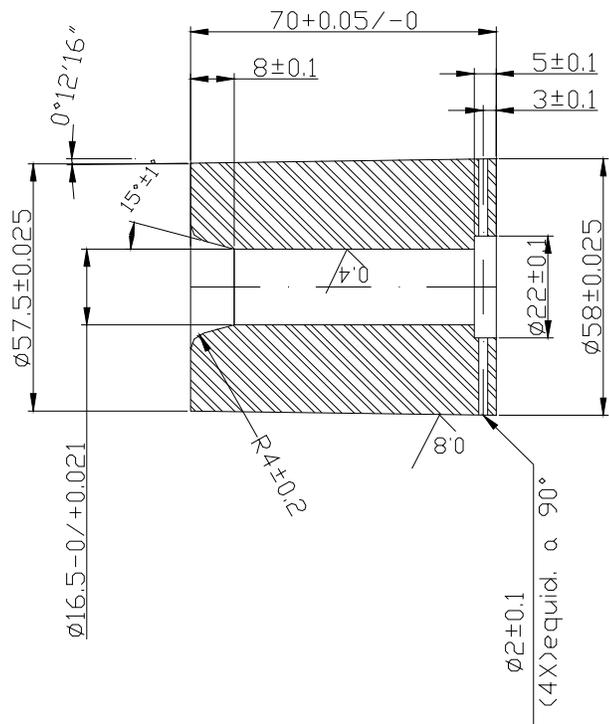
Todos os cantos não indicados R0.5

DENOMINAÇÃO:				Qt.:	DESENHO:
Flange da Célula de Carga Inferior				01	01
					CONJUNTO: FERRAMENTA DE EXTRUSÃO
					MATERIAL: SAE 4140
			DATA	NOME	<p style="text-align: center;">UNICAMP FEM - DEMA</p>
		Elab.	10/08/02	CELIO	
		Apr.	12/08/02	CELIO	
				ESCALA:	
				LIVRE	
00	EMISSÃO	12/08/02	CC		
Alt	MODIFICAÇÃO	DATA	NOME		



Todos os cantos não indicados R0.2
 Temperado e Revenido - Dureza: 62-64 HRC

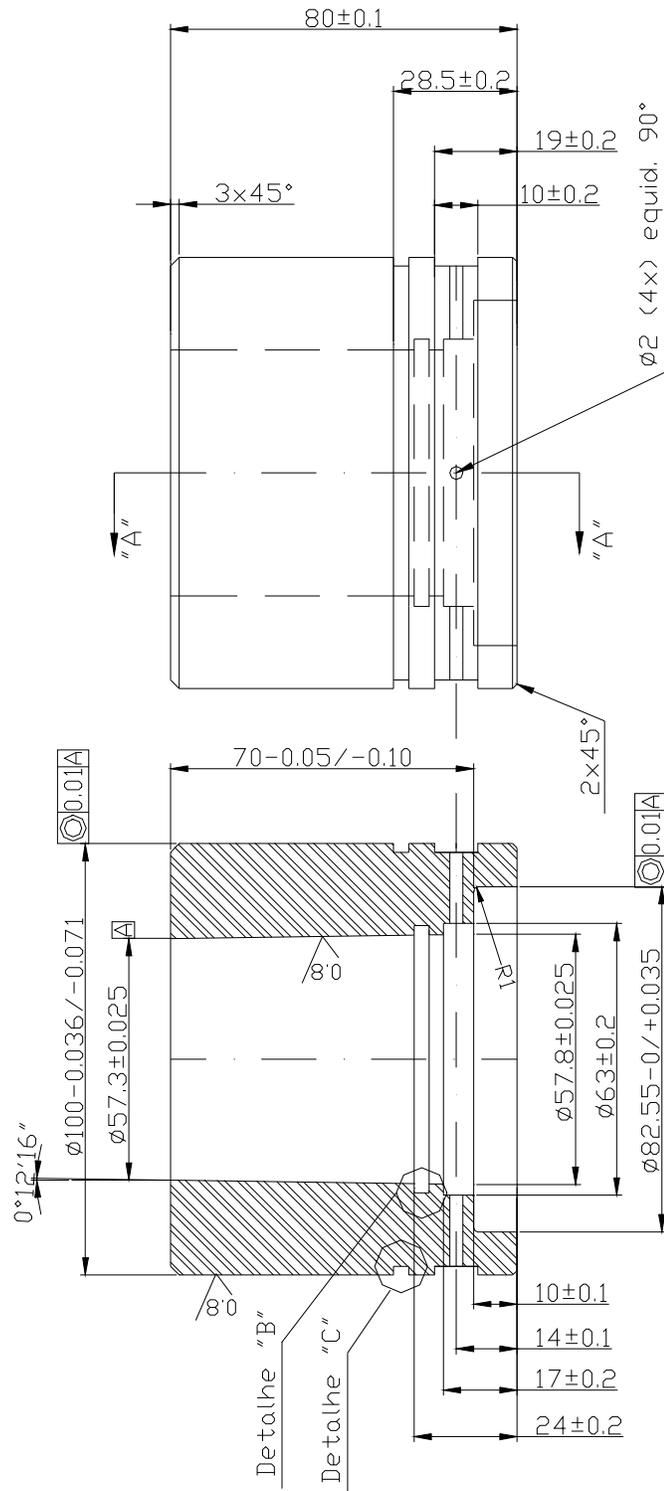
DENOMINAÇÃO: PUNÇÃO		QT.:	DESENHO:	FERRAMENTA DE EXTRUSÃO	
		01	02		
			CONJUNTO:	M2	
			MATERIAL:	M2	
			UNICAMP		
			FEM - DEMA		
			ESCALA: LIVRE		
00	EMISSÃO	12/08/02	CC.		
01	MODIFICAÇÃO		DATA	NOME	
			12/08/02	CELIO	
			12/08/02	CELIO	



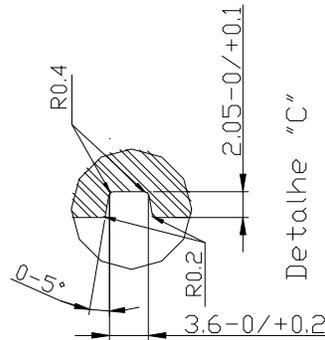
Corte "A-A"

Todos os cantos não indicados R0.5
 Temperado e Revenido - Dureza: 62-64 HRC

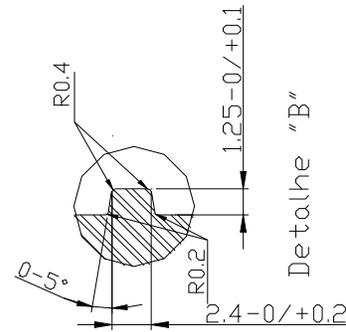
DENOMINAÇÃO:		QT.:		DESENHO:	
GUIA DO PUNÇÃO		01		04 - A	
				CONJUNTO: FERRAMENTA DE EXTRUSÃO	
				MATERIAL: M2	
		NOME		UNICAMP	
		DATA		FEM - DEMA	
		Elab.		12/18/02 CELIO	
		Apr.		12/18/02 CELIO	
		ESCALA:		LIVRE	
		EMISSÃO		12/08/02 CC	
		MODIFICAÇÃO		DATA NOME	
		00			
		01			



Corte "A-A"



Detalle "C"

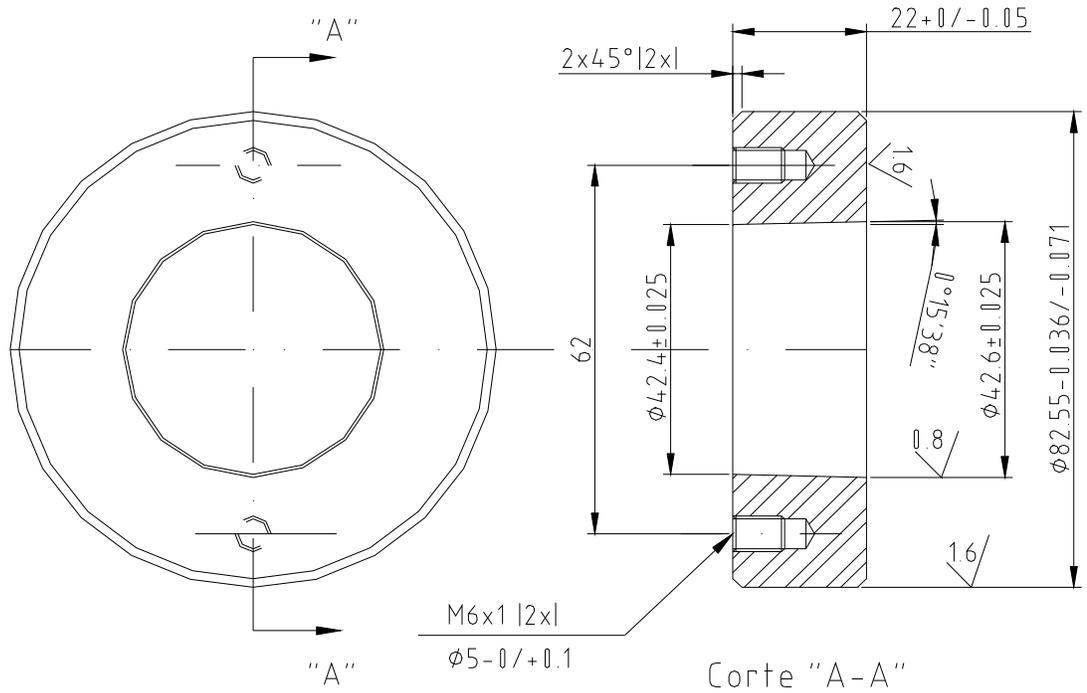


Detalle "B"

Todos os cantos não indicados R0.4
Temperado e Revenido - Dureza: 42 - 46 HRC

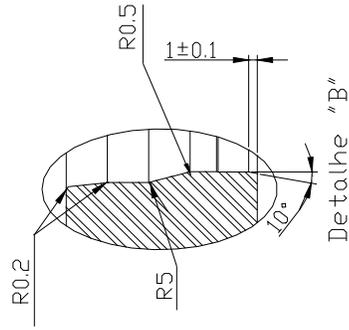
DESENHO: 04 - B		QT: 01		NOME	
CONJUNTO: FERRAMENTA DE EXTRUSÃO		DATA: 12/18/02		CELULO	
MATERIAL: HT13		Elab: 12/18/02		CELULO	
		Apr: 12/18/02		CELULO	
		ESCALA: LIVRE			
DENOMINAÇÃO: BUCHA DA GUIA DO PUNÇÃO		EMISSÃO: 12/08/08		DATA: 12/08/08	
		ALT: 12/08/08		CC: 12/08/08	
		MODIFICAÇÃO		INOME	

UNICAMP
FEM - DEMA



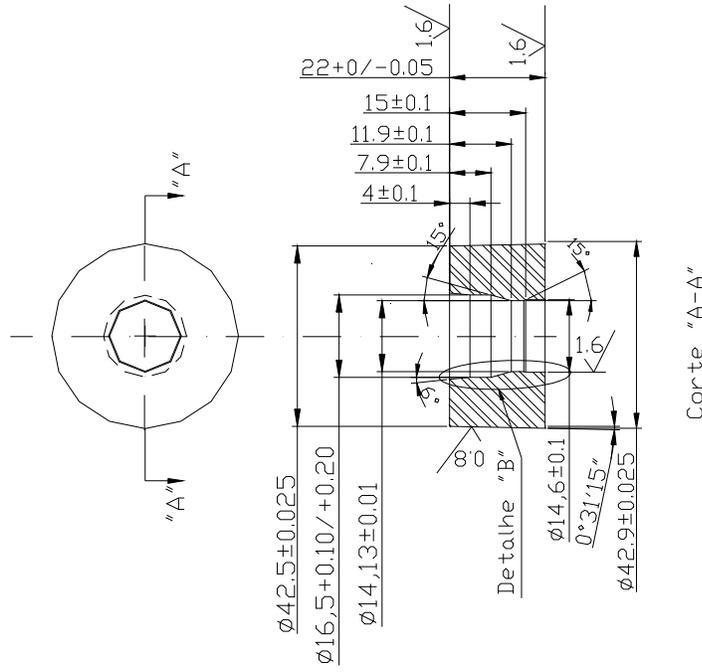
Todos os cantos não indicados R0.2
 Temperado e Revenido - Dureza: 42-46 HRC

DENOMINAÇÃO:				Qt.:	DESENHO:
ANEL DE CONTRAÇÃO				01	06
					CONJUNTO: FERRAMENTA DE EXTRUSÃO
					MATERIAL: H13
				DATA	NOME
				Elab. 10/08/02	CELIO
				Apr. 12/08/02	CELIO
				ESCALA:	UNICAMP FEM - DEMA
				LIVRE	
00	EMISSÃO	12/08/02	CC		
Alt	MODIFICAÇÃO	DATA	NOME		



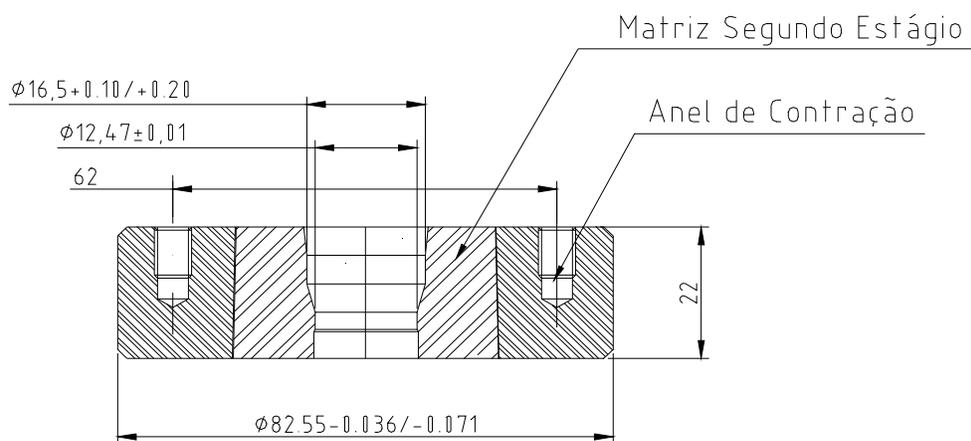
Superfície interna ∇ (Polido) $0.4/$
 Todos os cantos não indicados R0.2

Temperado e Revenido - Dureza: 62-64 HRC



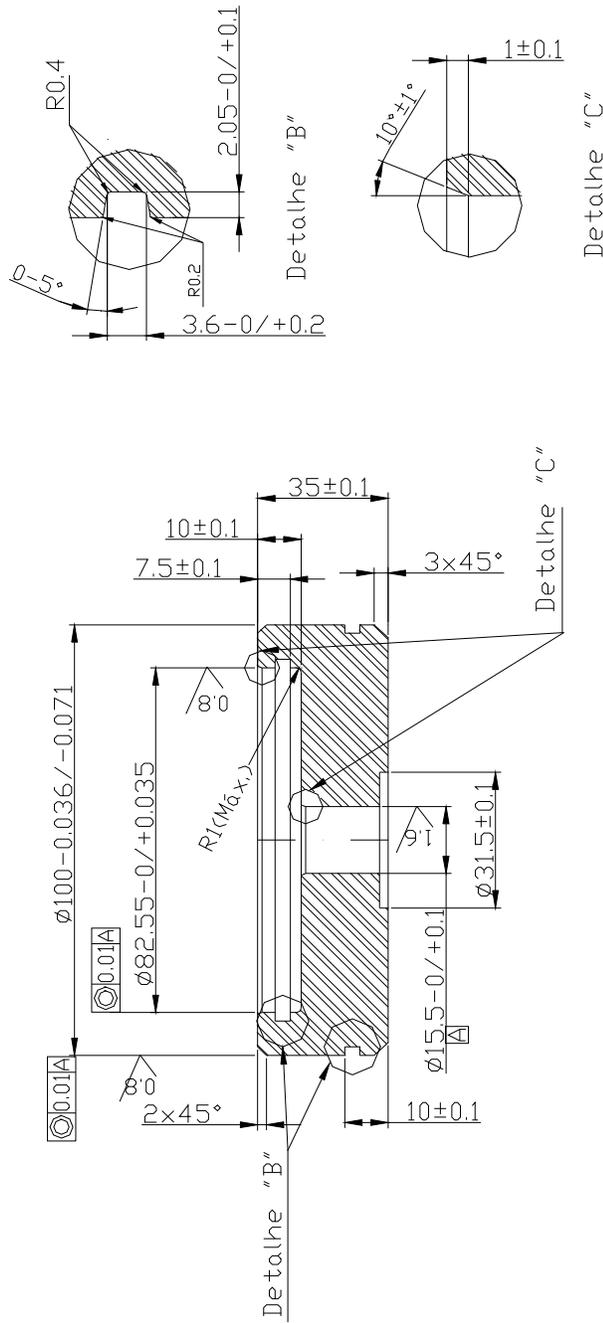
DENOMINAÇÃO:		QT.:		DESENHO:	07
MATRIZ (PRIMEIRO ESTÁGIO)		01		CONJUNTO:	FERRAMENTA DE EXTRUSÃO
				MATERIAL:	M2
		NOME			
		DATA	CELIO		
		Elab:	12/18/12		
		Apr:	12/18/12		
		ESCALA:		LIVRE	
00	EMISSÃO	12/08/02	CC		
01	MODIFICAÇÃO				

UNICAMP
 FEM - DEMA



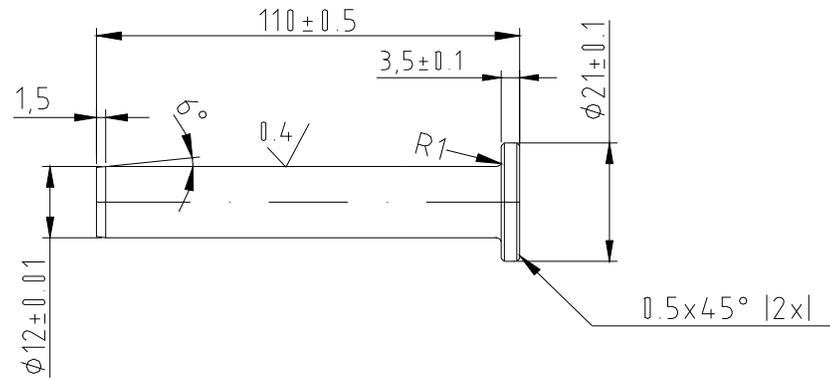
Superfície interna $\sqrt{0.4}$ | Polido
 Todos os cantos não indicados R0.2

DENOMINAÇÃO: MONTAGEM MATRIZ + ANEL DE CONTRAÇÃO ISEGUNDO ESTÁGIO				Qt.:	DESENHO:
				01	---
					CONJUNTO: FERRAMENTA DE EXTRUSÃO
					MATERIAL: ---
				DATA	NOME
			Elab.	10/08/02	CELIO
			Apr.	12/08/02	CELIO
				ESCALA:	UNICAMP FEM - DEMA
				LIVRE	
00	EMISSÃO	12/08/02	CC		
Alt	MODIFICAÇÃO	DATA	NOME		



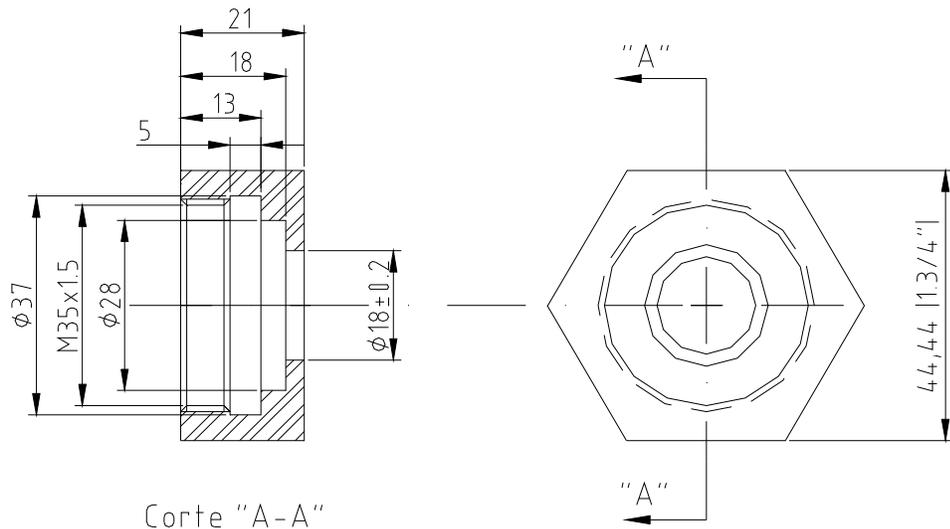
Todos os cantos não indicados R0.4
 Temperado e Revenido - Dureza: 42-46 HRC

DENOMINAÇÃO:		DESENHO: 08	
BUCHA DO ANEL INFERIOR		CONJUNTO: FERRAMENTA DE EXTRUSÃO	
QT.: 01		MATERIAL: SAE 4340	
DATA	NOME	UNICAMP	
Elab. 12/18/02	CELIO	FEM - DEMA	
Apr. 12/18/02	CELIO		
ESCALA:		LIVRE	
OO	EMISSÃO	12/08/02	CC
AIT	MODIFICAÇÃO	DATA	INDICE



Todos os cantos não indicados R0.2
 Temperado e Revenido - Dureza: 42-46 HRC

DENOMINAÇÃO:				Qt.:	DESENHO:
EXTRATOR				01	10
					CONJUNTO: FERRAMENTA DE EXTRUSÃO
					MATERIAL: H13
			DATA	NOME	<p style="text-align: center;">UNICAMP FEM - DEMA</p>
		Elab.	10/08/02	CELIO	
		Apr.	12/08/02	CELIO	
				ESCALA:	
				LIVRE	
00	EMISSÃO	12/08/02	CC		
Alt	MODIFICAÇÃO	DATA	NOME		

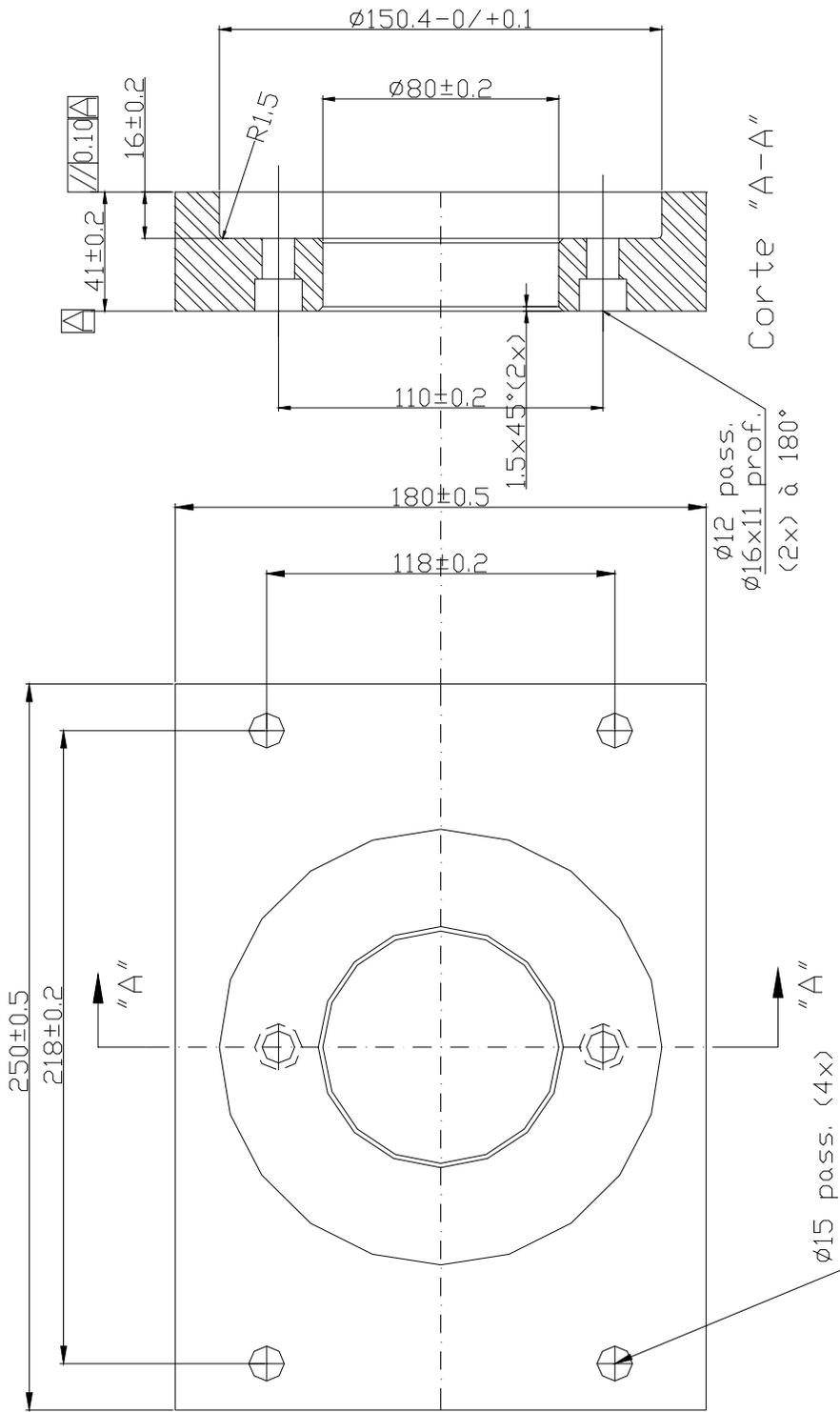


Corte "A-A"

Todos os cantos não indicados R0.4

Tolerâncias não indicadas ± 0.2

DENOMINAÇÃO:				Qt.:	DESENHO:
FLANGE DO EXTRATOR / CILINDRO				01	12
					CONJUNTO: FERRAMENTA DE EXTRUSÃO
					MATERIAL: SAE 1045
			DATA	NOME	UNICAMP FEM - DEMA
			Elab.	10/08/02 CELIO	
			Apr.	12/08/02 CELIO	
				ESCALA:	
				LIVRE	
00	EMISSÃO	12/08/02	CC		
Alt	MODIFICAÇÃO	DATA	NOME		

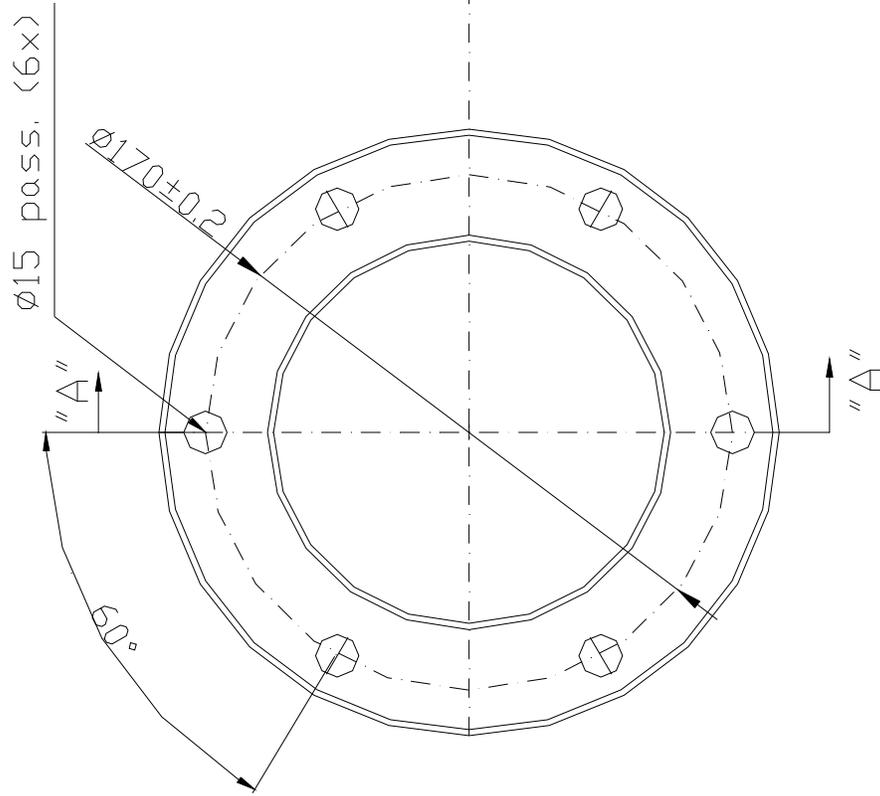


Todos os cantos não indicados R0.5
 Denominação: Flange de Apoio da Ferramenta
 Material: SAE 1045
 Quantidade: 01 pç. Des. nº11

DENOMINAÇÃO		QT:	DESENHO:
FLANGE APOIO DA FERRAMENTA		01	11
CONJUNTO: FERRAMENTA DE EXTRUSÃO		MATERIAL: SAE 1045	
MATERIAL: SAE 1045			
00	EMISSÃO	12/89/12	CELIO
01	Revisão	12/89/12	CELIO
02	Revisão		
03	Revisão		
04	Revisão		
05	Revisão		
06	Revisão		
07	Revisão		
08	Revisão		
09	Revisão		
10	Revisão		
11	Revisão		
12	Revisão		
13	Revisão		
14	Revisão		
15	Revisão		
16	Revisão		
17	Revisão		
18	Revisão		
19	Revisão		
20	Revisão		
21	Revisão		
22	Revisão		
23	Revisão		
24	Revisão		
25	Revisão		
26	Revisão		
27	Revisão		
28	Revisão		
29	Revisão		
30	Revisão		
31	Revisão		
32	Revisão		
33	Revisão		
34	Revisão		
35	Revisão		
36	Revisão		
37	Revisão		
38	Revisão		
39	Revisão		
40	Revisão		
41	Revisão		
42	Revisão		
43	Revisão		
44	Revisão		
45	Revisão		
46	Revisão		
47	Revisão		
48	Revisão		
49	Revisão		
50	Revisão		
51	Revisão		
52	Revisão		
53	Revisão		
54	Revisão		
55	Revisão		
56	Revisão		
57	Revisão		
58	Revisão		
59	Revisão		
60	Revisão		
61	Revisão		
62	Revisão		
63	Revisão		
64	Revisão		
65	Revisão		
66	Revisão		
67	Revisão		
68	Revisão		
69	Revisão		
70	Revisão		
71	Revisão		
72	Revisão		
73	Revisão		
74	Revisão		
75	Revisão		
76	Revisão		
77	Revisão		
78	Revisão		
79	Revisão		
80	Revisão		
81	Revisão		
82	Revisão		
83	Revisão		
84	Revisão		
85	Revisão		
86	Revisão		
87	Revisão		
88	Revisão		
89	Revisão		
90	Revisão		
91	Revisão		
92	Revisão		
93	Revisão		
94	Revisão		
95	Revisão		
96	Revisão		
97	Revisão		
98	Revisão		
99	Revisão		
100	Revisão		

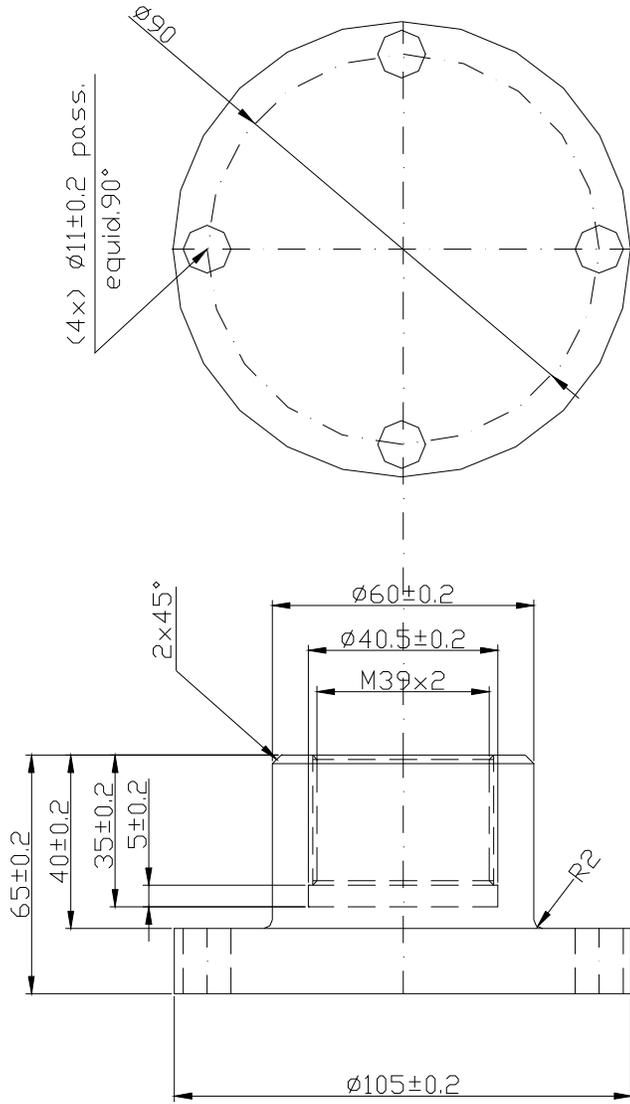
UNICAMP
 FEM - DEMA

ESCALA: LIVRE



Todos os cantos não indicados R0.5
 Denominação: Flange do Cilindro
 Material: SAE 1020
 Quantidade: 01 pç.
 Des. nº13

DENOMINAÇÃO		QTDE		DESENHO	
FLANGE DO CILINDRO		01		13	
CONJUNTO		FERRAMENTA DE EXTRUSÃO		MATERIAL	
SAE 1020		SAE 1020		UNICAMP	
FEM - DEMA		ESCALA:		LIVRE	
EMISSÃO		Data		Nome	
17/08/17		17/08/17		CELO	
Modificação		Data		Nome	
17/08/17		17/08/17		CELO	



Todos os cantos não indicados R0.5

Denominação: Flange da Célula Superior
 Material: SAE 4140
 Quantidade: 01 pç.
 Des. nº14

DENOMINAÇÃO:		FLANGE DA CELULA SUPERIOR		QT.:	01	DESENHO:	14
EMISSÃO		12/08/02	CC	NOME		CONJUNTO: FERRAMENTA DE EXTRUSÃO	
ALT	MODIFICAÇÃO	DATA	INDICE	Elab.	12/18/02	MATERIAL: SAE 4140	
				Apr.	12/18/02	UNICAMP	
				ESCALA:		FEM - DEMA	
				LIVRE			

ANEXO - B

Vedações Para Pistão

Turcon® Glyd Ring® T



Turcon® Glyd Ring® T - Dimensões

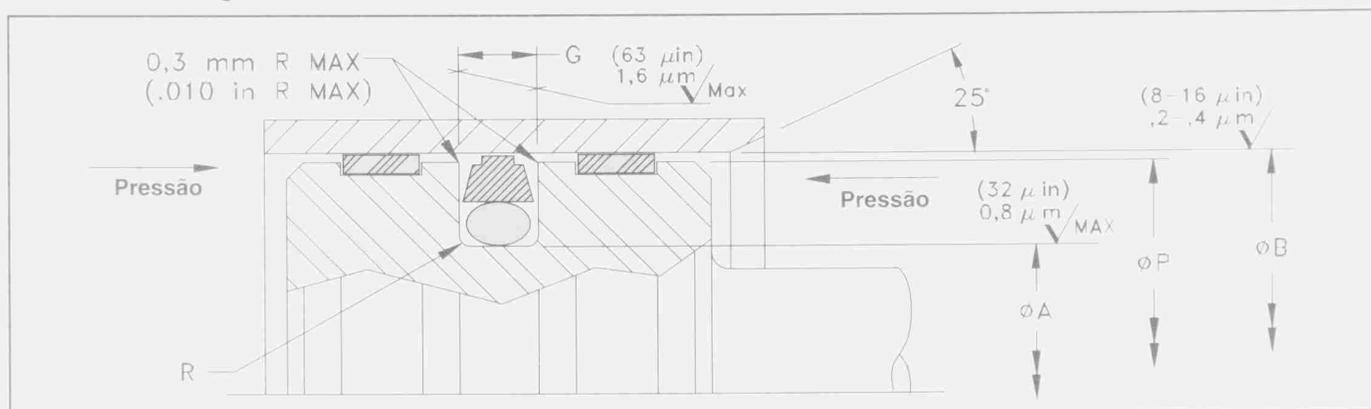


Tabela I: Turcon® Glyd Ring® T Métrico (Dimensões em mm)

DIÂMETRO CAMISA B H9	DIÂMETRO ALOJAMENTO A h9	LARGURA ALOJAMENTO G+0,2	DIÂMETRO MÍNIMO PARA PISTÃO P			RAIO MÁXIMO R	O'RING NÚMERO	TURCON® GLYD RING® T TURCON® T46
			0-100 BAR	100-200 BAR	200-300 BAR			PEÇA NÚMERO
12,0	7,1	2,2	11,04	11,44	11,64	0,4	011	PT0000120-T46NA
14,0	9,1	2,2	13,04	13,44	13,64	0,4	012	PT0000140-T46NA
15,0	7,5	3,2	13,84	14,24	14,64	0,6	109	PT0100150-T46NA
16,0	8,5	3,2	14,84	15,24	15,64	0,6	109	PT0100160-T46NA
18,0	10,5	3,2	16,84	17,24	17,64	0,6	111	PT0100180-T46NA

Vedações para Haste



Turcon® Stepseal® K Dimensões

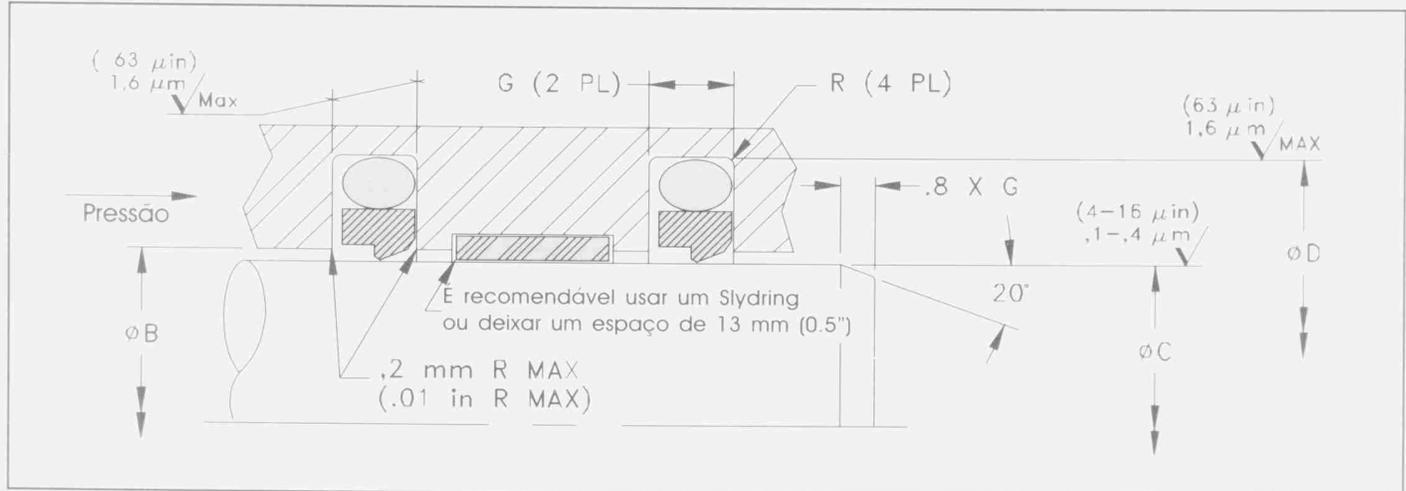
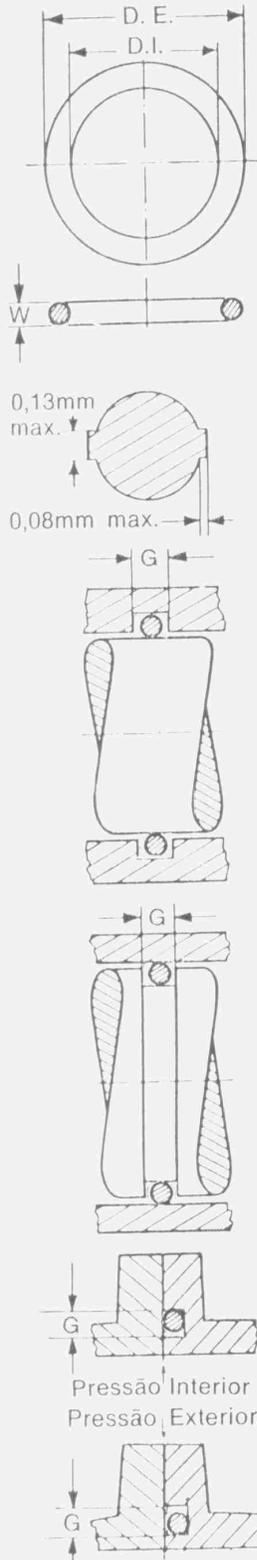


Tabela VII: Turcon® Stepseal® K Métrico (Dimensões em mm)

DIÂMETRO HASTE	DIÂMETRO ALOJAMENTO	LARGURA ALOJAMENTO	DIÂMETRO MÁXIMO B			RAIO MÁXIMO	O'RING NÚMERO	TURCON® STEPSEAL® K TURCON® T46 PEÇA NÚMERO
			0-100 BAR	100-200 BAR	200-320 BAR			
C f8	D H9	G+0,2				R		
4	8,9	2,2	4,5	4,4	4,3	0,3	009	RS1300040-T46NA
5	9,9	2,2	5,5	5,4	5,3	0,3	010	RS1300050-T46NA
6	10,9	2,2	6,5	6,4	6,3	0,3	011	RS1300060-T46NA
7	11,9	2,2	7,5	7,4	7,3	0,3	011	RS1300070-T46NA
8	15,3	3,2	8,6	8,5	8,3	0,5	111	RS1300080-T46NA
10	17,3	3,2	10,6	10,5	10,3	0,5	112	RS1300100-T46NA
12	19,3	3,2	12,6	12,5	12,3	0,5	113	RS1300120-T46NA
14	21,3	3,2	14,6	14,5	14,3	0,5	115	RS1300140-T46NA
15	22,3	3,2	15,6	15,5	15,3	0,5	116	RS1300150-T46NA



Série 2-XXX

● W 1,78 ± 0,08			● W 2,62 ± 0,08		
PARKER Nº	D. I. mm	D. E. mm	PARKER Nº	D. I. mm	D. E. mm
2001*	0.74	2.78	2102	1.24	6.48
2002*	1.07	3.61	2103	2.06	7.30
2003*	1.42	4.46	2104	2.84	8.08
2004	1.78	5.34	2105	3.63	8.87
2005	2.57	6.13	2106	4.42	9.66
2006	2.90	6.46	2107	5.23	10.47
2007	3.68	7.24	2108	6.02	11.26
2008	4.47	8.03	2109	7.59	12.83
2009	5.28	8.84	2110	9.19	14.43
2010	6.07	9.63	2111	10.77	16.01
2011	7.65	11.21	2112	12.37	17.61
2012	9.25	12.81	2113	13.94	19.18
2013	10.82	14.38	2114	15.54	20.78
2014	12.42	15.98	2115	17.12	22.36
2015	14.00	17.56	2116	18.72	23.96
2016	15.60	19.16	2117	20.29	25.53
2017	17.17	20.73	2118	21.89	27.13
2018	18.77	22.33	2119	23.47	28.71
2019	20.35	23.91	2120	25.07	30.31
2020	21.95	25.51	2121	26.64	31.88
2021	23.52	27.08	2122	28.24	33.48
2022	25.12	28.68	2123	29.82	35.06
2023	26.70	30.26	2124	31.42	36.66
2024	28.30	31.86	2125	32.99	38.23
2025	29.87	33.43	2126	34.59	39.83
2026	31.47	35.03	2127	36.17	41.41
2027	33.05	36.61	2128	37.77	43.01
2028	34.65	38.21	2129	39.34	44.58
2029	37.82	41.38	2130	40.94	46.18
2030	41.00	44.56	2131	42.52	47.76
2031	44.17	47.73	2132	44.12	49.36
2032	47.35	50.91	2133	45.69	50.93
2033	50.52	54.08	2134	47.29	52.53
2034	53.70	57.26	2135	48.90	54.14
2035	56.87	60.43	2136	50.47	55.71
2036	60.05	63.61	2137	52.07	57.31
2037	63.22	66.78	2138	53.64	58.88
2038	66.40	69.96	2139	55.25	60.49
2039	69.57	73.13	2140	56.82	62.06
2040	72.75	76.31	2141	58.42	63.66
2041	75.92	79.48	2142	59.99	65.23
2042	82.27	85.83	2143	61.60	66.84
2043	88.62	92.18	2144	63.17	68.41
2044	94.97	98.53	2145	64.77	70.01
2045	101.32	104.88	2146	66.34	71.58
2046	107.67	111.23	2147	67.95	73.19
2047	114.02	117.58	2148	69.52	74.76
2048	120.37	123.93	2149	71.12	76.36
2049	126.72	130.28	2150	72.69	77.93
2050	133.07	136.63	2151	75.87	81.11
			2152	82.22	87.46
			2153	88.57	93.81
			2154	94.92	100.16
			2155	101.27	106.51
			2156	107.62	112.86
			2157	113.97	119.21
			2158	120.32	125.56
			2159	126.67	131.91
			2160	133.02	138.26
			2161	139.37	144.61
			2162	145.72	150.96
			2163	152.07	157.31
			2164	158.42	163.66
			2165	164.77	170.01
			2166	171.12	176.36
			2167	177.47	182.71
			2168	183.82	189.06
			2169	190.17	195.41
			2170	196.52	201.76
			2171	202.87	208.11
			2172	209.22	214.46
			2173	215.57	220.81
			2174	221.92	227.16
			2175	228.27	233.51
			2176	234.62	239.86
			2177	240.97	246.21
			2178	247.32	252.56

Espeçura.
 Nº 2 001 - W 1,02 mm
 Nº 2 002 - W 1,27 mm
 Nº 2 003 - W 1,52 mm

Anel Guia Para Haste Dimensões

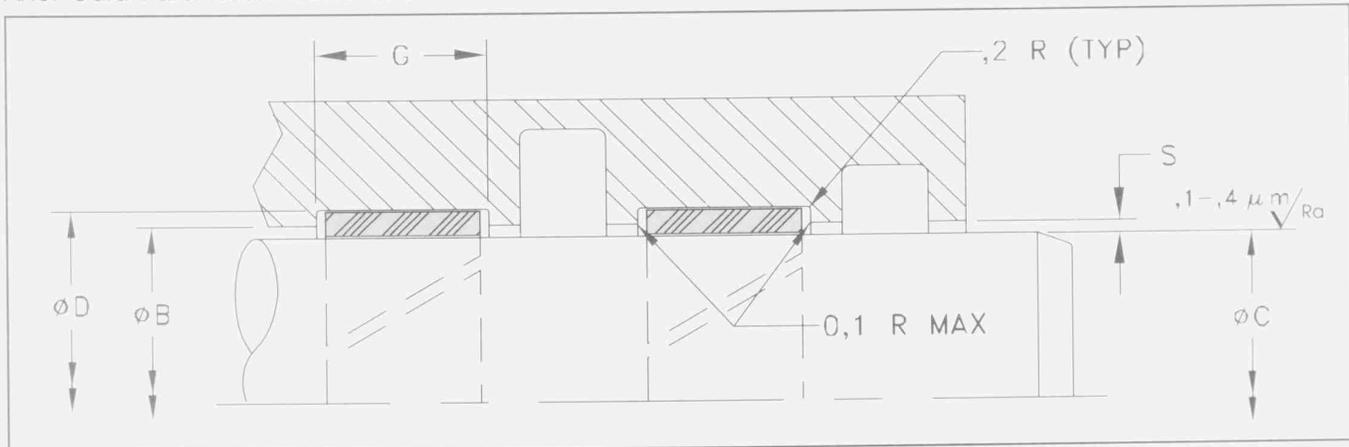


Tabela XV: Anel Guia Para Haste (Dimensões em mm)

SÉRIE Nº	DIÂMETRO HASTE C f8	DIÂMETRO ALOJAMENTO D H9	LARGURA ALOJAMENTO G + 0,2	FOLGA RADIAL S	SÉRIE Nº	DIÂMETRO HASTE C f8	DIÂMETRO ALOJAMENTO D H9	LARGURA ALOJAMENTO G + 0,2	FOLGA RADIAL S
GR65	15-140,0	C + 5,00	5,60	0,25-0,50	GR73	80-400,0	C + 5,00	15,00	0,25-0,90
GR69	32-220,0	C + 5,00	9,70	0,25-0,70	GR75	200-999,9	C + 5,00	25,00	0,25-1,10

Busak Shamban

Para dimensões e desenhos diferentes, por favor consulte Busak + Shamban

Para pedir por rolos, refira-se à seguinte tabela:

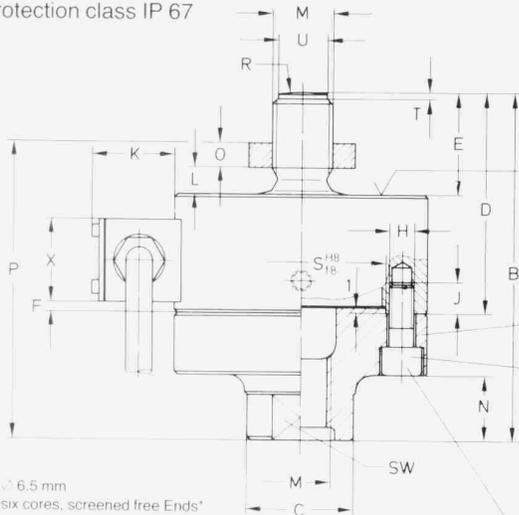
Peça Número	Largura Alojamento (mm)	Espessura (mm)	Material (código)	Comprimento (metros)
GM6500000-T47	5,60	2,50	T47	13,5
GM6800000-T47	8,00	2,50	T47	13,5
GM6900000-T47	9,70	2,50	T47	13,5
GM7300000-T47	15,00	2,50	T47	13,5
GM7400000-T47	20,00	2,50	T47	13,5
GM7500000-T47	25,00	2,50	T47	13,5
GM9900000-T47	9,70	4,00	T47	9,5
GM6500000-C380	5,60	2,50	C380	2,00
GM6900000-C380	9,70	2,50	C380	2,00
GM7300000-C380	15,00	2,50	C380	2,00
GM7400000-C380	20,00	2,50	C380	2,00
GM7500000-C380	25,00	2,50	C380	2,00

10. Dimensions (Dimensions with medium tolerance to DIN 7168)

10.1 Transducer

U 2 A, U 2-E
for nominal loads from 50 kg to 20 t
(for nominal forces from 500 N to 200 kN)

Protection class IP 67



∅ 6.5 mm
Six cores, screened free Ends*

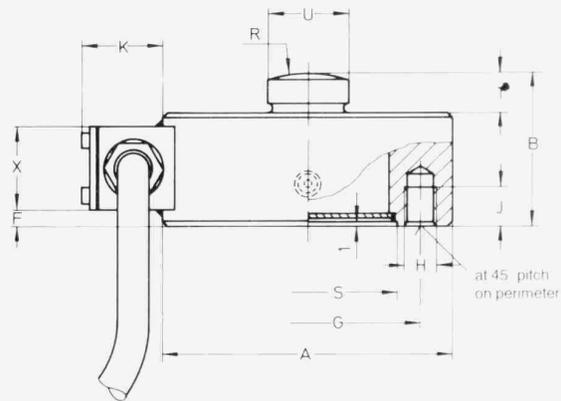
Opposing
face must not
touch surface
of load cell
body

at 45° pitch
on perimeter

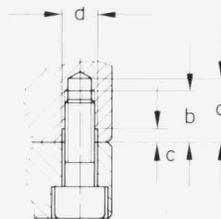
M_A [Nm]

C 2, C 2-E
for nominal loads from 50 kg to 50 t
(for nominal forces from 500 N to 500 kN)

Protection class IP 67



at 45° pitch
on perimeter



only for
U 2 A / 50 kg – 1 t
and U 2 A / 2 t

	a	b	c	d
50 kg – 1 t	15	12	4	5.5
2 t	20.5	16.5	4.5	11

30

U 2 A, C 2

Type	Dimensions in mm																				M _A [Nm]				
	∅ A _{0.2}	B	∅ C	D	E	F	∅ G	H	J	K	L _{min.}	M	N	O	P	R	∅ S	SW	T	∅ U		V	X	Y	Z
50 kg – 1 t	50	72	21	47	24	2	42	4 x M5	6	22	5/7.4	M12	13	7	59.2/62.6*	60	34	19	1.6	9.5	22	20	32	26	5
2 t	90	112	33	72	38	5	70	4 x M10	12	25	10.6	M20 x 1.5	15	10	94.8	100	55	30	1.6	17	34	26	36	34	35
5 t	100	141	40	86	47	5	78	4 x M12	17	25	13.2	M24 x 2	19	12	119.2	100	61	36	2	20	40	26	36	34	60
10 t	135	197	68	122	67	10	105	8 x M12	16	26	19	M39 x 2	29	19	168	160	79	60	2	36	65	26	36	34	60
20 t	155	232	82	142	85	10	125	8 x M16	20	26.5	24.2	M48 x 2	32	22	193.2	160	97	70	2.2	43	82	26	36	34	150

* nur bei U 2 A / 1 t

Type	Dimensions in mm													
	∅ A _{0.2}	B	F	∅ G	H	J	K	R	∅ S	T	∅ U	X	Y	Z
C 2/50 kg.../1 t	50	30	2	42	4 x M5	6	25	60	34 ^{HB}	7	13 _{0.1}	20	32	25
C 2/2 t and 5 t	90	48	5	70	4 x M10	12	27	100	55 ^{HB}	12.5	25 _{0.1}	26	36	34
C 2/10 t and 20 t	115	60	10	90	4 x M12	16	27	160	68 ^{HB}	12.5	32 _{0.1}	26	36	34
C 2/50 t	155	90	10	125	4 x M16	20	28	300	97 ^{HB}	15.5	44 _{0.1}	26	36	34

31

ANEXO - C

Planejamento Fatorial

O modelo estatístico utilizado para este estudo é dado conforme abaixo:

$$y_{ijklm} = \bar{\mu} + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_l + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\alpha\delta)_{il} + (\beta\gamma)_{jk} + (\beta\delta)_{jl} + (\gamma\delta)_{kl} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + (\alpha\beta\delta)_{ijl} + (\beta\gamma\delta)_{jkl} + (\alpha\beta\gamma\delta)_{ijkl} + \varepsilon_{ijklm}$$

$i = 1, 2, 3, \text{ e } 4$ representa os níveis de A (lubrificante), portanto $a = 4$.

$j = 1 \text{ e } 2$ representa os níveis de B (tratamento térmico), portanto $b = 2$.

$k = 1 \text{ e } 2$ representa os níveis de C (acabamento superficial), portanto $c = 2$.

$l = 1 \text{ e } 2$ representa os níveis de D (processo de lubrificação), portanto $d = 2$.

$m = 1, \dots, n$ representa as réplicas.

α_i é o efeito do fator A.

β_j é o efeito do fator B.

γ_k é o efeito do fator C.

δ_l é o efeito do fator D.

$(\alpha\beta)_{ij}$ é o efeito da interação de A e B.

$(\alpha\gamma)_{ik}$ é o efeito da interação de A e C.

$(\alpha\delta)_{il}$ é o efeito da interação de A e D.

$(\beta\gamma)_{jk}$ é o efeito da interação de B e C.

$(\beta\delta)_{jl}$ é o efeito da interação de B e D.

$(\gamma\delta)_{kl}$ é o efeito da interação de C e D.

$(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ é o efeito da interação de A, B e C.

$(\alpha\beta\delta)_{ijl}$ é o efeito da interação de A, B e D.

$(\beta\gamma\delta)_{jkl}$ é o efeito da interação de B, C e D.

$(\alpha\beta\gamma\delta)_{ijkl}$ é o efeito da interação de A, B, C e D.

ε_{ijklm} é o erro experimental.

O teste de hipóteses busca definir se as variáveis têm ou não influência e também se sua interação afeta a variável de resposta.

- H0: $\alpha_i = 0$ (para pelo menos um i)
H0: $\beta_j = 0$ (para pelo menos um j)
H0: $\gamma_k = 0$ (para pelo menos um k)
H0: $\delta_l = 0$ (para pelo menos um l)
H0: $(\alpha\beta)_{ij} = 0$ (para pelo menos um par ij)
H0: $(\alpha\gamma)_{ik} = 0$ (para pelo menos um par ik)
H0: $(\alpha\delta)_{il} = 0$ (para pelo menos um par il)
H0: $(\beta\gamma)_{jk} = 0$ (para pelo menos um par jk)
H0: $(\beta\delta)_{jl} = 0$ (para pelo menos um par jl)
H0: $(\gamma\delta)_{kl} = 0$ (para pelo menos um par kl)
H0: $(\alpha\beta\gamma)_{ijk} = 0$ (para pelo menos uma combinação ijk)
H0: $(\alpha\beta\delta)_{ijl} = 0$ (para pelo menos uma combinação ijl)
H0: $(\beta\gamma\delta)_{jkl} = 0$ (para pelo menos uma combinação jkl)
H0: $(\alpha\beta\gamma\delta)_{ijkl} = 0$ (para pelo menos uma combinação ijkl)

O somatório dos quadrados das diferenças é representado pelas expressões a seguir, visto que trata-se de um planejamento experimental desbalanceado.

Então: $N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4$, onde:

N = número total de réplicas.

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^d \sum_{m=1}^n y_{ijklm}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{N}$$

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i\dots}^2}{n_{i\dots}} - \frac{y_{\dots}^2}{N}$$

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j\dots}^2}{n_{.j\dots}} - \frac{y_{\dots}^2}{N}$$

$$SS_C = \sum_{k=1}^c \frac{y_{..k\dots}^2}{n_{..k\dots}} - \frac{y_{\dots}^2}{N}$$

$$SS_D = \sum_{l=1}^d \frac{y_{\dots l}^2}{n_{\dots l}} - \frac{y_{\dots}^2}{N}$$

$$\begin{aligned}
SS_{AB} &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij...}^2}{n_{ij...}} - \frac{y_{.....}^2}{N} - SS_A - SS_B \\
SS_{AC} &= \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \frac{y_{i.k..}^2}{n_{i.k..}} - \frac{y_{.....}^2}{N} - SS_A - SS_C \\
SS_{AD} &= \sum_{i=1}^a \sum_{l=1}^d \frac{y_{i..l.}^2}{n_{i..l.}} - \frac{y_{.....}^2}{N} - SS_A - SS_D \\
SS_{BC} &= \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{y_{.jk..}^2}{n_{.jk..}} - \frac{y_{.....}^2}{N} - SS_B - SS_C \\
SS_{BD} &= \sum_{j=1}^b \sum_{l=1}^d \frac{y_{.j.l.}^2}{n_{.j.l.}} - \frac{y_{.....}^2}{N} - SS_B - SS_D \\
SS_{CD} &= \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^d \frac{y_{..kl.}^2}{n_{..kl.}} - \frac{y_{.....}^2}{N} - SS_C - SS_D \\
SS_{ABC} &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{y_{ijk..}^2}{n_{ijk..}} - \frac{y_{.....}^2}{N} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \\
SS_{ABD} &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{l=1}^d \frac{y_{ij.l.}^2}{n_{ij.l.}} - \frac{y_{.....}^2}{N} - SS_A - SS_B - SS_D - SS_{AB} - SS_{AD} - SS_{BD} \\
SS_{BCD} &= \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^d \frac{y_{.jkl.}^2}{n_{.jkl.}} - \frac{y_{.....}^2}{N} - SS_B - SS_C - SS_D - SS_{BC} - SS_{BD} - SS_{CD} \\
SS_{ABCD} &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^d \frac{y_{ijkl.}^2}{n_{ijkl.}} - \frac{y_{.....}^2}{N} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_D - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{AD} \\
&\quad - SS_{BC} - SS_{BD} - SS_{CD} - SS_{ABC} - SS_{ABD} - SS_{BCD} \\
SS_E &= SS_T - SS_A - SS_B - SS_C - SS_D - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{AD} - SS_{BC} - SS_{BD} - SS_{CD} - SS_{ABC} - \\
&\quad SS_{ABD} - SS_{BCD} - SS_{ABCD}
\end{aligned}$$

Para a análise estatística das hipóteses, tem-se que SS_T é uma soma de variáveis aleatórias normalmente distribuídas como chi-quadrado e respectivamente com seus graus de liberdade.

Para facilitar a demonstração das equações defini-se o grau de liberdade do erro como:

$$G_E = (N_A + N_B + N_C + N_D - 1) - (a-1) - (b-1) - (c-1) - (d-1) - [(a-1)(b-1)] - [(a-1)(c-1)] - [(a-1)(d-1)] - [(b-1)(c-1)] - [(b-1)(d-1)] - [(c-1)(d-1)] - [(a-1)(b-1)(c-1)] - [(a-1)(b-1)(d-1)] - [(b-1)(c-1)(d-1)] - [(a-1)(b-1)(c-1)(d-1)]$$

Então temos:

$$F_{0A} = \frac{SS_A/(a-1)}{SS_E/G_E}$$

$$F_{0B} = \frac{SS_B/(b-1)}{SS_E/G_E}$$

$$F_{0C} = \frac{SS_C/(c-1)}{SS_E/G_E}$$

$$F_{0D} = \frac{SS_D/(d-1)}{SS_E/G_E}$$

$$F_{0AB} = \frac{SS_{AB}/(a-1)(b-1)}{SS_E/G_E}$$

$$F_{0AC} = \frac{SS_{AC}/(a-1)(c-1)}{SS_E/G_E}$$

$$F_{0AD} = \frac{SS_{AD}/(a-1)(d-1)}{SS_E/G_E}$$

$$F_{0BC} = \frac{SS_{BC}/(b-1)(c-1)}{SS_E/G_E}$$

$$F_{0BD} = \frac{SS_{BD}/(b-1)(d-1)}{SS_E/G_E}$$

$$F_{0CD} = \frac{SS_{CD}/(c-1)(d-1)}{SS_E/G_E}$$

$$F_{0ABC} = \frac{SS_{ABC}/(a-1)(b-1)(c-1)}{SS_E/G_E}$$

$$F_{0ABD} = \frac{SS_{ABD}/(a-1)(b-1)(d-1)}{SS_E/G_E}$$

$$F_{0BCD} = \frac{SS_{BCD}/(b-1)(c-1)(d-1)}{SS_E/G_E}$$

$$F_{0ABCD} = \frac{SS_{ABCD}/(a-1)(b-1)(c-1)(d-1)}{SS_E/G_E}$$

Para que a hipótese nula H_0 seja verdadeira, devemos ter a seguinte situação:

F_0 (calculado) < F (tabelado), ou seja não existe influência da variável ou não existe interação entre as variáveis de influência.

ANEXO - D

Planejamento Aleatorizado por Níveis

$$y_{ij} = \bar{\mu} + \tau_i + \varepsilon_{ij} \text{ onde:}$$

$\bar{\mu}$ é a média geral.

τ_j é o parâmetro que define cada tratamento.

ε_{ij} é um componente devido a erros aleatórios.

Análise de um modelo de efeitos fixos

Neste trabalho como o número de observações não pôde ser mantido constante em todos os tratamentos, a análise de variância foi feita empregando as seguintes expressões:

$$SS_T = \left(\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 \right) - \frac{y_{..}^2}{N}$$

$$SS_A = \left(\sum_{i=1}^a \frac{y_i^2}{n_i} \right) - \frac{y_{..}^2}{N}, \text{ Onde: } N = \sum_{i=1}^a n_i$$

$$SS_E = SS_T - SS_A$$

Contraste

O contraste é uma combinação linear dos totais y_i que permite a comparação das médias dos tratamentos. A soma dos quadrados para qualquer contraste é dado por:

$$SS_C = \frac{\left(\sum_{i=1}^a c_i y_i \right)^2}{\sum_{i=1}^a n_i c_i^2}$$

O teste de hipóteses busca definir se existe diferença entre as médias dos tratamentos analisados.

$$H_0: \tau_i = 0$$

O contraste é testado assim:

$$F_0 = \frac{SS_C}{SS_E/(N-a)}$$

Para que a hipótese nula H_0 seja verdadeira, devemos ter a seguinte situação:

F_0 (calculado) < F (tabelado), ou não existe diferença entre as médias analisadas.