

PROCESSOS E LUBRIFICANTES ALTERNATIVOS PARA EXTRUSÃO A FRIO DE PEÇAS EM AÇO

Celio Caminaga

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Mecânica
Departamento de Engenharia de Materiais
C.P. 6122 - 13083-970 – Campinas – SP - Brasil
celioc@fem.unicamp.br

Rafael Lopis da Silva Issii

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Mecânica
Departamento de Engenharia de Materiais
C.P. 6122 - 13083-970 – Campinas – SP - Brasil
009671@apollo-11.fem.unicamp.br

Sérgio Tonini Button

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Mecânica
Departamento de Engenharia de Materiais
C.P. 6122 - 13083-970 – Campinas – SP - Brasil
sergio1@fem.unicamp.br

Resumo: *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. A lubrificação tem um papel fundamental 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 das ferramentas. Geralmente a 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, sendo um óleo mineral e três óleos sintéticos. Esses foram associados a dois procedimentos de lubrificação, duas condições metalúrgicas do material e três condições de acabamento superficial do tarugo. Os resultados foram comparados aos obtidos nas mesmas condições com os lubrificantes tradicionais, em termos de força de extrusão e rugosidade superficial. Testes estatísticos aplicados aos resultados dos ensaios indicam processos e lubrificantes que podem ser utilizados como alternativa em substituição aos atualmente empregados na indústria.*

Palavras chave: *extrusão a frio, lubrificante, fosfatização, aço.*

1. INTRODUÇÃO

1.1 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. Contudo, eles não são suficientes para assegurar a lubrificação eficiente de todas as partes conformadas do tarugo⁽¹⁾.

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. 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) antes da conformação a frio^(2,3).

Embora seja um excelente carregador de lubrificante, esse método requer muitos passos, é custoso e de difícil reprodução^(4,5). 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⁽⁶⁾.

1.2 Problemas ambientais 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^(7,8,9).

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⁽⁷⁾. 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⁽⁸⁾.

Um estudo realizado por Saron *et al.*⁽¹⁰⁾ mostra que o aterro industrial é uma das formas mais comuns de disposição final dos lodos e que tem sido muito questionada. 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.

1.3 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⁽⁴⁾.

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⁽¹¹⁾. Um trabalho teórico anteriormente feito por Kudo⁽¹²⁾ 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⁽¹³⁾.

Os trabalhos de Lazzarotto *et al.*^(1,14) 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.*⁽¹⁵⁾. Os autores utilizaram farinha de trigo

em várias diluições em água, como lubrificante e avaliaram seu desempenho pela profundidade atingida no teste de Erichsen.

Caminaga *et al.*^(16,17) também apresentou resultados interessantes utilizando farinha de trigo e sabão em pó como lubrificantes. Esses resultados foram comparados a fosfatização de zinco associado a um lubrificante a base de bissulfeto de molibdênio.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Tarugo

O material utilizado para os ensaios de extrusão, com o sistema de lubrificação em estudo é o AISI 8620. As dimensões iniciais do tarugo foram diâmetro de 16mm (5/8") e altura de 36,5mm. As condições metalúrgicas do aço utilizado neste experimento são recozido e normalizado.

Um dos acabamentos superficiais do aço utilizado para este experimento foi o laminado. Outro acabamento superficial que foi utilizado é o recartilhado sobre o aço laminado, tentando se reproduzir a rugosidade esperada na fosfatização de zinco. A rugosidade superficial média (Ra) especificada entre 7 a 10 micra para este processo foi baseada em peças fosfatizadas utilizadas na indústria. Esse acabamento superficial recartilhado foi realizado em um torno mecânico convencional e uma ferramenta de recartilhado fino foi empregada. Também foi utilizado o acabamento superficial riscado sobre o diâmetro externo do tarugo de partida. Esse acabamento superficial foi feito a partir de um material laminado com diâmetro de 3/4" (19,05 mm), usinado até 16mm de diâmetro e feito os riscos através de uma ferramenta, com passe 0,4mm e profundidade de 0,05mm.

2.2 Processos de Lubrificação

As ferramentas foram projetadas de modo a permitir a lubrificação eficiente da região de deformação, com fornecimento contínuo do lubrificante. Assim, o lubrificante permanece 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.

2.3 Lubrificantes

Neste trabalho foram realizados ensaios em 4 tipos de lubrificantes comerciais (*Renoform MZA20, Plantoform 64, Plantoform 54, Ecocool*), sendo o primeiro um óleo mineral e os outros três óleos sintéticos. Também foram realizados ensaios de viscosidade dinâmica para todos os lubrificantes.

2.4 Planejamento Experimental

2.4.1 Planejamento Fatorial

O planejamento fatorial é indicado quando se deseja 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⁽¹⁸⁾.

As variáveis de influência definidas para o nosso estudo foram:

- **tratamento térmico** em 2 níveis (normalizado e recozido).
- **acabamento superficial** em 3 níveis (laminado, recartilhado e riscado).
- **processo de lubrificação** em 2 níveis (imersão e hidrostático).
- **lubrificante** em 4 níveis (*Renoform MZA20, Plantoform64, Plantoform54 e Ecocool*).

A variável de resposta medida nos ensaios de extrusão foi a força de extrusão máxima para cada réplica. Foram realizados 48 ensaios com diferentes associações de lubrificante, tratamento térmico, acabamento superficial e processo de lubrificação. Para cada ensaio foram feitas 3 réplicas.

2.4.2 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⁽¹⁸⁾. Neste trabalho, a variável de influência estudada foi o lubrificante.

2.5 Ensaios de Extrusão

Foram realizados os ensaios de extrusão para o primeiro estágio (primeira redução de área de 22%), 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.

Para o segundo estágio de extrusão (segunda redução de área de 22%), 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 no primeiro estágio.

Definiu-se como padrão de referência, o ensaio com o material na condição metalúrgica normalizado, acabamento superficial laminado revestido com fosfato de zinco, processo de lubrificação por imersão com um lubrificante a base de bissulfeto de molibdênio (MoS₂). Essa condição representa o processo atualmente utilizado nas indústrias de conformação a frio.

2.6 – Ensaios com a Matéria Prima e com os Produtos Extrudados

Foram realizados ensaios de dureza Brinell nos tarugos para as condições metalúrgica recozido e normalizado. Medições foram feitas nos produtos considerados satisfatórios após o segundo estágio de extrusão, a fim de avaliar a qualidade dos produtos obtidos através dos lubrificantes testados. Essas medições consistiram em:

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

3. RESULTADOS

3.1 Dureza e Composição Química

Os resultados de dureza dos tarugos antes do processo de extrusão, foram 121-125 Brinell para o material recozido e de 179-185 Brinell para o material normalizado. A composição química do aço SAE8620 é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do aço SAE 8620.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% em Massa)							
Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al
0.220	0.710	0.015	0.012	0.420	0.420	0.180	0,028

3.2 Viscosidade dos lubrificantes

Os ensaios de viscosidade dinâmica nos óleos lubrificantes apresentaram os seguintes resultados: para o lubrificante *Reniform MZA20* o valor da viscosidade dinâmica média foi de 370 Pa.s (m⁻¹.kg.s⁻¹), para o lubrificante *Plantiform 64* foi de 463 Pa.s, para o lubrificante *Plantiform 54* foi de 162 Pa.s e para o lubrificante foi de *Ecocool 122* Pa.s. Portanto o lubrificante com maior viscosidade é o *Plantiform 64* e o de menor viscosidade foi o *Ecocool*.

3.3 Primeiro Estágio de Extrusão

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

- **existe influência** de todas as variáveis: lubrificante, tratamento térmico, acabamento superficial e processo de lubrificação.
- **existe interação** entre as duas variáveis: lubrificante e tratamento térmico; lubrificante e acabamento superficial; tratamento térmico e acabamento superficial; tratamento térmico e processo de lubrificação; acabamento superficial e processo de lubrificação.

- **não existe interação** entre as duas variáveis: lubrificante e processo de lubrificação.
- **existe interação** entre as três variáveis: tratamento térmico e acabamento superficial e processo de lubrificação.
- **não existe interação** entre as três variáveis: lubrificante e tratamento térmico e acabamento superficial; lubrificante e tratamento térmico e processo de lubrificação
- **existe interação** entre as quatro variáveis: lubrificante, tratamento térmico, acabamento superficial e processo de lubrificação.

Este teste estatístico informou que todas as variáveis influenciam a variável de resposta e que não existe interação do lubrificante com o processo de lubrificação. Então, o teste de planejamento aleatorizado por níveis (contraste das médias) foi realizado para cada condição de teste dos ensaios de extrusão.

A Tabela 2 apresenta os resultados de força de extrusão média considerados satisfatórios para o primeiro estágio, ou seja, são estatisticamente iguais ao padrão de referência (95% de nível de confiança). Resultados semelhantes foram obtidos em termos de carga de extrusão por Caminaga *et al.*⁽¹⁷⁾, quando se utilizou o mesmo lubrificante *Renoform MZA20* e um *Sabão em Pó* comercial (lubrificante sólido).

Tabela 2 – Resultados experimentais – forças de extrusão médias (1º estágio de extrusão).

Condições dos Ensaios	Força de extrusão (kN)
Padrão de Referência: Fosfato de Zinco com MoS ₂ – Normalizado – Laminado – imersão	82,3
<i>Renoform MZA20</i> – Normalizado – Recartilhado – Imersão	84,3
<i>Renoform MZA20</i> – Normalizado – Recartilhado – Hidrostático	83,6
<i>Renoform MZA20</i> – Normalizado – Riscado – Imersão	84,7
<i>Plantoform 54</i> – Normalizado – Riscado – Imersão	75,4
<i>Ecocool</i> – Normalizado – Riscado – Imersão	83,4
<i>Renoform MZA20</i> – Normalizado – Riscado – Hidrostático	71,1
<i>Renoform MZA20</i> – Re cozido – Laminado – Imersão	83,3
<i>Renoform MZA20</i> – Re cozido – Laminado – Hidrostático	92,3

A Tabela 3 apresenta os resultados de força de extrusão média, considerados estatisticamente menores que o padrão de referência para o primeiro estágio de extrusão. Experimentos realizados por Caminaga⁽¹⁶⁾ utilizando *Farinha de Trigo* como lubrificante, também resultaram em forças de extrusão estatisticamente menores a do padrão de referência.

Tabela 3 – Resultados experimentais – forças de extrusão médias (1º estágio de extrusão).

Condições dos Ensaios	Força de extrusão (kN)
Padrão de Referência: Fosfato de Zinco com MoS ₂ – Normalizado – Laminado – imersão	82,3
<i>Plantoform 54</i> – Normalizado – Riscado – Hidrostático	68,7
<i>Plantoform 64</i> – Normalizado – Riscado – Hidrostático	64,8
<i>Ecocool</i> – Normalizado – Riscado – Hidrostático	63,8
<i>Renoform MZA20</i> – Re cozido – Riscado – Imersão	52,8
<i>Plantoform 64</i> – Re cozido – Riscado – Imersão	55,3
<i>Plantoform 54</i> – Re cozido – Riscado – Imersão	53,9
<i>Ecocool</i> – Re cozido – Riscado – Imersão	51,5
<i>Renoform MZA20</i> – Re cozido – Riscado – Hidrostático	53,9
<i>Plantoform 64</i> – Re cozido – Riscado – Hidrostático	56,0
<i>Plantoform 54</i> – Re cozido – Riscado – Hidrostático	53,6
<i>Ecocool</i> – Re cozido – Riscado – Hidrostático	52,3

Todos os lubrificantes testados na condição metalúrgica normalizado, acabamento superficial laminado e processos de lubrificação por imersão e hidrostático foram considerados insatisfatórios, pois apresentaram resultados de força de extrusão superiores ao do padrão. Sendo que para os lubrificantes *Plantoform 64*, *Plantoform54* e *Ecocool* os valores de força foram maiores que 150 kN, portanto totalmente inadequados a essas condições do tarugo de partida.

O lubrificante *Renoform MZA20* foi o único considerado satisfatório para a condição normalizado, acabamento recartilhado e processos por imersão e hidrostático. Os outros lubrificantes testados nessa condição apresentaram forças superiores ao do padrão.

Os lubrificantes ensaiados com o material normalizado, acabamento superficial riscado e processo de lubrificação por imersão foram considerados satisfatórios. A exceção foi o lubrificante *Plantoform 64* que apresentou força de extrusão maior que o padrão de referência. Observa-se que utilizando a mesma condição de ensaio, mas com o processo de lubrificação hidrostático, o resultado para o *Renoform MZA20* permaneceu satisfatório, mas para os demais lubrificantes os resultados de força de extrusão foram menores que a do padrão de referência, portanto melhores. Através desses resultados nota-se que o processo de lubrificação influencia a variável de resposta (força de extrusão), isso confirma os resultados obtidos e as sugestões feitas por Caminaga⁽¹⁶⁾, que sugeria um dispositivo de pressurização eficiente para uma melhor avaliação da variável de influência denominada processo de lubrificação.

Nota-se que as forças de extrusão consideradas menores que o padrão de referência são com condições de ensaio, onde se utilizou o acabamento superficial riscado. Isso pode ser explicado pelo fato que o diâmetro externo do material com acabamento riscado foi previamente usinado, eliminando-se óxidos e carepas, provenientes do processo de laminação a quente.

3.4 Segundo Estágio de Extrusão

Realizados os ensaios de extrusão com apenas um estágio de deformação e feitas as análises estatísticas, procedeu-se 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.

O teste de contraste foi realizado com 95% de nível de confiança e mostrou que as médias apresentadas na Tabela 4 são estatisticamente iguais à média do padrão referência, quando realizado o segundo estágio de deformação.

Tabela 4 – Resultados experimentais – forças de extrusão médias (2º estágio de extrusão).

Condições dos Ensaios	Força de extrusão (kN)
Padrão de Referência: Fosfato de Zinco com MoS ₂ – Normalizado – Laminado – imersão	76,7
<i>Renoform MZA20</i> – Normalizado – Riscado – Hidrostático	81,4
<i>Plantoform 64</i> – Normalizado – Riscado – Hidrostático	83,5
<i>Ecocool</i> – Normalizado – Riscado – Hidrostático	82,8
<i>Renoform MZA20</i> – Recozido – Laminado – Imersão	84,8
<i>Renoform MZA20</i> – Recozido – Laminado – Hidrostático	76,5

Pode-se observar que apenas cinco condições de ensaio foram consideradas satisfatórias. As demais condições apresentaram forças de extrusão estatisticamente superiores ao do padrão de referência, algumas delas sofreram recalque e não foi possível realizar o segundo estágio de extrusão.

O acabamento superficial recartilhado que havia se mostrado um eficiente portador de lubrificante para o primeiro estágio não se mostrou eficiente para o segundo estágio de extrusão. Isso pode ter ocorrido pelos aplainamentos nos picos de rugosidade criados pela operação de recartilho. Caminaga *et al.*^(16,17) já havia apresentado resultados semelhantes quando testou o lubrificante *Renoform MZA20* e dois outros lubrificantes sólidos (*Sabão em Pó* e *Farinha de Trigo*). Foi constatado naquele estudo, que o acabamento superficial recartilhado é eficiente para dois

estágios de extrusão, quando o aço é usado na condição metalúrgica normalizado e aplicado lubrificantes sólidos. Para os lubrificantes líquidos o acabamento de recartilhado não foi eficiente, independente da condição metalúrgica do tarugo.

Da mesma maneira o acabamento superficial riscado que tinha fornecido 15 ensaios considerado satisfatórios no primeiro estágio de extrusão, pois apresentou forças de extrusão estatisticamente iguais ou menores ao padrão de referência, se tornou ineficaz para a maioria dos ensaios do segundo estágio de extrusão, isso também pode ter ocorrido pelos aplainamentos nos picos de rugosidade. Contudo, esse acabamento superficial foi eficaz para o segundo estágio de extrusão em condições mais específicas, ou seja, o aço foi utilizado na condição metalúrgica normalizado e o processo de lubrificação empregado foi o hidrostático. Dessa forma confirmando que o processo de lubrificação influencia a variável de resposta que a força de extrusão.

Graficamente pode-se observar nas Figuras 1 e 2, o comportamento das curvas de força de extrusão médias para os lubrificantes nas condições apresentadas na Tabela 4, em que estão associados ao tratamento térmico, acabamento superficial e ao processo de lubrificação. As curvas foram traçadas junto com a curva de força média do padrão de referência.

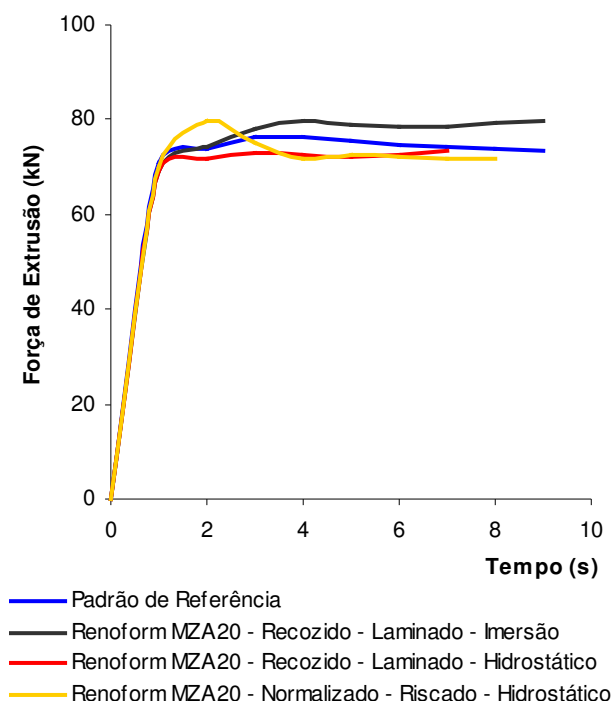


Figura 1 – Curva de força de extrusão – *Renoform MZA20*

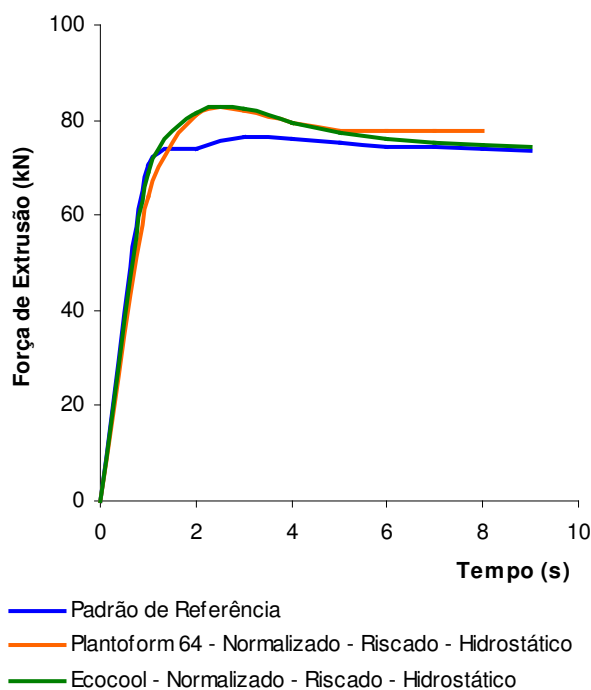


Figura 2 – Curva de Força de extrusão – *Plantoform 64 e Ecocool*

Pode-se observar na Figura 1 que o lubrificante *Renoform MZA20* associado ao tratamento térmico normalizado, acabamento superficial riscado e processo de lubrificação hidrostático apresenta força de extrusão graficamente superior ao padrão de referência no início do processo e depois diminui, provavelmente porque o atrito também é diminuído durante o processo. Para o mesmo lubrificante associado ao tarugo recozido, acabamento laminado e processo de lubrificação por imersão e hidrostático, o atrito se manteve praticamente estável.

Na Figura 2 observa-se que para os dois lubrificantes, a curva de extrusão apresenta força maior no início do processo de deformação e posteriormente é diminuída. Nota-se que esse tipo de curva ocorreu nos lubrificantes ensaiados com o aço normalizado, acabamento superficial riscado e processo de lubrificação hidrostático. Isso caracteriza uma condição mais favorável em termos de redução de carga durante todo o processo de extrusão.

3.5 Ensaio com os Produtos Extrudados

A Tabela 5 mostra os resultados da qualidade dimensional e a rugosidade superficial média (Ra), para os ensaios considerados satisfatórios no segundo estágio de extrusão.

Para peças extrudadas a qualidade dimensional deve estar dentro do campo de tolerância, entre IT8 a IT11⁽¹⁹⁾. 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⁽²⁰⁾. A norma UNI3963 (1960) apud Agostinho *at al.* ⁽²⁰⁾, 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. Pode-se observar na Tabela 5, que a qualidade dimensional está entre IT7 e IT9 e rugosidade superficial média (Ra) entre 0,14 e 1,79µm. Desse modo considerados satisfatórios em termos de rugosidade superficial e qualidade dimensional.

Tabela 5 – Resultados dimensionais – segundo estágio.

Condições dos Ensaio	Qualidade Dimensional (tolerância ISO – IT)	Rugosidade Superficial Média (Ra= µm)
Padrão de Referência: Fosfato de Zinco com MoS ₂ – Normalizado – Laminado – imersão	IT7	0,07 – 0,55
<i>Reniform MZA20</i> – Normalizado – Riscado – Hidrostático	IT9	0,27 – 0,86
<i>Plantiform 64</i> – Normalizado – Riscado – Hidrostático	IT7	0,36 – 0,82
<i>Ecocool</i> – Normalizado – Riscado – Hidrostático	IT8	0,25 – 0,93
<i>Reniform MZA20</i> – Recozido – Laminado – Imersão	IT9	0,14 – 1,79
<i>Reniform MZA20</i> – Recozido – Laminado – Hidrostático	IT9	0,38 – 1,71

4. CONCLUSÕES

Os resultados experimentais e as análises estatísticas mostram que:

- todas as variáveis de influência analisadas (lubrificante, tratamento térmico, acabamento superficial e processo de lubrificação) afetam a força de extrusão.
- os lubrificantes considerados satisfatórios para o segundo estágio de extrusão foram classificados independente viscosidade.
- os lubrificantes *Plantiform 64* e *Ecocool*, associados ao tarugo normalizado, acabamento superficial riscado e processo de lubrificação hidrostático, foram classificados como uma alternativa ao uso do tarugo revestido com fosfato de zinco. Entretanto, para uma melhor avaliação, deve-se testar esses lubrificantes associados a um acabamento superficial riscado, obtido com a usinagem dos riscos sobre o aço laminado.
- o lubrificante *Reniform MZA20* mostrou-se o mais indicado em substituição ao uso da fosfatização de zinco, pois além de apresentar força de extrusão satisfatória, quando associado ao tarugo normalizado, acabamento superficial riscado e processo de lubrificação hidrostático, esse lubrificante também é indicado para o acabamento superficial laminado, tanto para o processo de lubrificação por imersão e hidrostático, utilizando-se apenas do recozimento do tarugo de partida.
- a qualidade dimensional e a rugosidade superficial média (Ra) dos produtos extrudados mostraram-se satisfatórias.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e a FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo suporte financeiro e a FUCHS do Brasil S.A, que gentilmente forneceu os lubrificantes empregados nesse trabalho.

6. REFERÊNCIAS

1. LAZZAROTTO, L. et al. Three selection criteria for the cold metal forming lubricating oils containing extreme pressure agents. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 80-81, pp. 245-250, 1998-a.
2. JANG, D.H. et al. The process sequence design of a power-assisted steering part. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 113, n. 1-3, pp. 87-92, 2001.
3. SAIKI, H. et al. Influence of die geometry on the workability of conversion coatings combined with soap lubricant in cold forming of steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v.67, pp. 238-243, 1997.
4. KOMATSUZAKI, S. et al. Cold forming of steel with lubricating oils. **Lubrication Engineering**, v. 52, n. 3, pp. 259-266, 1996.
5. DUBAR, L. et al. New surface processes for cold forging of steels. **Surface and Coatings Technology**, v. 102, n. 1-2, pp.159-167, 1998.
6. LAZZAROTTO, L. et al. The effects of processing bath parameters on the quality and performance of zinc phosphate stearate coatings. **Surface and Coatings Technology**, v. 122, n. 2-3, pp. 94-100, 1999.
7. LEVY, N. Sludge Treatment in the Metal-Finishing Industry. **Metal Finishing**, pp. 80-83, 2000.
8. 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**, v. 69, pp. 135-141, 1998.
9. NATH, K. & MORIGUCHI, I., Automotive applications for an alternate cold forming lubricant. In: **IV Conferência Nacional de Conformação de Chapas - V Conferência Internacional de Forjamento – XXI SENAFOR**, Porto Alegre, 2001.
10. SARON, A. et al. Tratamento de águas residuárias de indústrias de galvanoplastia. In: **IX Silubesa – Simpósio Luso-Brasileiro De Engenharia Sanitária E Ambientais**, 2000.
11. 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.
12. KUDO, H., **International Journal of Mechanical Sciences**, vol. 7, pp. 383, 1965.
13. NELLEMAN, T. et al. Real area of contact and friction stress – The role of trapped lubricants. **Wear**, v. 43 (1), pp. 45-53, 1977.
14. LAZZAROTTO, L. et al. Selection methodology for lubricating oils in cold metal forming processes. **Wear**, vol. 215, pp. 1-9, 1998-b.
15. YOSHIMURA H. et al. Improvement of the Erichsen values of titanium sheets using various cereal flour lubricants. **Journal of the Iron and Steel Institute of Japan**, v. 87 (7), pp. 474-479, 2001.
16. CAMINAGA, C. **Estudos de lubrificantes alternativos para o processo de extrusão a frio de aços para cementação**. 2003. 91 f. Dissertação de Mestrado Acadêmico – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2003.
17. CAMINAGA, C. et al. Study of alternative Lubricants to the cold extrusion of steel shafts. In: **17th International Congress of Mechanical Engineering**, São Paulo, Brazil, 2003. CD-ROM.
18. MONTGOMERY, **Design and Analysis of Experiments**. 3rd Ed. John Wiley and Sons, 1991, 649p.

19. SCHULER, In: **Metal Forming Handbook**, Berlin, Springer, 1998. CD-ROM.
20. AGOSTINHO, O. L. et al. **Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões**. 1.ed. Edgard Blücher Ltda, 1977, 295p.

ALTERNATIVE LUBRICATION AND LUBRICANTS FOR THE COLD EXTRUSION OF STEEL PARTS

Celio Caminaga

State University of Campinas
School of Mechanical Engineering
Department of Materials Engineering
C.P. 6122 - 13083-970 – Campinas – SP - Brazil
celioc@fem.unicamp.br

Rafael Lopis da Silva Issii

State University of Campinas
School of Mechanical Engineering
Department of Materials Engineering
C.P. 6122 - 13083-970 – Campinas – SP - Brazil
<mailto:009671@apollo-11.fem.unicamp.br>

Sérgio Tonini Button

State University of Campinas
School of Mechanical Engineering
Department of Materials Engineering
C.P. 6122 - 13083-970 – Campinas – SP - Brazil
sergio1@fem.unicamp.br

Abstract. *Lubrication is very important in cold extrusion of steels, mainly regarding to the reduction of extrusion load and tool wear. Lubrication processes used in 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 stearate. 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 (a mineral oil, and three semi-synthetic oils), two lubrication methods were applied (immersion and hydrostatic, with billets in two metallurgical conditions and with three surface finishing. 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.*

Keywords. *cold extrusion, lubricants, phosphatization, steel.*