

ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA CARGA DE DEFORMAÇÃO E DO COEFICIENTE DE ATRITO NAS PROPRIEDADES DO AÇO 1020

Priscila Porr

Laboratório de Fenômenos de Superfície

porrpri@ig.com.br

Amilton Sinatora

Laboratório de Fenômenos de Superfície

sinatora@usp.br

Resumo. O trabalho tem por objetivo estudar as propriedades de espécimes de aço carbono 1020 após sofrerem deformação, tendo como base o ensaio de compressão do anel. Esse tipo de ensaio visa a obtenção do coeficiente de atrito nos processos de conformação plástica. Os ensaios foram realizados com espécimes com forma de anel na razão geométrica 6:3:2, os quais foram deformados pela ação de uma prensa hidráulica. As cargas aplicadas foram de 20 e de 60 tonf, em condições sem lubrificação e lubrificadas com PTFE. Com base na variação micro-estrutural e na variação da propriedade mecânica de dureza do material, será avaliada a influência da carga de deformação e do coeficiente de atrito no processo de conformação deste material.

Palavras chave: ensaio de compressão do anel, atrito, lubrificação, carga de deformação.

1. Introdução

O setor metalúrgico-mecânico brasileiro vive um período de crescimento consistente, o qual repousa sobre ações desenvolvidas no passado pelo campo empresarial, governamental e acadêmico. O presente trabalho visa estudar as propriedades de espécimes de aço carbono 1020 após sofrerem deformação, tendo como base o ensaio de compressão do anel. O ensaio de compressão do anel visa a determinação de valores confiáveis de coeficiente de atrito, aplicáveis a importantes operações industriais no referido setor.

A determinação de valores do coeficiente de atrito nos processos de conformação plástica é de extrema importância, uma vez que para uma abordagem sistêmica das operações de conformação, como sugerida por Kobayashi et al. (1989), o atrito é a variável que inter-relaciona o material com as variáveis do equipamento. Na maioria dos processos de conformação mecânica dos materiais, o atrito é o fator predominante.

Entretanto, por mais vastamente utilizada que seja a palavra “atrito”, este termo ainda não possui uma definição unívoca, seja industrialmente ou academicamente. A palavra “atrito” é empregada como sinônimo de: (a) fenômeno, o fenômeno de atrito; (b) de um adimensional, o coeficiente de atrito; (c) de força, a força de atrito; (d) de energia, trabalho de atrito. Neste texto, contudo, será explorada a expressão “coeficiente de atrito”.

Um dos métodos para a determinação do coeficiente de atrito, o qual será abordado neste texto, é o ensaio de compressão do anel. O objetivo deste trabalho é, primeiramente, entender melhor o fenômeno do atrito e suas conseqüências, assim como a carga de deformação e suas implicações. Foram realizados ensaios de compressão de anéis de aço 1020 em diferentes condições de atrito e carga de deformação, para que sejam levantadas as conseqüências das diferentes condições sobre a microestrutura e sobre as propriedades mecânicas do referido material.

2. Revisão da literatura

2.1 Atrito sem conformação plástica macroscópica

Tanto Hutchings como Bhushan começam por tentar dar uma definição do atrito. Ambos definem dois tipos de movimento relativo, o rolamento e o escorregamento, e concordam que o atrito corresponde à força tangencial resistiva que age em direção oposta ao movimento de um corpo sobre o outro. Bhushan define dois tipos de força de atrito: a força de atrito estático, que é a força tangencial requerida para se iniciar um movimento entre dois corpos, e a força de atrito dinâmico, que é a força requerida para manter um movimento entre os dois corpos. Ele afirma ainda que a força de atrito estático é sempre maior ou igual que a força de atrito dinâmico. Uma observação pertinente feita por Bhushan é que o atrito não é uma propriedade do material, mas sim uma resposta do sistema, que pode ser um fenômeno desejável ou não. Ele afirma ainda que o atrito provoca perda de energia e desgaste da superfície em movimento.

Hutchings e Bhushan apresentam as chamadas “leis do atrito”, que foram definidas por Leonardo da Vinci e depois redescobertas por Amontons quase 200 anos depois. Essas leis não são empíricas; logo, seu não cumprimento não implica em violação de leis naturais.

A primeira lei do atrito estabelece que a força de atrito é proporcional à carga normal e que o coeficiente de atrito independe da carga normal. Ela é dada pela seguinte fórmula:

$$F = \mu \cdot W \quad (1)$$

Onde F é a força de cisalhamento (N), μ é o coeficiente de atrito adimensional e W é a carga normal aplicada (N).

Esta lei vale para muitos materiais lubrificados e não-lubrificados, não valendo, contudo, para polímeros. Segundo Hutchings, μ varia em uma ampla faixa de valores, indo de 0,001 até 10, mas normalmente encontra-se entre 0,1 e 1.

A segunda lei do atrito diz que a força de atrito independe da área de contato aparente. Esta lei não vale para polímeros ou materiais com superfícies muito moles e limpas (já que nesta última situação, a área de contato aparente é igual à área de contato real).

A terceira lei de atrito estabelece que a força de atrito é independente da velocidade. Em alguns casos, contudo, ela não é válida, já que μ cai um pouco com o aumento da velocidade de deslizamento. Para muitos metais e não-metais, a sua resistência é maior em maiores taxas de distorção, o que resulta numa menor área de contato e num menor coeficiente de atrito. Entretanto, altas cargas normais e velocidades de deslizamento resultam em aumento da temperatura, o que pode reduzir a resistência dos materiais devido à fusão localizada das superfícies (que reduz a força de cisalhamento e o coeficiente de atrito).

2.2 Atrito na conformação plástica

Dieter inicia suas definições com base na compressão homogênea de um disco plano de raio a e altura h . Ele define o coeficiente de atrito coulombiano (atrito devido ao escorregamento na interface) em termos de tensões:

$$\mu = \frac{\tau}{p} \quad (2)$$

em que τ é a tensão de cisalhamento (N/m^2) na interface e p é a tensão normal à interface (N/m^2).

A figura 1 mostra um diagrama da razão da pressão média aplicada (tensão de compressão) com a tensão de escoamento do material em função da razão geométrica do disco (a/h) e do coeficiente de atrito. Com base nesse diagrama, percebe-se a importância de se conhecer bem o coeficiente de atrito, uma vez que pequenos acréscimos no coeficiente de atrito podem elevar muito a tensão de compressão necessária, fazendo com que sejam necessárias máquinas mais robustas para a execução de uma mesma tarefa. Vale salientar também que, quanto maior for a razão geométrica, maior será a influência do coeficiente de atrito nas forças de conformação.

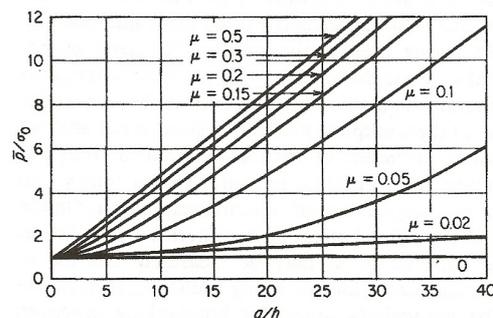


Figura 1: Pressão de deformação média na compressão em função da razão geométrica e do coeficiente de atrito (figura retirada de Dieter)

De acordo com Schey, as leis de atrito de Amontons não são necessariamente um modelo realístico quando se trata da conformação de metais. Quando a tensão de cisalhamento na interface atinge um determinado valor, é energeticamente mais favorável que o material sofra cisalhamento internamente, enquanto sua superfície fica imóvel. Neste caso, ocorre o chamado atrito estático, e o atrito de escorregamento não é mais verificado.

Segundo Dieter, nesta situação a interface apresenta uma resistência ao cisalhamento constante e o atrito estático é o tipo de atrito mais freqüente em situações de trabalho a quente.

A condição para o atrito estático é:

$$\tau_i = \mu \cdot p > k \quad (3)$$

Sendo que, com base no critério de escoamento de von Mises:

$$k = 0,577 \cdot \sigma_{esc} \quad (4)$$

Dessa forma, muitas vezes é dito que $\mu_{max} = 0,577$, mas esse tipo de conclusão, afirma Schey, só é válida quando a conformação da superfície é alcançada quando $p = \sigma_{esc}$. Em muitos processos de conformação mecânica, a pressão pode chegar a múltiplos da tensão de escoamento do material, e, uma vez que o valor de k se mantém constante com o aumento da pressão hidrostática, o valor calculado do coeficiente de atrito μ diminui com o aumento da pressão. Tendo isto em vista, é razoável dizer que, quando $\mu \cdot p > k$, o coeficiente de atrito calculado passa a não ter mais significado, uma vez que não há mais escorregamento relativo na interface.

Tendo em vista a questão exposta acima acerca do coeficiente de atrito μ , tanto Dieter quanto Schey propõem a seguinte relação para o fator de atrito:

$$m = \frac{\tau}{k} \quad (5)$$

em que τ é a resistência de cisalhamento na interface e k é a tensão cisalhante limite de escoamento (N/m^2). O fator de atrito m é uma adimensional tal que $0 \leq m \leq 1$, sendo que $m = 0$ para interfaces sem atrito (deslizamento perfeito) e $m = 1$ para atrito estático (adesão). Esta definição é muito conveniente, pois a tensão de cisalhamento agora é definida com a

ajuda de k , um valor já previamente especificado. Já o uso do coeficiente de atrito μ requer que seja medido o valor da pressão.

De acordo com a definição de atrito coulombiano dada pela equação (2), o coeficiente de atrito cai à medida que a pressão (tensão de compressão) aumenta. Isso se opõe à realidade, diz Dieter, podendo levar a interpretações errôneas dos valores tabelados de μ . Por outro lado, o fator de atrito m tem sido crescentemente utilizado para descrever o atrito nos processos de conformação (especialmente nos processos que envolvem grandes deformações, como é o caso da laminação a quente), devido sua facilidade de ser medido. A utilização de m no lugar de μ , além de ser mais apropriado fisicamente, ainda introduz simplificações matemáticas.

Contudo, o uso do fator de atrito m também deve ser feito com algumas ressalvas, alerta Schey. É importante ressaltar que, na maioria das vezes, a interface é composta por um material diferente do material do qual é composta a peça, porém assume-se que eles possuem as mesmas propriedades.

É importante deixar claro que nem sempre o atrito é um vilão. O atrito pode ser inclusive desejável, já que ele transfere tensões entre a peça e a ferramenta (como na estampagem profunda), permitindo assim maiores reduções, e assegura a continuidade da passagem da peça através dos rolos na laminação.

2.3 Lubrificação

A ação dos lubrificantes segue o seguinte princípio: se um filme de um material com baixa resistência ao cisalhamento pode ser colocado entre duas superfícies, o coeficiente de atrito é diminuído.

Segundo Altan et al (1999), existem basicamente três tipos de lubrificação que governam as condições de atrito na conformação: condições a seco, hidrodinâmicas e de contorno.

Na situação a seco, não existe adição de lubrificante na interface peça-ferramenta, estando presentes apenas as camadas de óxidos e eventuais contaminantes. O atrito é muito alto neste caso, e apenas em situações muito específicas, como na laminação a quente de chapas e lingotes, essa situação é desejada.

No caso da lubrificação hidrodinâmica, uma espessa camada de lubrificante está presente entre a matriz e a peça. Uma vez que as condições de atrito são governadas pela viscosidade dos lubrificantes, que em geral decresce rapidamente com o aumento de temperatura, condições de lubrificação hidrodinâmica na conformação em alta velocidade (laminação de fitas e arames, por exemplo) ocorrem somente em determinados regimes de velocidade, na qual a temperatura na interface é relativamente baixa.

A lubrificação de contorno é a condição mais comumente verificada na conformação dos metais, uma vez que elevações na temperatura de interface e pressões relativamente altas impedem a ocorrência de lubrificação hidrodinâmica. Como esse tipo de lubrificação não permite uma análise confiável, segundo Altan, a maioria do conhecimento sobre lubrificação de contorno é empírica.

O atrito na conformação mecânica dos metais é controlado pela utilização de lubrificantes apropriados para cada aplicação. É esperado que os lubrificantes apresentem uma série de características, tais como reduzir o atrito de deslizamento entre a matriz e a peça, agir na prevenção de aderência e soldagem da peça na matriz e possuir boas propriedades de isolamento térmico. É claro que nenhum lubrificante é capaz de apresentar todas as características acima descritas, porém, para cada tipo de aplicação, procura-se um determinado tipo de lubrificante capaz de otimizar o processo da conformação mecânica.

2.4 Encruamento

O encruamento, também chamado de endurecimento por trabalho, é o fenômeno pelo qual um metal dúctil se torna mais duro e resistente quando é submetido à deformação plástica. Uma vez que a temperatura na qual ocorre a deformação ser baixa se comparada à temperatura de fusão do material, fala-se também em trabalho a frio.

Um aumento de dureza e resistência do material implica numa redução na ductilidade do metal. O fenômeno de encruamento é explicado com base em interações entre campos de deformações de discordâncias. Segundo Callister, discordâncias são defeitos cristalinos lineares ao redor das quais existe um desalinhamento atômico. A deformação plástica corresponde ao movimento de um grande número de discordâncias, que se movem em resposta à aplicação de uma tensão. A densidade de discordâncias em um metal aumenta com a deformação plástica devido à multiplicação ou a formação de novas discordâncias. Como a distância média de separação entre as discordâncias diminui, e as interações de deformação discordância-discordância são repulsivas, o resultado é que o movimento de uma discordância é dificultado pela presença de outras discordâncias. Uma vez que restringir ou impedir o movimento das discordâncias confere maior dureza e mais resistência a um material, este é o efeito verificado quando se deforma um material plasticamente.

O encruamento é utilizado com frequência para melhorar as propriedades mecânicas dos metais durante o processo de fabricação, em especial para aumentar a resistência de ligas metálicas que não respondem a tratamentos térmicos endurecedores. Os efeitos do encruamento podem ser removidos mediante tratamento térmico de recozimento.

2.5 O ensaio de compressão do anel

De acordo com Dieter, para a determinação de μ ou m existem basicamente duas abordagens. A primeira consiste em medir a pressão média de deformação e a tensão de escoamento àquelas condições, para então calcular μ de maneira

analítica. Porém, nem sempre se conhece a tensão de escoamento em cada condição de conformação. A segunda abordagem é através dos ensaios de compressão de anel.

No teste do anel, um corpo de provas em forma de anel com faces planas é comprimido para uma redução conhecida. Segundo Altan et al (1999), caso o coeficiente de atrito seja zero o anel se deformará da mesma forma que um disco sólido, no qual cada elemento flui radialmente para fora numa taxa proporcional às suas distâncias do centro. Para valores pequenos do coeficiente de atrito, o fluxo para fora ocorrerá em velocidades menores e, para o mesmo grau de compressão, o diâmetro externo será menor do que no caso de coeficiente de atrito zero. No caso do coeficiente de atrito superar certo valor crítico, é energeticamente favorável que apenas uma parte do anel flua para fora e que outra flua para o centro, de forma que o diâmetro externo seja ainda menor.

Para obter a magnitude do fator de atrito, o diâmetro interno do anel comprimido deve ser comparado com valores predeterminados de coeficientes ou de fatores de atrito. Os resultados destas análises são organizados na forma de “curvas de calibração”, conforme figura 2.

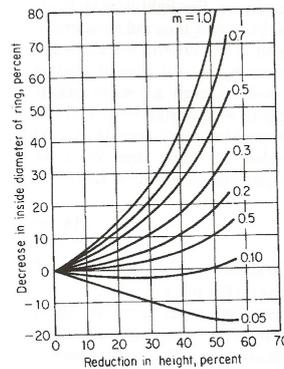


Figura 2: Curva de calibração para ensaio de compressão de anel com dimensões 6:3:1 (figura retirada de Dieter)

Para a utilização dessas curvas de calibração, o diâmetro interno do anel deve ser medido em seu ponto de máxima dilatação. A partir dos valores de redução de altura e de variação no diâmetro interno, para uma dada geometria do anel, obtém-se o valor do fator de atrito para o caso em questão.

O atrito existente entre as placas da máquina de compressão e as extremidades do corpo de prova produz tensões que tendem a retardar o escoamento nas regiões próximas aos contatos, produzindo um gradiente de tensões ao longo da espessura do corpo de prova. O metal adjacente ao contato sofre pouca ou nenhuma deformação.

Durante a deformação, à medida que o material escorrega sobre as ferramentas, as forças de atrito se opõem ao escoamento do metal do centro para as extremidades. Esta resistência devido ao atrito ocorre naquela região do corpo de prova em contato com os batentes, enquanto o metal localizado à meia-altura da amostra pode escoar na direção radial sem constrição. Isto leva a um corpo de prova deformado em forma de barril, e internamente é criada uma região não-deformada próximo à superfície dos batentes. A figura 3 mostra as regiões pouco deformadas na secção transversal do anel que sofreu deformação, em decorrência do atrito na interface ferramenta-corpo de prova.

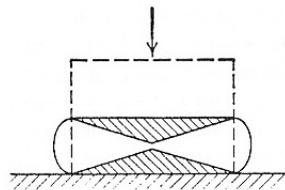


Figura 3: Região deformada (branca) e não-deformada (hachurada) no corpo de prova no ensaio de compressão do anel (figura retirada de Dieter)

Além disso, no caso de uma condição de atrito suficientemente alta, a direção de escoamento do material mudará em certo ponto da secção transversal do anel, em consequência da mudança de direção da força de atrito atuante. Neste caso, o material apresenta uma linha neutra de escoamento, na qual o material não sofre escoamento radial. A figura 4 apresenta as direções de escoamento do metal no teste de compressão.

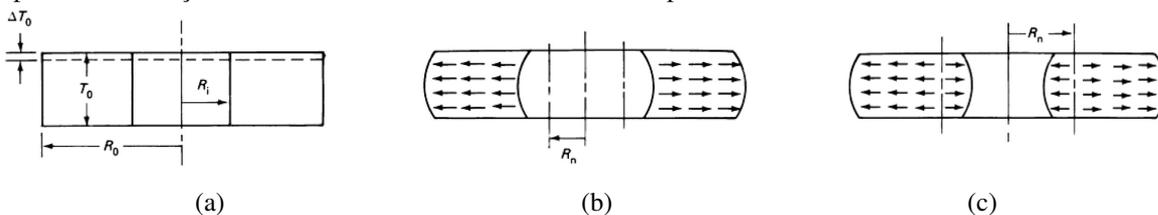


Figura 4: Corpo de prova para ensaio de compressão em diferentes situações (a) não-deformado (b) deformado em condição de baixo atrito (c) deformado em condição de alto atrito

2.6 Testes de dureza

A propriedade mecânica chamada dureza é uma medida da resistência do material a uma deformação plástica localizada. Existem basicamente três tipos de medida de dureza: dureza ao risco, dureza à penetração e dureza dinâmica ou de rebote. A dureza à penetração é a medida de dureza de maior interesse para os materiais usados na engenharia. Existem diversos métodos para sua medição (Brinell, Vickers e Rockwell), porém serão analisados aqui apenas o método de dureza Vickers.

Este teste usa como penetrador um diamante piramidal de base quadrada, cujo ângulo interno entre as faces opostas é de 136°. O número da dureza Vickers (VHN) é definido como a carga aplicada dividido pela área superficial de penetração. Na prática, esta área é calculada a partir de medidas microscópicas do comprimento das diagonais da impressão. Muitas vezes é necessária uma preparação cuidadosa da superfície do corpo de prova a ser analisado, a fim de assegurar uma impressão bem definida e que possa ser medida com precisão.

Os testes de dureza são realizados com mais frequência que qualquer outro ensaio mecânico por serem simples e baratos, além do fato de que o ensaio é não-destrutivo. Além disso, outras propriedades mecânicas, como o limite de resistência à tração, podem ser estimadas a partir dos ensaios de dureza.

3. Materiais e métodos

Foram usinados em aço 1020 anéis nas dimensões especificadas de 18mm de diâmetro externo, 9mm de diâmetro interno e 6mm de espessura (razão geométrica 6:3:2). Tais anéis, assim como foram recebidos da usinagem, foram encaminhados para o ensaio de compressão, sem nenhum tratamento térmico ou de superfície adicional. A amostra antes da compressão será designada como amostra 0.

A prensa utilizada nos ensaios de compressão é do tipo hidráulica, com capacidade de carga de 150tonf e velocidade de operação entre 0,6mm/s e 3mm/s. O material da ferramenta para os testes é o aço AISI H13, lixado e polido com partículas de até 100µm. Os ensaios foram realizados em temperatura ambiente.

Foram realizados ensaios para cada uma das seguintes condições:

- compressão com 60 tonf, lubrificado com PTFE (amostra 1)
- compressão com 60 tonf, sem lubrificação (amostra 2)
- compressão com 20 tonf, lubrificado com PTFE (amostra 3)
- compressão com 20 tonf, sem lubrificação (amostra 4)

A ferramenta era polida com partículas de até 100µm antes da compressão de cada uma das peças. No caso dos ensaios lubrificados, foi aplicada uma fita de PTFE nas superfícies dos espécimes antes de sua compressão.

A dureza das amostras foi medida em três regiões diferentes: dureza superficial das amostras, cobrindo o comprimento desde o raio interno ao raio externo (região amarela da figura 8); dureza na seção transversal ao longo da direção radial das amostras, pelo seu centro, cobrindo o comprimento desde o raio interno ao raio externo (doravante chamada apenas de dureza radial - região vermelha da figura 8); e dureza ao longo da espessura das amostras (região azul da figura 8).

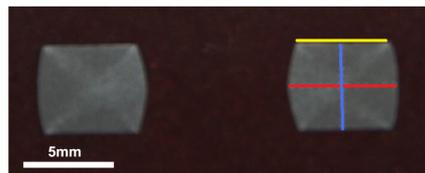


Figura 5: Região de medição das durezas. Amarelo: dureza superficial; vermelho: dureza radial; azul: dureza na espessura

Para cada uma das durezas acima descritas, foram feitas 12 medições de dureza igualmente espaçadas entre si, respeitando os limites de borda para ensaio de dureza (a distância da borda até a primeira medição de dureza deve ser pelo menos 3 vezes o tamanho da diagonal da marca de indentação do durômetro). Essas 12 medidas de dureza permitiram o levantamento de gráficos que revelam a variação da dureza ao longo do raio ou da espessura das amostras.

As medidas de dureza foram realizadas com carga de 300g, pois esta é a menor carga que permitiu que fosse medida a dureza de todo o material em questão, sem que a dureza fosse medida apenas de uma das fases isoladamente.

4. Resultados e discussão

Após a limpeza das peças, foi feita a análise macroscópica das amostras em questão. De modo geral, as amostras que foram ensaiadas sem lubrificação apresentavam uma superfície brilhante se comparado com as amostras que foram ensaiadas com lubrificação. Elas apresentavam também riscos radiais no centro de sua superfície, visíveis especialmente no disco comprimido com 60 tonf. Já as amostras que foram ensaiadas com lubrificação apresentavam uma superfície fosca e relativamente homogênea em sua extensão.

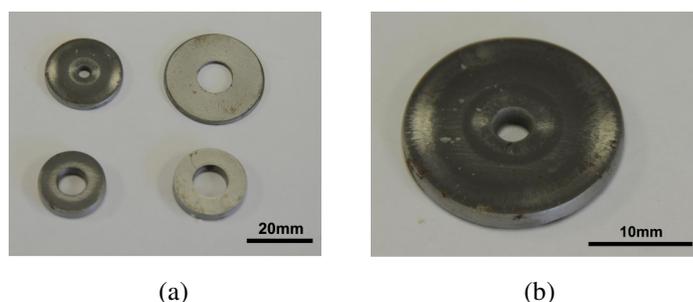


Figura 6: (a) Amostras após compressão em diferentes condições de carga e lubrificação (b) detalhe da amostra 2

A amostra comprimida com 60 tonf e lubrificada com PTFE apresentou uma superfície fosca e homogênea, com a borda do raio externo brilhante. A amostra comprimida com 20 tonf com lubrificação apresentou uma superfície totalmente fosca e não tão homogênea quanto a amostra comprimida com 60 tonf. A amostra comprimida com 60 tonf sem lubrificação apresentou uma superfície brilhante, com diversos anéis radiais concêntricos formados por regiões brilhantes, foscas e riscadas (figura 6b). A amostra comprimida com 20 tonf sem lubrificação apresentou uma superfície brilhante, com a região próxima ao raio interno riscada.

As amostras que foram comprimidas com 60 tonf apresentavam espessura menor que aquelas comprimidas com 20 tonf, como era de se esperar. O diâmetro externo de todas as amostras após a compressão era maior que o diâmetro original. Contudo, em relação ao diâmetro interno das amostras ensaiadas, este era maior que o original nas amostras que foram lubrificadas, e menor que o original nas amostras que foram comprimidas a seco. A tabela 1 apresenta a média e o desvio-padrão dos valores medidos das dimensões dos anéis.

Tabela 1: Média e desvio-padrão das dimensões de cada amostra

	d_{ext} (mm)	d_{int} (mm)	e (mm)
Disco 0	18,06 (s=0,01)	9,01 (s=0,01)	6,14 (s=0,01)
Disco 1	30,76 (s=0,23)	10,63 (s=0,53)	1,84 (s=0,01)
Disco 2	24,38 (s=0,26)	4,31 (s=0,28)	2,67 (s=0,01)
Disco 3	21,39 (s=0,09)	10,25 (s=0,11)	4,25 (s=0,01)
Disco 4	19,72 (s=0,03)	7,95 (s=0,07)	4,59 (s=0,01)

As amostras foram então embutidas, lixadas e polidas. A amostra comprimida com 60 tonf e lubrificada com PTFE apresentou uma secção transversal com a borda externa abaulada e a borda interna côncava. Isto se deve às forças de atrito que agiram contra o sentido de escoamento, mesmo sendo este um caso lubrificado. Neste caso, houve aumento tanto do raio interno como do externo, de modo que o escoamento se deu todo no sentido radial interno→externo. Este foi o caso de menor espessura e maior raio externo dentre as amostras analisadas.

A amostra comprimida com 60 tonf sem lubrificação apresentou uma secção transversal com a borda interna e externa abauladas. Neste caso, houve aumento do raio externo e diminuição do raio interno. A borda interna estava mais abaulada que a borda externa, o que indica que houve maior escoamento na direção do raio interno que na direção do raio externo do anel.

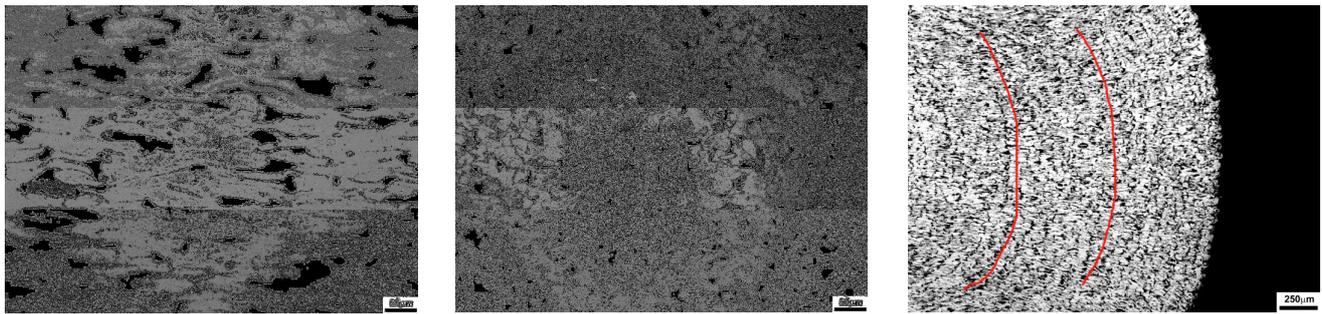
A amostra comprimida com 20 tonf e lubrificada com PTFE apresentou uma secção transversal com bordas interna e externa praticamente planas. Um mínimo desvio de planicidade pode ser observado na borda do raio interno, que se apresenta ligeiramente côncava devido à ação das forças de atrito que agiram entre a ferramenta e a peça contra a direção do escoamento. Neste caso, houve um pequeno aumento tanto do raio interno como do raio externo.

A amostra comprimida com 20 tonf sem lubrificação apresentou uma secção transversal com a borda interna e externa abauladas, sendo que o abaulamento da borda interna era muito pronunciado. Houve aumento do raio externo e diminuição do raio interno. Nesta amostra (figura 5) pode-se ver claramente as regiões que sofreram maior e menor deformação, semelhante ao apresentado na figura 3.

Após ataque químico com Nital 3%, as amostras foram analisadas com a ajuda de um microscópio óptico da marca Olympus, modelo BX60MF, com lentes com aumento de 50x, 100x, 200x, 500x e 1000x.

Os anéis testados são feitos de aço-carbono 1020. Por se tratar de um aço pro-eutetóide que não sofreu nenhum tratamento térmico especial, o material é composto microestruturalmente de grãos de ferrita e de perlita. A ferrita é uma fase CCC composta basicamente de átomos de ferro, com alguns átomos de carbono alojados na estrutura cristalina como impurezas intersticiais. Esta é uma fase macia, que pode ser magnética em temperaturas abaixo de 768°C e com uma densidade de 7,88g/cm³. Na figura 7, a ferrita aparece como a fase mais clara.

Os grãos mais escuros que aparecem na figura 7 são de perlita. A perlita é um microconstituente que surge quando do resfriamento da austenita. É uma estrutura lamelar composta de camadas de ferrita e cementita. A cementita, ou carbeto de ferro (Fe_3C), é muito dura e frágil, e sua presença em alguns aços aumenta consideravelmente a resistência destes. Mecanicamente, a perlita apresenta propriedades intermediárias entre a ferrita e a cementita.



(a) (b) (c)

Figura 7: Micrografia da secção transversal das amostras (a) grão muito deformados (b) grãos pouco deformados (c) linhas de escoamento

A figura 7a mostra os grãos que sofreram grandes deformações, uma vez que eles se encontram bastante alongados. A figura 7b mostra grãos com pouca deformação. Na figura 7c pode-se notar as linhas que indicam o escoamento do material e a influência do atrito, de modo que as linhas de escoamento são curvas.

Os valores médios de dureza das amostras estão organizados na seguinte tabela, juntamente com seu intervalo de confiança com confiabilidade de 95% e o aumento percentual em relação à amostra não-deformada:

Tabela 2: Dureza e aumento percentual da dureza das amostras analisadas, em relação à amostra sem compressão

	Amostra 0	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
Dureza superficial	174,0	222,3	219,6	197,9	186,6
IC 95%	167,8 - 180,2	216,4 - 228,1	206,9 - 232,2	194,2 - 201,6	178,1 - 195,1
Aumento (%)	---	28%	26%	14%	7%
Dureza radial	182,8	254,8	246,9	223,6	225,8
	178,0 - 187,5	250,2 - 259,3	236,0 - 257,9	221,5 - 225,6	217,9 - 233,6
	---	39%	35%	22%	23%
Dureza espessura	179,1	259,0	246,2	225,5	213,9
	174,7 - 183,6	253,6 - 264,3	232,5 - 260,0	220,8 - 230,3	203,8 - 224,1
	---	45%	37%	26%	19%
Dureza média	178,6	245,3	237,6	215,7	208,8
	175,5 - 181,8	239,1 - 251,5	229,4 - 245,8	211,0 - 220,3	201,4 - 216,1
	---	37%	33%	21%	17%

De maneira geral, pode-se perceber que em relação à amostra não-deformada, a dureza média aumenta com a deformação. Este efeito já era esperado devido ao encruamento, conforme discutido na revisão bibliográfica. As amostras que foram comprimidas com carga maior tiveram maior aumento de sua dureza média, já que experimentaram maiores deformações. Tomando separadamente as amostras que foram comprimidas com a mesma carga, verifica-se que aquelas que foram lubrificadas tiveram maior aumento de sua dureza média, provavelmente porque elas sofreram menores restrições provenientes da força de atrito, e assim puderam se deformar mais.

Esta análise pode ser estendida às durezas superficial e ao longo da espessura. Porém, se tomarmos a dureza ao longo do raio, temos que esta dureza é ligeiramente maior na amostra 4, que foi comprimida com 20 tonf sem lubrificação, que na amostra 3, que foi comprimida com a mesma carga, porém lubrificada. Neste caso, temos que a deformação não é muito severa ao longo de todo o material, uma vez que a carga não é demasiadamente alta. Uma hipótese a ser considerada é que a amostra que foi lubrificada sofreu uma deformação mais homogênea, enquanto a que foi comprimida a seco teve suas deformações mais concentradas nas áreas não-hachuradas da figura 3. Além disso, a precisão não muito alta da medição de dureza Vickers também pode ter contribuído para este resultado.

Podemos também comparar as durezas entre si através dos gráficos das figuras 8, 9 e 10.

As amostras que foram lubrificadas apresentam valores de dureza superficial bem comportados. Todos os valores de dureza da amostra 3 (comprimida com 20 tonf) estão acima dos valores de dureza da amostra sem compressão, e os valores da amostra 1, que foi comprimida com 60 tonf, apresentam-se também acima dos valores da amostra comprimida com 20 tonf. Este fato era esperado pois o encruamento é tanto maior quanto maior for a carga de deformação, para as mesmas condições de lubrificação. Os valores de dureza neste caso se mantêm relativamente constantes (salvo alguns picos localizados), uma vez que a lubrificação favorece uma distribuição das deformações aproximadamente homogênea.

Já quando tomamos a amostra que foi comprimida com 20 tonf sem lubrificação (amostra 4), temos que alguns valores de sua dureza superficial estão abaixo dos valores de dureza da amostra sem compressão. Contudo,

considerando que este desvio é de menos de 5% e tendo em vista a precisão não muito grande do ensaio de dureza Vickers, podemos desconsiderar este fato. Os valores de dureza para a amostra 4 apresentam um pico nas extremidades, que correspondem às bordas do corpo de prova. Neste caso, as bordas provavelmente são formadas por uma porção do material que sofreu deformação, e que está fora da área hachurada da figura 3. Como o material deformado tem sua dureza aumentada, esta é a razão para os picos de dureza nas extremidades. Este fato não foi observado nas amostras lubrificadas, pois neste caso as forças de atrito na interface têm magnitude muito menor que no caso sem lubrificação, e a região não-deformada mostrada na figura 3 é muito pequena e não se aplica neste caso.

As amostras que foram comprimidas sem lubrificação apresentam no seu centro dureza superficial praticamente igual à dureza superficial da amostra sem compressão. Isso provavelmente se deve ao fato de esta ser a região próxima da linha neutra das amostras, na qual o material não apresenta velocidade relativa em relação à ferramenta. Isso faz com que não haja deformação nesta região, e conseqüentemente, não haja elevação de dureza nas amostras.

A amostra 2, comprimida com 60 tonf sem lubrificação, apresenta duas regiões de dureza superficial muito altas próximo às bordas, e uma região central com o mesmo nível de dureza superficial que a amostra mão-comprimida. Isto se deve ao mesmo motivo verificado com a amostra 4, isto é, as bordas são formadas por uma porção do material que sofreu deformação, e este é, devido ao encruamento, mais duro que a porção menos deformada do material. Mesmo apresentando os picos de dureza superficial nas extremidades, a dureza da amostra 2 não ultrapassa, em nenhum momento, a dureza da amostra 1, comprimida com a mesma carga de 60 tonf, porém lubrificada.

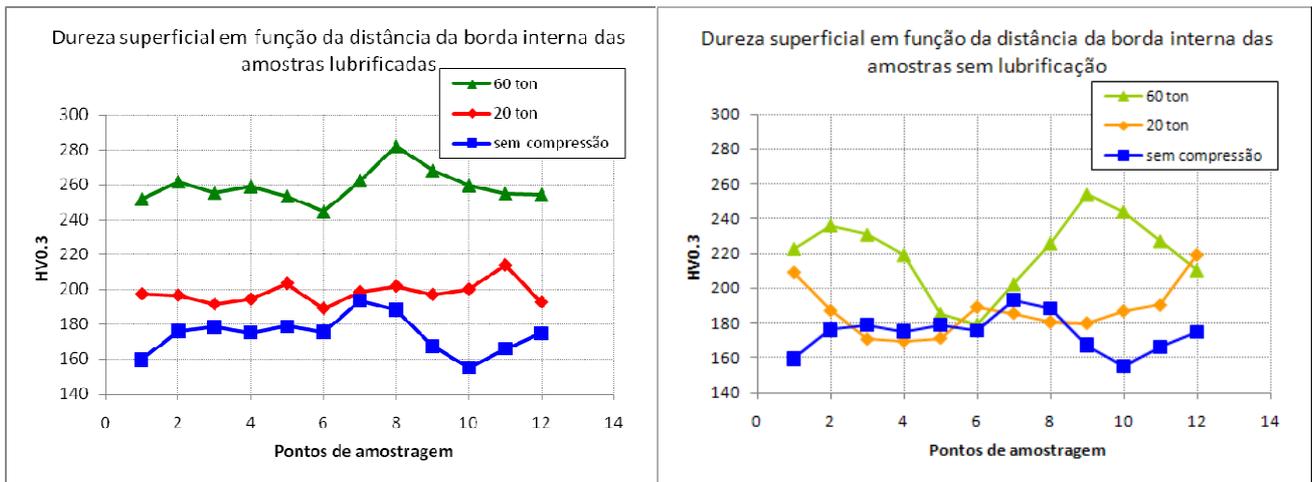


Figura 8: Gráfico de dureza superficial das amostras lubrificadas e não-lubrificadas

Da mesma forma que para a dureza superficial, os valores de dureza radial neste caso se mantêm bastante relativamente constantes, especialmente para o caso da compressão com 20 tonf, uma vez que a lubrificação favorece uma distribuição de deformações aproximadamente homogênea.

Para o caso sem lubrificação, percebe-se um aumento de dureza na região central da amostra comprimida com 20 tonf, e um pico saliente de dureza na amostra comprimida com 60 tonf. Em ambos os casos, o valor de dureza atingido é maior que no caso da compressão com mesma carga com lubrificação. A região central de uma amostra comprimida com alto atrito, localizada entre os cones formados pelas áreas menos deformadas, é uma região que apresenta grandes deformações, explicando assim, devido ao encruamento, esses valores mais altos de dureza radial.

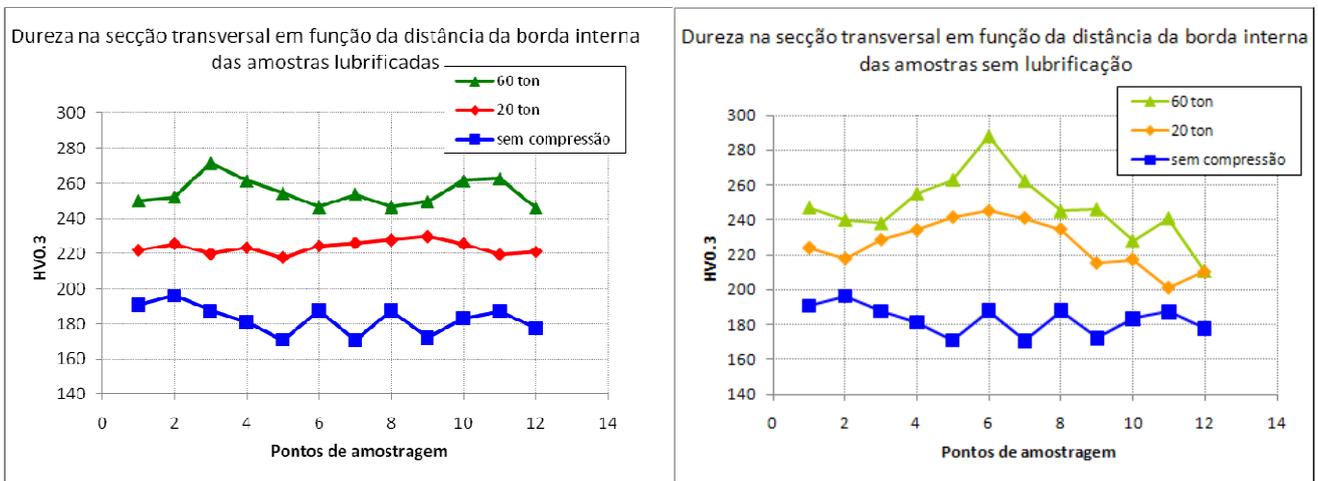


Figura 9: Gráfico de dureza radial das amostras lubrificadas e não-lubrificadas

As amostras que foram lubrificadas apresentam valores de dureza ao longo da espessura relativamente constantes, salvo por um ou outro valor maior provavelmente decorrente da medição de dureza numa região com concentração localizada de uma fase mais dura (no caso, perlita).

No caso sem lubrificação, todos os valores de dureza na espessura da amostra 4 (comprimida com 20 tonf) estão acima dos valores de dureza da amostra sem compressão, e os valores da amostra 2, que foi comprimida com 60 tonf, apresentam-se também acima dos valores da amostra comprimida com 20 tonf. Percebem-se picos de dureza na região central das duas amostras comprimidas sem lubrificação. Em ambos os casos, o valor de dureza atingido é maior que no caso da compressão com mesma carga com lubrificação.

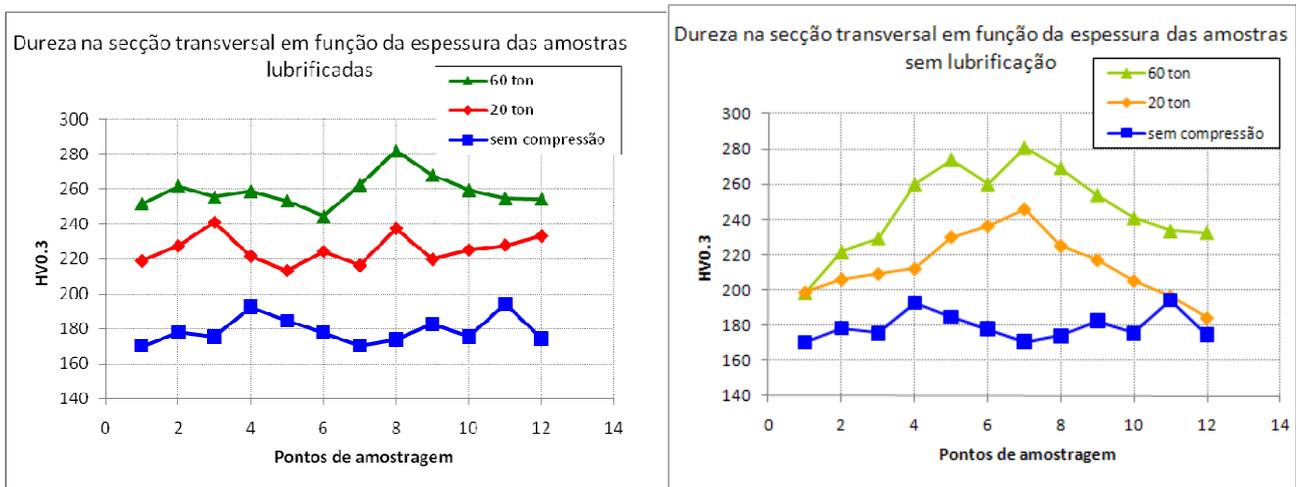


Figura 10: Gráfico de dureza ao longo da espessura das amostras lubrificadas e não-lubrificadas

Pode-se também analisar a percentagem de aumento da dureza, tanto nas bordas como na porção central, em relação à amostra que não sofreu deformação. Para tanto, os 6 pontos internos da amostras foram considerados como o “centro”, enquanto os três pontos mais próximos de cada uma das bordas foram considerados como “centro” (6 pontos).

Tabela 3: Dureza e seu aumento percentual no centro e na borda das amostras, em relação à amostra sem compressão

	Amostra 0	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
Dureza superficial centro	179,7	219,2	210,8	197,3	179,3
Aumento percentual	---	+22%	+17%	+10%	0%
IC95%	172,2 – 187,3	215,1 – 223,3	188,5 – 233,1	193,1 – 201,4	173,1 – 185,6
Dureza radial centro	178,4	252,1	259,9	224,9	235,1
Aumento percentual	---	+41%	+46%	+26%	+32%
IC95%	171,8 – 185,1	247,5 – 256,8	247,2 – 272,5	221,5 – 228,2	226,6 – 243,7
Dureza espessura centro	180,3	261,6	266,4	222,1	227,9
Aumento percentual	---	+45%	+48%	+23%	+26%
IC95%	173,9 – 186,6	251,2 – 271,9	258,2 – 274,5	215,4 – 228,9	217,9 – 237,8
Dureza superficial borda	168,3	225,3	228,4	198,6	194
Aumento percentual	---	(+34%)	(+36%)	(+18%)	(+15%)
IC95%	160,6 – 176,1	214,3 – 236,2	219,1 – 237,7	191,9 – 205,0	179,9 – 208,0
Dureza radial borda	187,1	257,4	234	222,2	216,4
Aumento percentual	---	(+38%)	(+25%)	(+19%)	(+16%)
IC95%	182,0 – 192,1	249,8 – 265,1	223,5 – 244,5	220,0 – 224,4	208,5 – 224,2
Dureza espessura borda	178	256,3	226,1	228,9	200
Aumento percentual	---	(+44%)	(+27%)	(+29%)	(+12%)
IC95%	171,2 – 184,7	253,5 – 259,2	214,1 – 238,0	223,0 – 234,9	192,7 – 207,3

A dureza radial e ao longo da espessura no centro das amostras aumenta mais no caso sem lubrificação em relação ao caso lubrificado. A dureza superficial no centro aumenta mais no caso lubrificado. Contudo, se considerarmos a compressão com a mesma carga, esta diferença no aumento das durezas no caso lubrificado e sem lubrificação é pequena.

A dureza radial e ao longo da espessura nas bordas das amostras aumenta mais no caso lubrificado que no caso não-lubrificado, ao contrário do verificado com estas durezas no centro das amostras. A diferença das elevações da dureza, para uma mesma carga, é razoavelmente alta neste caso. A dureza de superfície nas bordas, para a mesma carga de compressão, é praticamente igual nos casos lubrificadas e sem lubrificação.

5. Conclusões

Foi observada uma correlação entre a microestrutura das amostras analisadas e a dureza medida, de modo que nas regiões com grãos mais deformados a dureza era maior.

A lubrificação feita com PTFE realmente é eficiente, reduzindo o coeficiente de atrito e permitindo deformações maiores e mais homogêneas distribuídas em toda a extensão do material (sabidas através dos testes de dureza e da análise microscópica), para uma mesma carga aplicada.

O aumento da dureza média, para uma mesma carga de compressão, é ligeiramente maior para o caso lubrificado, porém a elevação da dureza é bem mais uniforme para o caso lubrificado que para o caso sem lubrificação. Nas amostras que foram comprimidas sem lubrificação, verifica-se um pico de maior dureza no centro da seção transversal das amostras, enquanto que o aumento da dureza nas bordas é bem menor.

A dureza superficial, para uma determinada carga, aumenta quase na mesma proporção para o caso lubrificado e não-lubrificado, exceto pela dureza superficial no centro da amostra 4, comprimida com 20 tonf e não-lubrificada, que não apresentou alterações significativas comparativamente com a amostra sem compressão. Na superfície, a dureza das amostras não-lubrificadas aumentou nas bordas, mas permaneceu praticamente inalterada no centro, devido à localização da linha neutra nesta região.

6. Referências

- Altan, Taylan; Oh, Soo-Ik; Gegel, Harold L. Conformação de metais: fundamentos e aplicações. EESC/USP, 1999.
- Bhushan, Bharat. Introduction to tribology. John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- Bowden, F. P.; Tabor, D. The friction and lubrication of solids. Clarendon Press, 1950.
- Callister Jr, William D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Livros Técnicos e Científicos, 2002.
- Dieter, George E. Mechanical metallurgy. Mc Graw-Hill Book Company, 1988.
- Hutchings, I. M. Friction and wear of engineering materials. Edward Arnold, 1992.
- Male, A. T., Cockcroft, M.G. A method for the determination of the coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation. Journal of the Institute of Metals, 1964.
- Rabinowicz, E. Friction and wear of materials. Wiley, 1995.
- Schey, John A. Tribology in metalworking friction, lubrication, and wear. American Society for Metals, 1983.
- Tan, Xincal. Comparisons of friction models in bulk metal forming. Tribology International, 2002.

7. Direitos autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no trabalho.

STUDY OF DEFORMATION LOAD AND FRICTION COEFFICIENT ON THE PROPERTIES OF 1020 CARBON STEEL

Priscila Porr

Laboratório de Fenômenos de Superfície

porrpri@ig.com.br

Amilton Sinatora

Laboratório de Fenômenos de Superfície

sinatora@usp.br

Abstract. The present work aims to study the properties of 1020 carbon steel specimens after deformation, based on the ring compression test. Ring compression tests are held for the acquisition of the friction factor during metalworking processes. The tests will be held with ring specimens of the geometric ratio 6:3:2, which will be deformed by a hydraulic press. Applied loads will be of 20 and 60 tonf, without lubrication and lubricated with PTFE. Based on microstructural and hardness variation, the influence of applied load and of friction coefficient will be evaluated on this material forming process.

Keywords. *ring compression test, friction, lubrication, deformation load.*