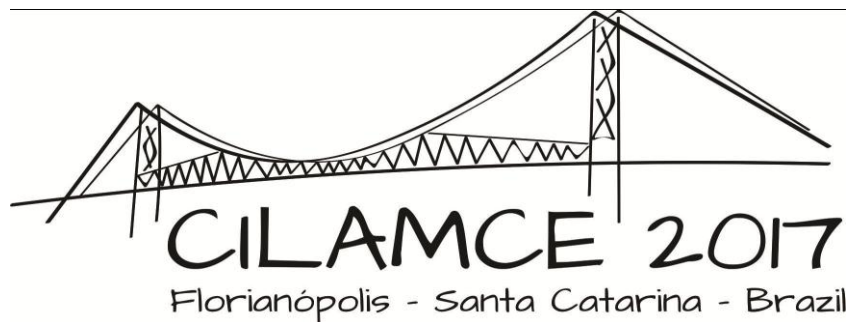




CORRELAÇÃO DE COEFICIENTES DE ATRITO PELO TESTE DO ANEL E GERADOS ATRAVÉS DO SOFTWARE ABAQUS

Ernane Vinicius Silva

ernanevinicius@gmail.com

Leandro Willian Mendonça Cruz

leandrowmc@outlook.com

Norberto Martins

norbertoengmec@gmail.com

Alysson Lucas Viera

alysson@pucminas.br

Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior

paamjr@gmail.com

Gilmar Cordeiro da Silva

gilmarcord@gmail.com

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Av. Dom José Gaspar, 500 - Coração Eucarístico - Belo Horizonte - CEP: 30535-901 - Tel.: (31)3319-4444 – Minas Gerais - Brasil

Resumo. As tecnologias de simulação computacional fornecem à indústria ferramentas que agilizam e minimizam os gastos para confecção de novos produtos, permitindo que os primeiros protótipos sejam fabricados com maior assertividade. Para a simulação de processos de conformação mecânica é necessário fornecer aos softwares o fator de atrito entre o material e a ferramenta. Nem sempre o valor do fator de atrito obtido por ensaio empírico, como o teste do anel, ou valor tabelado na literatura resulta nas simulações um comportamento fiel ao observado experimentalmente. Para esta pesquisa foi utilizado a simulação computacional através do software Abaqus e resultados de testes experimentais. A simulação do teste do anel foi parametrizada para o material Cobre UNS-C11000 em condições distintas de atrito, enquanto os outros parâmetros de processo foram fixados e inalterados. Enfim, o objetivo foi combinar, pela semelhança, as geometrias finais reais e

CILAMCE 2017

XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering
P.O. Faria, R.H. Lopez, L.F.F. Miguel, W.J.S. Gomes, M. Noronha (Editores), ABMEC, Florianópolis, SC, Brazil, November 5-8, 2017.

simuladas para conflitar seus respectivos valores de atrito e averiguar possível correlação entre os coeficientes obtidos pelo teste do anel desenvolvido por Male e Cockcroft e o que deve ser utilizado na simulação.

Palavras-chave: *Simulação computacional; Fator de atrito; Teste do anel; Conformação mecânica; Abaqus.*

1 INTRODUÇÃO

As tecnologias de simulação computacional fornecem à indústria ferramentas que agilizam e minimizam a despesa de fazer novos produtos, permitindo que os primeiros protótipos sejam fabricados com maior assertividade. Nos processos de conformação mecânica contínua ou incremental, o atrito é um fator importante a se considerar por razões técnicas e econômicas, onde no processo contínuo há influência principalmente nas propriedades do produto final e no incremental há um consumo de energia adicional, custos associados aos eventuais defeitos nas peças conformadas e também devido ao desgaste das ferramentas.

Para a simulação de processos de conformação mecânica, é necessário fornecer ao software o fator de atrito entre o material e a ferramenta, sendo assim o objetivo da pesquisa foi de combinar, por similaridade, as geometrias finais reais e simuladas para enfrentar seus respectivos valores de atrito e investigar uma possível correlação entre os coeficientes obtidos pelo teste de anel desenvolvido por Male e Cockcroft (1965) e o que deveria ser utilizado na simulação atrito em processos de conformação.

Nos estágios iniciais, esses mapas eram considerados apenas dependentes das dimensões da peça. Estudos posteriores demonstraram que esses mapas de fricção podem depender também da temperatura e da taxa de deformação, sendo o material de peça, outro fator importante a ter em conta.

2 ATRITO EM PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO

O atrito na conformação mecânica apresenta algumas diferenças do atrito na maioria dos sistemas mecânicos onde há movimento relativo das superfícies envolvidas. Esses outros casos são caracterizado por baixas pressões de contato, temperaturas baixas a moderadas e com boa lubrificação para minimizar o contato entre os componentes, como afirmou Altan (2004) e Groover (2010). Nos processos de conformação mecânica, as condições operacionais são diferentes das descritas acima: contato de alta pressão ao longo da interface ferramenta-peça, a fim de deformar a peça plasticamente e muitas vezes atingindo altas temperaturas, especialmente em processos de conformação a quentes. Além disso, as pressões de contato não permanecem constantes, mas elas aumentam durante o processo. Essas condições operacionais normalmente envolvem coeficientes de atrito elevados, mesmo quando o lubrificante é usado. Embora, em processos de conformação como a laminação, o atrito é um fenômeno necessário para o desenvolvimento correto do processo.

Na maioria dos casos o atrito é um fator a se minimizar pois o aumento das forças necessárias para desenvolver o processo de conformação mecânica causa a desaceleração do fluxo de metal na peça trabalhada, gerando tensões residuais e às vezes defeitos no produto

final e desgaste nas ferramentas, o que pode levar à perda de precisão dimensional, gerando com isso, a fabricação de peças defeituosas e troca de ferramentas. As ferramentas para conformação mecânica são geralmente caras e este é um ponto chave a se considerar. O desgaste provocado pelo atrito na ferramenta é mais severo em condições de conformação a quente. Se o atrito for alto o suficiente, o fenômeno de adesão ocorre. Na conformação mecânica, o atrito por adesão faz com que duas superfícies em movimento relativo se unam e devido a isso, a tensão de cisalhamento do material pode ser superado, resultando no deslocamento do material na interface por cisalhamento.

3 TESTE DE COMPRESSÃO DE ANEL

Dentre os métodos para medir o coeficiente de atrito, o teste de compressão do anel ganhou ampla aceitação nas últimas duas décadas. Foi originado por Kunogi (1959) e posteriormente aprimorado e apresentado por Male e Cockcroft (1965). Essa técnica utiliza as alterações dimensionais de uma amostra de teste para quantificar o coeficiente de atrito. Quando um anel liso é comprimido entre duas placas planas, um alto atrito resulta em um fluxo interno do material; um baixo atrito resulta em escoamento do material, como esquematicamente mostrado na Figura 1. A sequência do ensaio de compressão do anel é composta por sucessivas deformações na altura dos anéis para obter as curvas de calibração do referente atrito, visto que a geometria do anel deve obedecer às proporcionalidades de 6:3:2, que se referem, respectivamente, ao diâmetro externo, diâmetro interno e altura.

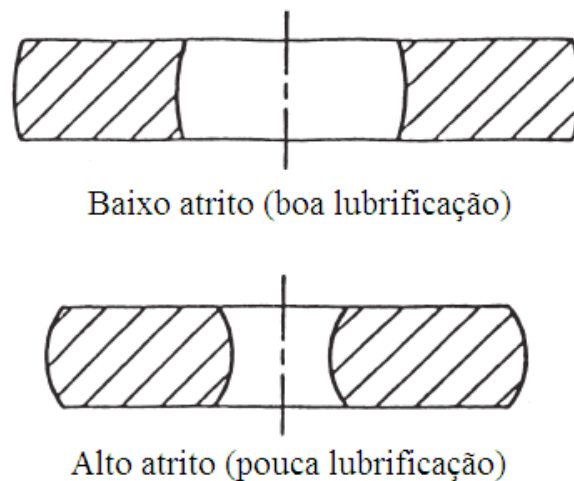


Figura 1. Efeito do atrito sobre o fluxo do metal durante o teste compressão do anel. Sofuoglu (1999)

Para um determinado percentual de redução da altura do anel durante o teste de compressão, haverá uma variação do diâmetro interno da amostra; através dessa medição, é possível, indiretamente, conhecer o fator de atrito na interface peça/matriz. Se a amostra tem a dimensão do diâmetro aumentada durante a deformação, o atrito é baixo; se o diâmetro interno da amostra diminui durante a deformação, o atrito é alto. Usando essa relação, os coeficientes de atrito podem ser plotados em curvas específicas conforme Sofuoglu (1999). As curvas de calibração de atrito foram geradas por Male e Cockcroft (1965), e foram plotadas com o percentual de redução do diâmetro interno do corpo de prova em função do

percentual de redução em altura, para diferentes graus de coeficiente de atrito em uma mesma temperatura, como mostrado na Figura 2.

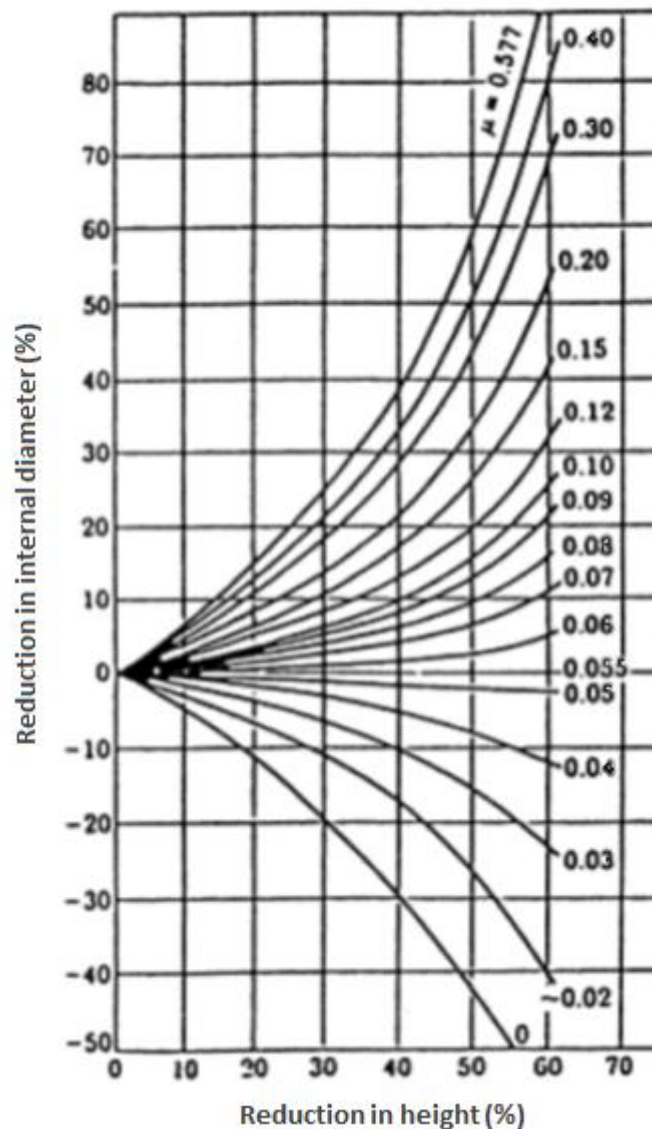


Figura 2. Curvas de calibração para a determinação de atrito em termos de μ . Male e Cockcroft (1965)

Por outro lado, a simulação matemática pode ser usada para avaliar a deformação do material, a tensão distribuição de tensões, a taxa de deformação, a exigência de força e a probabilidade de qualquer defeito no material segundo S. Kobayashi(1989). Assim, o uso combinado dos modelos físicos experimentais e simulações numéricas permitem um simples e eficaz meio para estudar o mecanismo de fricção em condições de grande deformação plástica conforme Robinson (2004).

4 MODELAGEM COMPUTACIONAL COM O SOFTWARE ABAQUS

O software ABAQUS é de caráter bastante geral e de grande versatilidade para aplicações em muitas áreas da engenharia. Ele consiste de vários módulos, dentre os quais os módulos gráficos CAE (pré-processador), Viewer (pós-processador) e os módulos principais

STANDARD e EXPLICIT. Um exemplo esquemático de um módulo de programação pode ser visualizado na Figura 3.

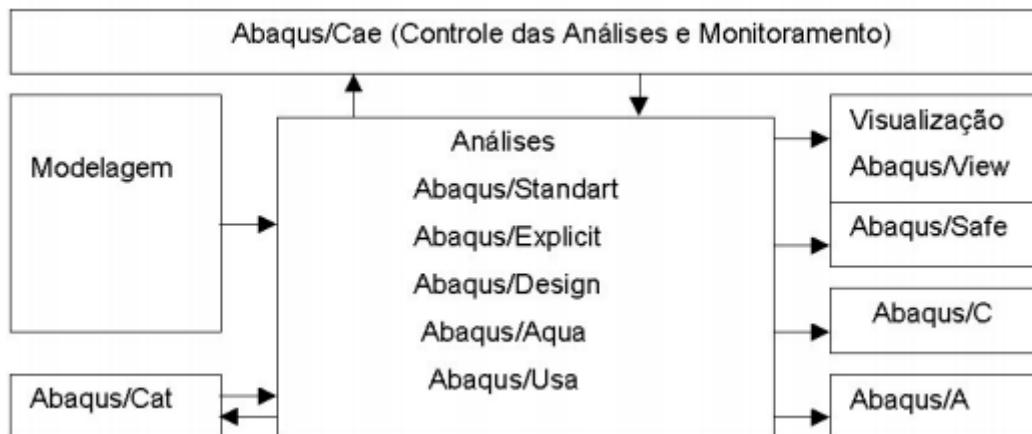


Figura 3. Módulos Gerais do Programa ABAQUS

O pré-processador ABAQUS/CAE consiste de uma interface gráfica que permite ao usuário uma rápida e eficiente definição da geometria do problema, atribuição das propriedades dos diferentes materiais, aplicação dos carregamentos e das condições de contorno do problema, seleção do número de etapas pretendidas na análise e, finalmente, geração da malha de elementos finitos correspondente ao corpo analisado. Um monitoramento da consistência e adequação do modelo assim gerado pode ser feita através de ferramentas especiais do ABAQUS/CAE que permitem verificar vários aspectos relacionados com as partições definidas para a geometria do modelo (módulo PART), propriedades mecânicas dos materiais envolvidos (módulo PROPERTY), agrupamento destas partições (módulo ASSEMBLY) e imposição da sequência de passos de análise (módulo STEP) e de sua natureza – linear ou não linear, definição das condições de contorno e dos carregamentos (módulo LOAD), geração da malha de elementos finitos (módulo MESH) e finalmente obtenção do arquivo de entrada (módulo JOB).

As diversas potencialidades do ABAQUS permitem que problemas de engenharia complexos, envolvendo geometrias complicadas, relações constitutivas não lineares, ocorrência de grandes deformações, carregamentos transientes, interações entre materiais, possam ser modelados numericamente, ainda que o processo de construção de um modelo adequado não seja tarefa simples ao usuário iniciante, justamente por envolver uma quantidade muito grande de parâmetros e opções, decorrentes da própria elevada gama de possíveis problemas que podem ser modelados com o ABAQUS.

5 METODOLOGIA

Foram fabricados copos de prova em forma de anel com o material a ser estudado, Cobre eletrolítico UNS-C11000, em dimensões determinadas pela relação 6:3:2 e ensaiados em uma prensa hidráulica com capacidade de 70 toneladas a uma velocidade padrão constante na temperatura ambiente, instalada no laboratório de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais em Contagem.

Uma condição que foi pré-estabelecida, foi a determinação em deixar bem próximo os valores dos acabamentos superficiais das matrizes de compressão aos das faces dos anéis,

pelo fato das condições das rugosidades superficiais dos pares tribológicos terem grande influência nos coeficientes de atrito.

Também foi objetivo desse trabalho, a padronização de todas as etapas dos ensaios de compressão, a fim de tornar transparente e confiável a proposta e os resultados.

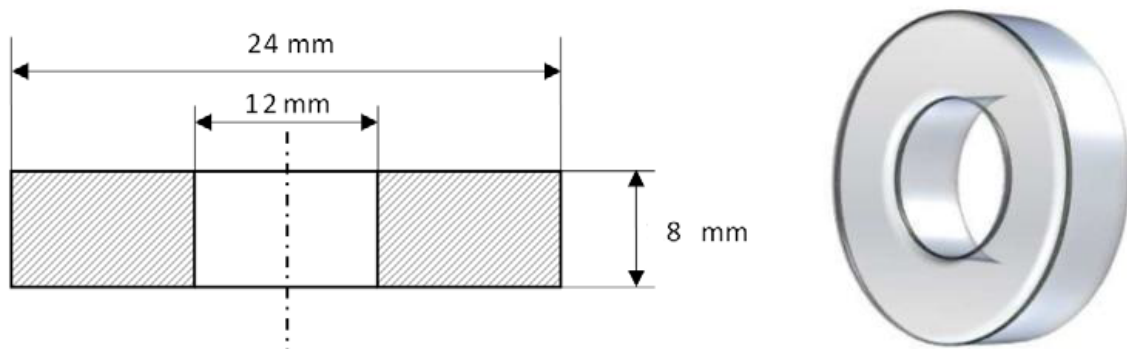


Figura 4. Dimensões dos corpos de prova

Após os ensaios na prensa os corpos de prova deformados foram medidos através de um tridimensional Mitutoyo QM-MEASURE 353. Os valores referentes às variações das deformações dos diâmetros internos externos e da altura foram registrados e estão plotados na Tabela 1.

Tabela 1. Variações das deformações dos diâmetros e da altura

Lubrificação	Origem	T	Ri	R0
Seco	Simulação	5,772	4,868	13,523
	Ensaio	5,815	4,876	13,421
Grafite	Simulação	5,772	5,852	13,795
	Ensaio	5,799	5,850	13,658
Vaselina	Simulação	5,772	5,791	13,773
	Ensaio	5,799	5,791	13,706
Graxa	Simulação	5,772	5,339	13,631
	Ensaio	5,780	5,337	13,582

A verificação do coeficiente de atrito é baseada nas curvas de Betzalel Avitzur, e pelas Equações (1), (2) e (3) de Alan Male e Vicent de Pierre (1972)

$$R_n = R_0 * \sqrt{\frac{\frac{R_i + \Delta R_i}{R_0 + \Delta R_0}}{\frac{R_0 + \Delta R_i}{R_i + \Delta R_0}}} \quad (1)$$

$$m = \frac{1}{2\frac{R_0}{T} * \left(1 + \frac{R_i}{R_0} - 2\frac{R_n}{R_0}\right)} * -\ln \left[\left(\frac{R_i}{R_0}\right)^2 * \frac{\left(\frac{R_n}{R_0}\right)^2 + \sqrt{3 + \left(\frac{R_n}{R_0}\right)^4}}{\left(\frac{R_n}{R_0}\right)^2 + \sqrt{3 * \left(\frac{R_i}{R_0}\right)^4 + \left(\frac{R_n}{R_0}\right)^4}} \right] \quad (2)$$

$$\mu = \frac{m}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

R_n = Raio Neutro

R_0 = Raio Externo após ensaio

R_i = Raio interno após ensaio

ΔR_i = Diferença entre raio interno antes e após o ensaio

ΔR_0 = Diferença entre raio externo antes e após o ensaio

T = Altura após ensaio

m = Fator de atrito

μ = Coeficiente de atrito

A simulação foi realizada através do software ABAQUS em um formato axissimétrico devido ao formato do corpo de prova, que por ser cilíndrico e simétrico, proporcionou uma simulação mais rápida e menos complexa para o software. As matrizes, superior e inferior, utilizadas nas simulações do processo de compressão, e esquematizadas na Figura 5, foram consideradas elementos rígidos, pois não foram consideradas objetos de estudos no nosso processo.

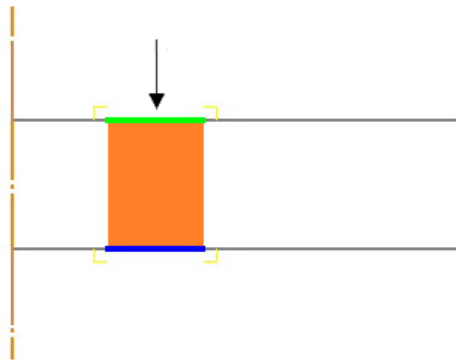


Figura 5. Esquema axissimétrico utilizado na simulação computacional

Nas Figuras 6 e 7 estão as representações das simulações assimétricas em 180° e 360° com respectivas máximas tensões de Von Mises alcançadas durante o processo de compressão dos anéis.

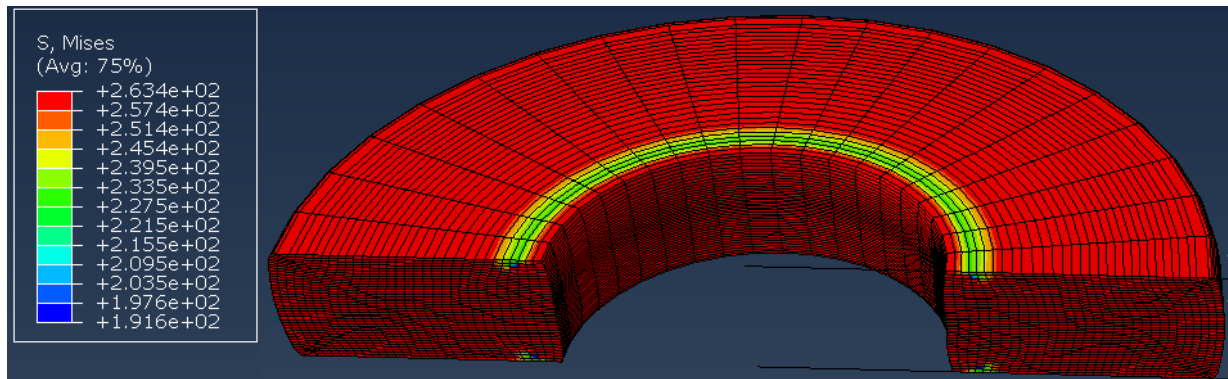


Figura 6. Simulação axissimétrica rotacionada em 180°

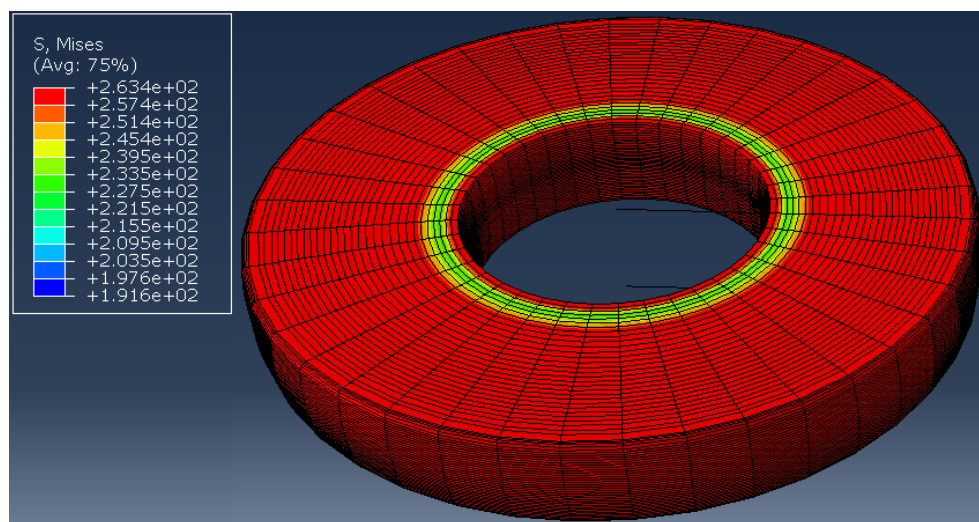


Figura 7. Esquema axissimétrico rotacionado em 360°

Na Figura 8 está a visualização dos efeitos do atrito no fluxo do anel durante a compressão em simulação. Observa-se que nas simulações realizadas para o estudo, houve um fluxo na direção do diâmetro interno e externo da peça, evidenciando a condição de alto atrito nas superfícies de contato metal/matriz durante a realização do processo.

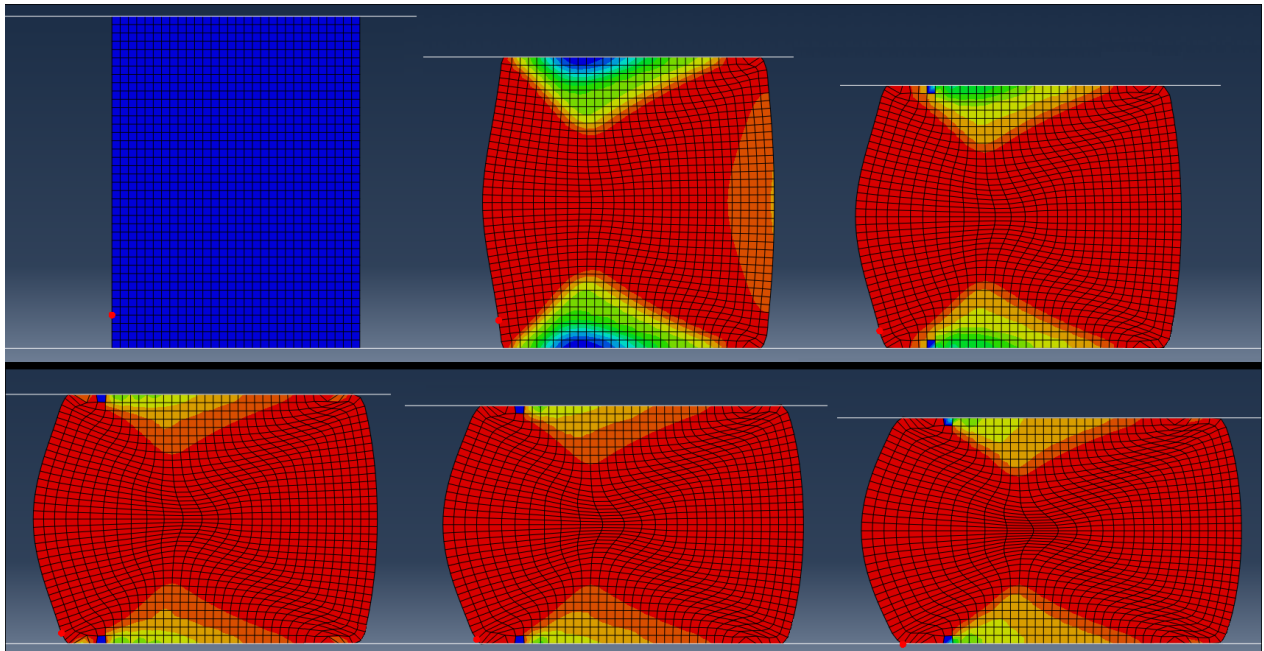


Figura 8. Efeito do atrito sobre o fluxo do metal durante o teste compressão do anel simulado no Abaqus.

As simulações geradas forneceram as dimensões necessárias para a comparação com o ensaio realizado com os corpos de prova. Elas foram agrupadas em relação ao atrito utilizado na simulação e confrontadas com as dimensões relacionadas aos coeficientes de atrito obtidos no ensaio dos corpos de prova.

6 RESULTADOS

Os dados levantados no software Abaqus possibilitaram o levantamento de curvas de calibração onde foi possível comparar o resultado do teste prático com a simulação. As dimensões obtidas levaram a um ponto no levantamento de curvas que determinou um coeficiente de atrito e posteriormente foi conferido pelas equações de Alan Male e Vicent de Pierre (1972).

Tabela 2. Variação do coeficiente de atrito entre simulação e ensaio.

Lubrificação	Origem	μ
Seco	Simulação	0,490
	Ensaio	0,595
Grafite	Simulação	0,119
	Ensaio	0,130
Vaselina	Simulação	0,131
	Ensaio	0,142
Graxa	Simulação	0,254
	Ensaio	0,277

O grupo de dimensões obtidas pelo software, mostrado na Tabela 1, ficou bem próximo ao grupo de dimensões obtido através do ensaio dos corpos de prova. As variações encontradas foram abaixo de 10% e isso demonstrou uma assertividade na metodologia utilizada na simulação já que encontramos em outros processos de conformação, simulações utilizando MEF, uma proximidade em torno de 15 a 18 %.

Em testes executados com corpos de prova sujeitos a lubrificantes, foi observado uma proximidade de menos de 5% entre dimensões obtidas através de testes reais e dimensões obtidas pela simulação.

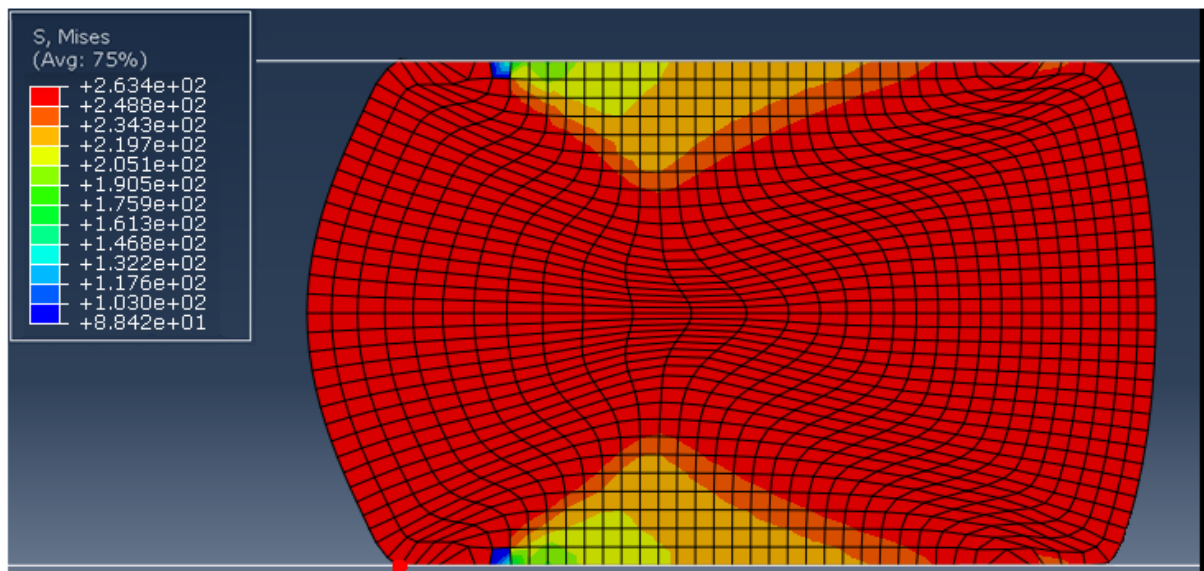


Figura 9. Comportamento final da malha do corpo de prova

7 CONCLUSÃO

Conforme comparação dos resultados simulados com os valores dos testes práticos, encontramos diferenças inferiores a um máximo de 10% entre o valor real das dimensões dos corpos de prova, após ensaio, com os valores encontrados pela simulação no software Abaqus. Isso possibilita que a simulação, da maneira que foi realizada, obtenha resultados significativos e uteis para uma pesquisa em que se é necessário a obtenção do coeficiente de atrito de um determinado material onde há uma dificuldade em encontra-la em literatura ou realiza-la pelo teste do anel desenvolvido por Male.

Através das curvas geradas pelos dados do software Abaqus, conseguimos levantar o coeficiente de atrito do material com uma variação de 10% entre o encontrado nas curvas e o calculado pelas equações de Male e Pierre.

8 AGRADECIMENTOS

Os autores generosamente agradecem o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais – FAPEMIG e da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUCMINAS.

9 REFERENCIAS

Altan, T., Ngaile, G., Shen, G., 2004. *Cold and hot forging: fundamentals and applications*, Vol.1, ASM International, USA.

ASM Handbook. *Friction, Lubrication, and Wear Technology*. Vol. 18, 1992

ASM Handbook. *Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose Materials*. v. 2, 1990.

Askeland, Donald R.; Wright, Wendelin J. *Ciência e engenharia dos materiais*. 2. ed., São Paulo: Cengage Learning, 2008.

Boesch Júnior, P. R., Martins, V., Schaeffer, L., 2011. *Determinação do coeficiente de atrito pelo ensaio de compressão do anel: Uma revisão*. Revista Thema, v. 8, n. 1, pp. 1-11.

De Pierre, V., Gurney, F., Male, A. T., 1972. *Mathematical Calibration Of The Ring Test With Bulge Formation*. Air Force Materials Laboratory, Technical Report AFML-TR-72-37 March 1972

Dieter, G. E. *Metalurgia mecânica*. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981

Groover, M.P., 2010. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*. John Willey & Sons, USA.

Helman, Horácio; Cetlin, Paulo Roberto. *Fundamentos da conformação mecânica dos metais*. 2. Ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2013.

Kunogi, M., 1956. *A New Method of Cold Extrusion*. Journal of the Scientific Research Institute 50, 215–246.

Male, A.T., Cockcroft, M.G., 1965. *A Method for the Determination of the Coefficient of Friction of Metals under Condition of Bulk Plastic Deformation*. Journal of the Institute of Metals 93, 38–46.

Mirlisenna, Giuseppe. *Método dos Elementos Finitos: O que é?* 2016. Disponível em: <<http://www.esss.com.br/blog/2016/01/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acesso em: 04 mar. 2017

Robinson, T.; OU, H.; Armstrong, C.G., (2004). *Study on ring compression test using physical modelling and FE simulation*. Journal of Materials Processing Technology 153–154, 54–59

S. Kobayashi, S.-I. OH, T. Altan, (1989). *Metal Forming and the Finite Element Method*, Oxford University Press.

Sofuoglu, H.; Rasty, J., 1999. *On the measurement of friction coefficient utilizing the ring compression test*. Tribology International 32, 327–335