

INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA NA INVESTIGAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO EM MODELO DE CONTATO LUBRIFICADO ENTRE SUPERFÍCIES RUGOSAS

FLUID-STRUCTURE INTERACTION IN THE INVESTIGATION OF THE FRICTION COEFFICIENT IN LUBRICATED CONTACT MODEL BETWEEN ROUGH SURFACES

Marcus V. S. Ferraz^a, Flávia S. Bastos^a e Sara D. Vecchio^b

^a*Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora,
Campus Universitário, Rua José Lourenço Kelmer, s/n - São Pedro, Juiz de Fora, MG, Brasil,
<http://www.ufjf.br/ufjf>*

^b*Núcleo de Mecânica, Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais, Campus Juiz de Fora, Rua
Bernardo Mascarenhas 1283, Fábrica, Juiz de Fora, MG, Brasil, <http://www.ifesudestemg.edu.br/>*

Palavras-chave: Superfícies Rugosas, Lubrificação, Descrição Lagrangiana-Euleriana Arbitrária, Método dos Elementos Finitos, Abaqus (R).

Resumo. Neste trabalho, para analisar a complexidade das interações entre o fluido e os pares sólidos contactados em sistemas tribológicos no regime misto de lubrificação, a descrição Lagrangiana-Euleriana Arbitrária é utilizada. Através do Método dos Elementos Finitos um modelo tridimensional é gerado no Abaqus (R), a fim de identificar as componentes tangenciais e normais das forças resistivas e os coeficientes de atrito decorrentes do deslizamento entre uma superfície texturizada e lubrificada e um plano rígido, cujos perfis de rugosidade são construídos a partir de informações da rugosidade média quadrática de superfícies dentárias. São avaliados também a sensibilidade de alguns parâmetros do lubrificante a fim de identificar como os mesmos afetam o comportamento mecânico na interface de contato, em especial, o coeficiente de atrito. A metodologia aqui proposta emerge como uma alternativa eficaz no campo da Tribologia, na predição de variáveis pertinentes a um fenômeno ainda pouco compreendido.

Keywords: Rough Surfaces, Lubrication, Arbitrary Lagrangian-Eulerian Description, Finite Element Method, Abaqus (R).

Abstract. In this paper, to analyze the complexity of the interactions between the fluid and the solid pairs contacted in tribological systems in the mixed lubrication regime, the Lagrangian-Eulerian Arbitrary description is used. Through the Finite Element Method, a three-dimensional model is generated in Abaqus (R) in order to identify the tangential and normal components of the resistive forces and the coefficients of friction resulting from the slip between a textured and lubricated surface and a rigid plane, whose roughness profiles are constructed from information on the quadratic roughness of dental surfaces. The sensitivity of some lubricant parameters is also evaluated in order to identify how they affect the mechanical behavior at the contact interface, especially the coefficient of friction. The methodology proposed here emerges as an effective alternative in the field of Tribology, in the prediction of the pertinent variables to a phenomenon still little understood.

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais objetivos das diversas pesquisas realizadas no campo da Tribologia consiste em determinar a natureza da dependência das interações superficiais em relação às propriedades dos materiais em contato.

O contato entre duas superfícies planas e paralelas ocorre, inicialmente, apenas em alguns pontos, devido à existência, mesmo em superfícies cuidadosamente preparadas, de rugosidade em escala microscópica. Conforme se aumenta a carga normal, as superfícies tornam-se mais próximas e um número maior de asperezas entra em contato. São estas asperezas as responsáveis por suportar a carga e gerar qualquer força de atrito (Bastos, 2008).

O estudo da relação entre o atrito e os parâmetros de rugosidade é um problema difícil e de interesse tanto industrial como acadêmico e trabalhos experimentais e teóricos têm mostrado que uma película de fluido entre duas superfícies rugosas em movimento relativo impede o contato sólido - sólido e pode proporcionar atrito muito baixo e desgaste desprezível.

O fenômeno que tem por objetivo a minimização e/ou redução dos esforços resistentes ao movimento é definido como lubrificação. Neste sentido, dependendo das condições de operação dos sistemas, é comum caracterizar o contato tribológico de acordo com seu regime de lubrificação (Almqvist, 2006).

Wilson (1978) e Montmitonnet (2001) apresentaram uma classificação dos diferentes regimes de lubrificação no contexto em questão e estabeleceu que cada um destes são determinados por uma razão entre a espessura mínima do filme lubrificante (h) e o desvio padrão efetivo da distribuição de alturas das superfícies em contato (R_q). A curva de Stribeck, oriunda de uma série de experiências com mancais radiais, corresponde a uma forma gráfica de fácil compreensão destes regimes (Bhushan, 2002), entre os quais mencionam-se: hidrodinâmico, elastohidrodinâmico, misto e limítrofe.

O modelo aqui proposto é definido no regime misto de lubrificação, uma vez que o carregamento externo atuante no sistema é suportado concomitantemente pelo campo de pressões hidrodinâmicas geradas pelo fluxo de lubrificante e pelo contato das asperezas.

A motivação inicial deste estudo está relacionada à compreensão da mecânica do contato lubrificado entre superfícies tribológicas. Uma das aplicações deste tema, de grande interesse para a engenharia e ciências dos materiais, está especificamente na área de biomecânica, e diz respeito ao contato oclusal dentário humano, uma vez que a saliva se comporta como um lubrificante funcional no ambiente oral e tem como objetivo principal reduzir os esforços atritantes e o desgaste gerados pelas interações entre as estruturas dentárias.

Considerando este propósito, este artigo se constitui na obtenção de respostas que alimentam os modelos teóricos e numéricos da mecânica do contato, atrito e lubrificação dos materiais. E, dentro deste escopo, a partir de dados encontrados na literatura, obtidos de ensaios de tribometria (ensaios de desgaste) busca-se investigar a influência do mecanismo de lubrificação na redução do atrito entre superfícies rugosas em contato através de simulações computacionais via Método dos Elementos Finitos, utilizando o programa Abaqus[®] e levando em consideração a formulação Lagrangiana-Euleriana Arbitrária.

2 ABORDAGEM LAGRANGIANA-EULERIANA ARBITRÁRIA (ALE) VIA ABAQUS[®]

A estratégia utilizada pelo Abaqus[®] para tratar um problema designado por uma formulação[®] Lagrangiana-Euleriana Arbitrária tem como base o uso de uma técnica definida por *operator-split*. A referida técnica é dividida em dois passos, como se pode observar na Fig. 1, por uma abordagem particionada.

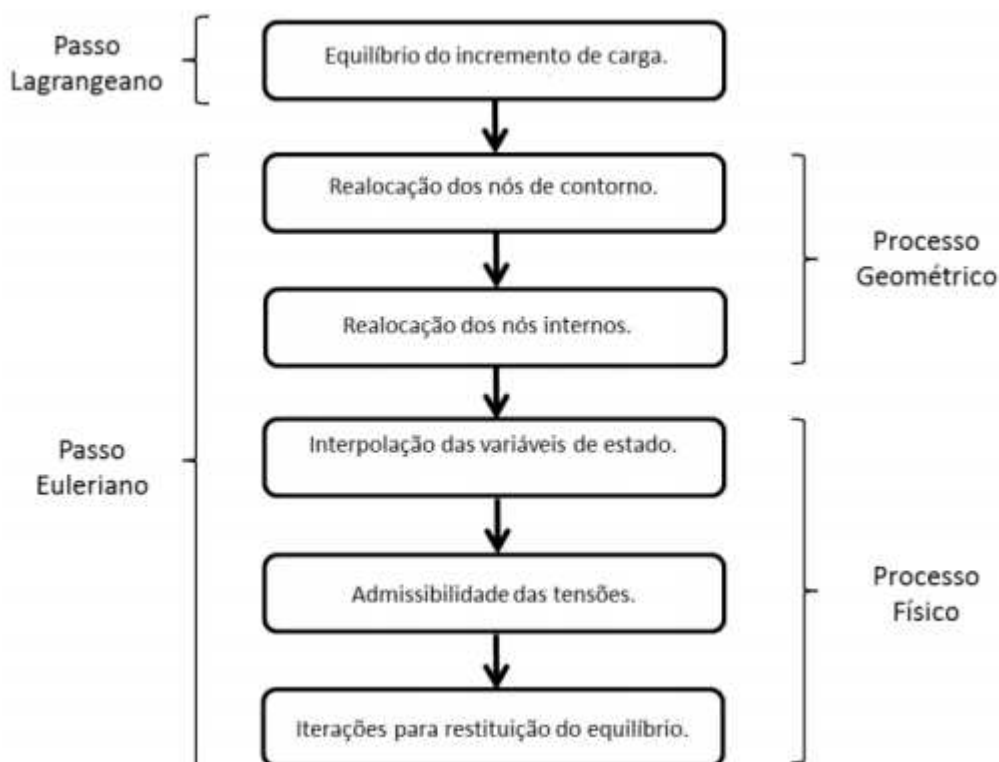


Figura 1: Abordagem ALE via Abaqus (Lohse, 2015).

Primeiramente é executado o passo Lagrangiano, onde a solução em deslocamentos é obtida a partir de uma descrição cinemática Lagrangiana clássica. Dado um passo de carga, e atingindo-se o equilíbrio do corpo, pode-se executar o passo Euleriano. Este, por sua vez é subdividido em dois processos: o geométrico relacionado à movimentação da malha, no qual todos os nós são realocados (primeiramente os nós de contorno e, depois, os nós internos) a fim de minimizar as distorções dos elementos, e o físico, onde as variáveis de estado desde a antiga até a nova malha são atualizadas (Lohse, 2015).

Na configuração inicial do modelo, o fluido está localizado em uma região predefinida. Portanto, dentro de um volume de controle designado por uma parte ou domínio euleriano, são necessárias a criação de partições para atribuição de propriedades de materiais. Assim sendo, com relação ao fluido, uma ferramenta chamada Volume de Fração Euleriano (EVF) é responsável por computar a progressão deste ao longo da malha euleriana (Fig. 2). No início de uma simulação ALE, uma fração da malha Euleriana geralmente é preenchida com material fluido, enquanto o resto contém vazio. Durante a computação, o EVF é rastreado para cada elemento da malha Euleriana.

Para facilitar o cálculo, é recomendado que as partes Lagrangianas estejam dentro do domínio Euleriano (em regiões de vazio) no início da simulação. Além disso, o volume de controle (domínio Euleriano) deve ser grande o suficiente para evitar que o material euleriano flua para fora de tal domínio, pois a simulação pode ser perdida.

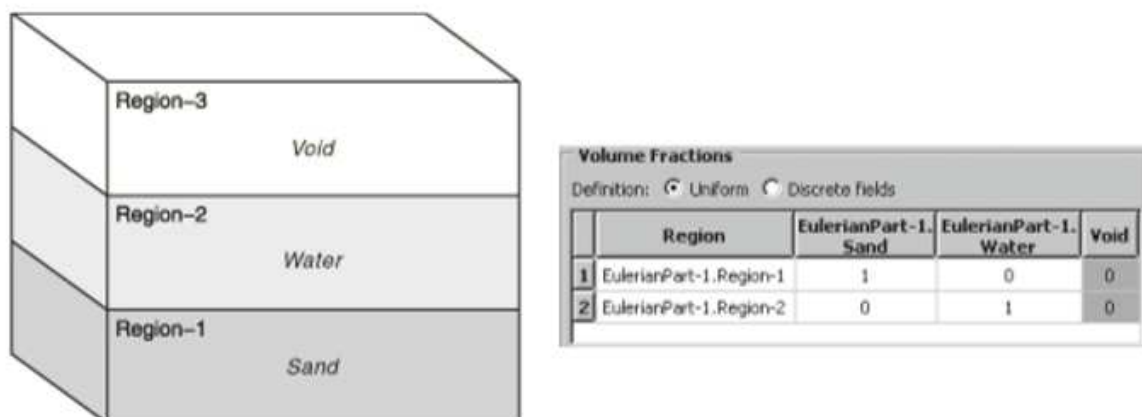


Figura 2: Ferramenta Fração de Volume (Simulia, 2010).

3 MODELO NUMÉRICO DO CONTATO LUBRIFICADO

O modelo desenvolvido para a simulação do contato lubrificado entre microasperezas de uma superfície rugosa e um plano rígido, é fundamentado nos modelos clássicos de contato (e é mecanicamente equivalente ao contato entre duas superfícies rugosas) e leva em conta dados da literatura que definem dentre os diversos parâmetros, a rugosidade quadrática média de superfícies de esmalte dentário e as demais propriedades de materiais, inclusive do fluido. Esse modelo trata especificamente de uma célula da superfície rugosa composta por alguns picos e vales. Para a obtenção de resultados em uma escala maior será necessário um tratamento estatístico que pode ser baseado, por exemplo, em funções de densidade de probabilidade, tal como o proposto por Greenwood e Williamson (1966), o que não foi considerado na metodologia aqui desenvolvida.

O modelo é considerado como quase-bidimensional, adotando-se para z uma espessura relativamente pequena, e é composto por dois pares sólidos (elementos lagrangianos): uma célula representativa da superfície rugosa e um plano rígido, e uma parte euleriana (volume de controle ocupado pelo lubrificante), como pode ser observado na Fig. 4.

A rugosidade média quadrática foi o parâmetro utilizado para a modelagem da geometria das asperezas equivale a aproximadamente $0,27 \mu\text{m}$, compatível com aquelas obtidas em ensaios de tribometria em superfícies de esmalte dentário desenvolvidos por Meireles (2009). O perfil da superfície gerada é apresentado na Fig. 3.



Figura 3: Textura da superfície rugosa

Quanto às condições de contorno para o problema, a Fig. 4 mostra pressões de entrada e saída aplicadas no volume de controle (VC), equivalentes a 110 MPa e 109,99 MPa (Lorentz, 2013), respectivamente, as quais determinam o gradiente de pressões e estabelece o fluxo de lubrificante na área de contato. Através da imposição de velocidades nulas nas direções normais às faces do domínio, é garantido que o fluido não escape para fora do mesmo.

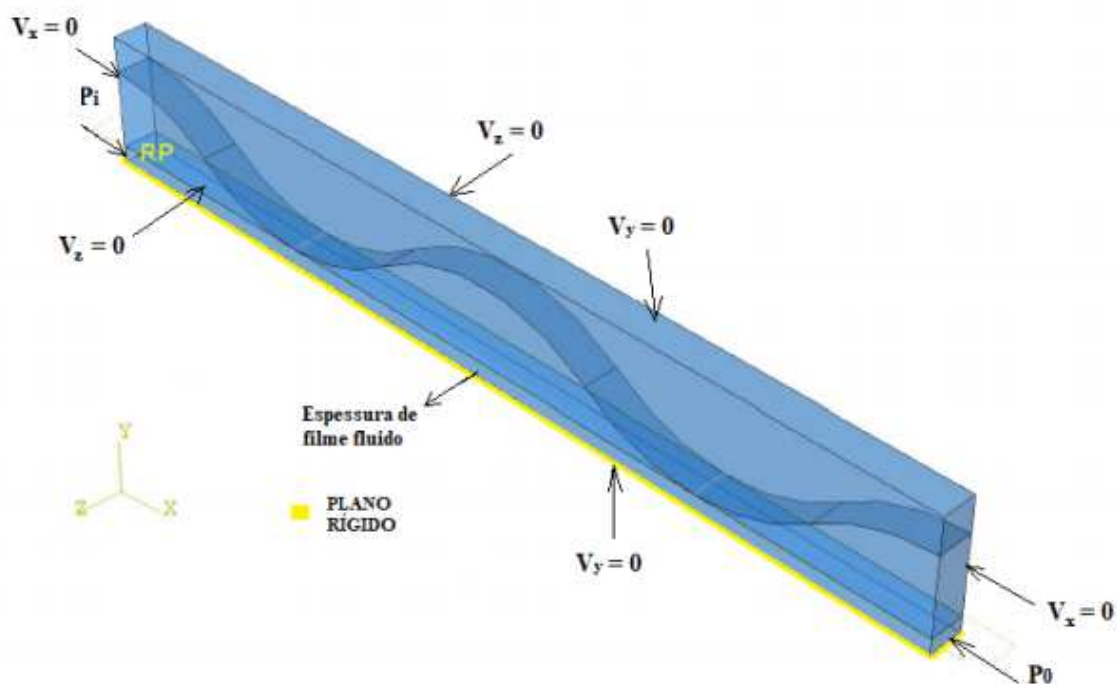


Figura 4: Configuração do modelo: geometria e condições de contorno

Para a resolução do contato superficial, foi utilizada a técnica de contato geral do Abaqus, que utiliza para grandes deslizamentos a formulação nó-à-superfície, atribuindo às superfícies automaticamente a condição de mestre ou escrava. O método utilizado de restrição das penetrações foi o Lagrangeano Aumentado, para o qual o coeficiente de penalidade é calculado iterativamente pelo Abaqus (R). As propriedades para a interação foram estabelecidas de forma a considerar somente penetração normal e livre de atrito em relação às direções tangenciais locais. O modelo de Coulomb foi levado em conta para a obtenção do coeficiente de atrito global na escala da célula representativa da superfície avaliada. O atrito na direção tangencial global da célula de superfície rugosa é fruto das deformações acumuladas e foi calculado como a razão entre a média das forças tangenciais e a média das forças normais a cada passo de tempo.

As propriedades de materiais utilizadas neste modelo estão especificadas na Tabela 1. Vale ressaltar que o lubrificante usado na modelagem é a água (fluido incompressível). A velocidade do som (c_0) é uma das propriedades necessárias exigidas pelo Abaqus[®] para a modelagem de qualquer problema que envolva interação fluido-estrutura e que considere a descrição ALE. No presente modelo, levou-se em consideração, portanto, este parâmetro, responsável por determinar a compressibilidade ou incompressibilidade do fluido e/ou do escoamento através do número de Mach. Para o esmalte dentário, o material foi aqui considerado como um sólido homogêneo de comportamento linear-elástico, uma vez que a situação de uso envolve pressões que não alcançam normalmente o limite plástico. Para o estudo da parafunção da oclusão dentária, onde pressões intensas podem desenvolver plastificação localizada nos picos das asperezas será necessário um modelo elasto-plástico para incorporar o material.

O campo gravitacional não é levado em conta nesta modelagem, e a escolha da posição do plano rígido e da altura de filme fluido foi estratégica para evitar a construção de partições complexas que dificultariam a aplicação de malhas de elementos hexaédricos. A altura do filme lubrificante é de $0,1 \mu m$, de tal forma que o contato entre o plano e a superfície seja efetivado no período de simulação estabelecido para o contato.

| Propriedades do Fluido | Símbolo | Valor |
|----------------------------------|---------|------------------------|
| Densidade | ρ | 1000 kg/m ³ |
| Viscosidade dinâmica | η | 0,001 Pa.s |
| Velocidade do som | c_0 | 1500 m/s |
| Propriedades do esmalte dentário | Símbolo | Valor |
| Densidade | ρ | 2700 kg/m ³ |
| Módulo de Elasticidade | E | 90 GPa |
| Coefficiente de Poisson | ν | 0,4 |

Tabela 1: Propriedades dos Materiais (Simulia, 2010; Bastos, 2008)

Para a malha da parte lagrangiana (superfície rugosa) são adotados elementos C3D8R, hexaédricos, lineares, com 8 nós, 3 graus de liberdade por nó e com integração reduzida (1 ponto de integração), de tamanho global aproximado equivalente a 0,03 μm . Para a parte euleriana (VC) é definida uma malha com elementos EC3D8R, hexaédricos, com tamanho global aproximado de 0,1 μm , lineares, com 8 nós, 3 graus de liberdade por nó e também integração reduzida. Os elementos acima fazem parte da biblioteca do Abaqus[®].

Foram considerados dois passos para análise: um que promove o contato entre as partes (a partir da imposição de uma velocidade vertical de 0,12 m/s) durante 1,0 μs , e outro que estabelece o deslizamento a uma velocidade de 0,1 m/s por um período de 1,0 μs .

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Forças Resistivas: componentes tangencial e normal e tensões

A determinação das componentes das forças resistivas devido ao contato é de suma importância no contexto em análise, pois para a abordagem do coeficiente de atrito e o cálculo deste último é imprescindível um conhecimento acerca do comportamento destas forças. Portanto, a Fig. 5 mostra as curvas das componentes normal e tangencial da força resistiva para o problema modelado.

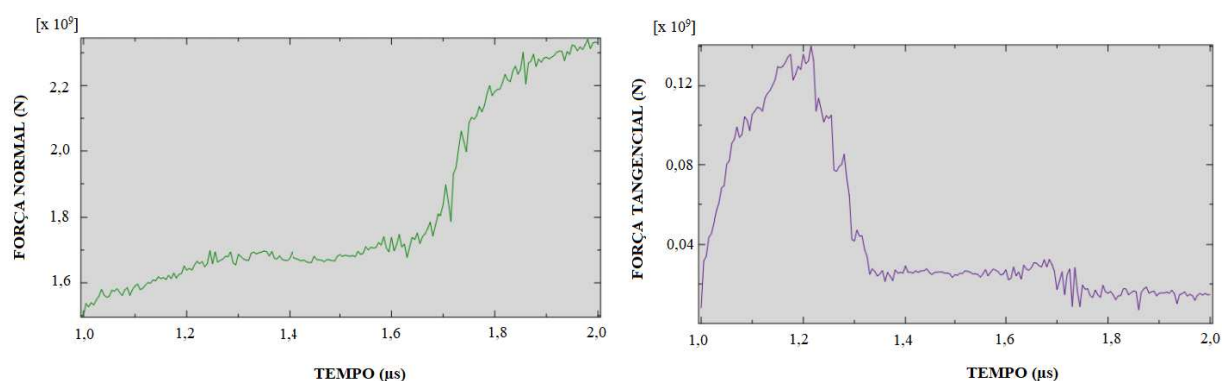


Figura 5: Componentes normal e tangencial da força resistiva em função do tempo de simulação

A força normal aumenta no decorrer do deslizamento, enquanto que, a componente tangencial da força resistiva se reduz ao longo da simulação, pois como se sabe, para que o deslizamento inicie é necessário se vencer uma resistência consideravelmente alta. Desta forma, à medida em que este já está estabelecido a força necessária para mantê-lo se reduz. Logo, o

atrito estático (a força associada à energia dissipada, necessária para iniciar o deslizamento relativo das superfícies) é maior que o atrito dinâmico (a força resistente atuante ao longo de um movimento já existente).

Para cada uma das duas etapas de tempo de análise, a saber, a primeira onde foi aplicado deslocamento na direção normal e uma segunda com deslizamento relativo entre as superfícies, foram contabilizados 200000 incrementos com espaços de tempo de aproximadamente 5×10^{-6} μs para um período de tempo de 1 μs .

4.2 Coeficiente de atrito

No instante em que se verifica no tribossistema um deslocamento tangencial relativo, as asperezas resistirão contra o movimento. Assim sendo, a hipótese trabalhada neste artigo é a de que, uma vez que as pressões de contato em ambas as superfícies que interagem são análogas, contabiliza-se, o somatório das reações referentes a apenas à superfície rugosa para efeitos de análise. Desta forma, é estabelecida uma relação entre as componentes tangencial e normal da força resistiva, que caracteriza o coeficiente de atrito. Isso é realizado pelo próprio programa Abaqus (R), que proporciona a operação entre as variáveis e/ou dados de saída solicitados. Considerando o deslizamento na direção x – positivo, tem-se a curva $\mu \times tempo$ (Fig. 6), para o intervalo de deslizamento considerado (1 μs a 2 μs).

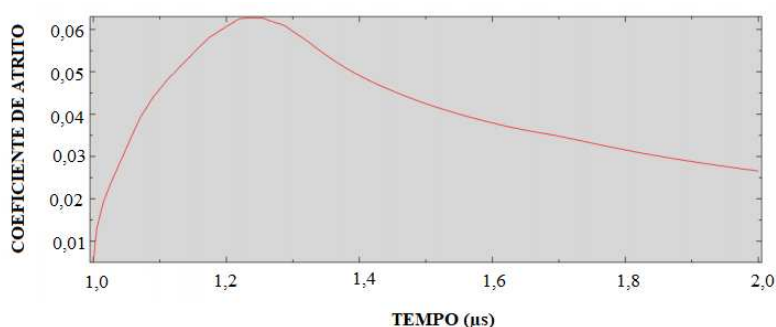


Figura 6: Coeficiente de atrito obtido para $\eta = 0,001 N.s/m$.

Observa-se na curva que o coeficiente de atrito estático, necessário para se vencer a resistência inicial e efetivar o deslizamento é aumentado até 1,3 μs , de tal forma que, à medida em que o deslizamento é efetivado, o coeficiente de atrito dinâmico assume valores bem menores.

Na literatura é possível encontrar valores de coeficiente de atrito para o esmalte dentário de 0,36 (Rodrigues, 2015), aproximadamente. É notável, portanto, que a lubrificação altera de forma significativa os valores do atrito sólido-sólido, uma vez que a presença do fluxo de fluido no modelo lubrificado obtém valores de coeficiente médio em torno de 0,03 ao fim do deslizamento (quase 10% do valor definido para o contato sólido-sólido em trabalhos correlatos).

4.3 Análise de Sensibilidade

4.3.1 Influência da velocidade de deslizamento no coeficiente de atrito

Testaram-se 3 valores de velocidade de deslizamento distintos, entre os quais 0,1 m/s, 0,5 m/s e 1 m/s, na tentativa de verificar o impacto deste parâmetro na determinação do coeficiente de atrito decorrente do deslizamento entre os pares contactados. Os resultados podem ser identificados na Fig. 7, ressaltando-se que a viscosidade do lubrificante neste teste se mantém como 0,001 $N.s/m^2$.

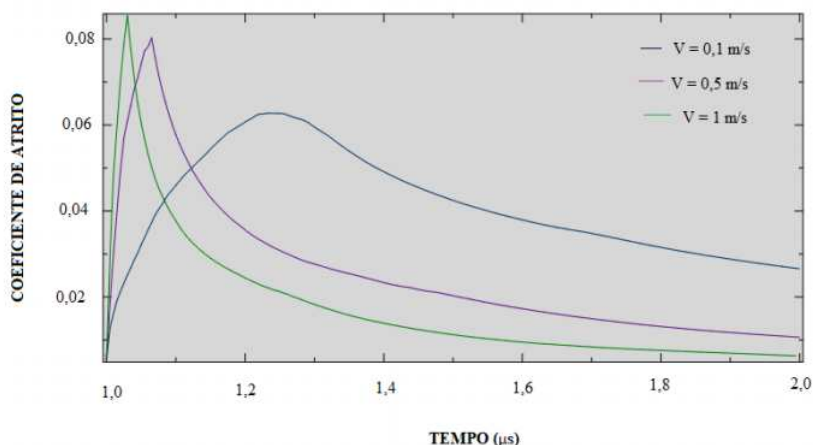


Figura 7: Impacto da velocidade de deslizamento no coeficiente de atrito.

Como se pode perceber, os resultados indicam que quanto maior a velocidade com que as asperezas se deslocam, menor é o coeficiente de atrito. Uma vez que o fluxo de lubrificante é responsável por gerar pressões hidrodinâmicas suficientes para impedir o contato entre os pares, a mínima parcela de contato verificada justifica o coeficiente de atrito extremamente baixo.

4.3.2 Influência do gradiente de pressão no coeficiente de atrito

O gradiente de pressão, referente às pressões de entrada e saída aplicadas no domínio euleriano na altura da película fluida foi também investigado, a fim de compreender se qualquer alteração em um dos valores numéricos afetam o comportamento tribológico do sistema em termos de atrito. Mantida a pressão de 109,99 MPa, variou-se a pressão (P_i) aplicada na face oposta, adotando-se além do valor de 110 MPa, 1 MPa e 11 MPa, conforme pode-se observar na Fig. 8.

A curva demonstra que, quanto maior o gradiente ou a variação de pressões aplicado (a) ao sistema, menor é o coeficiente de atrito obtido da interação superficial.

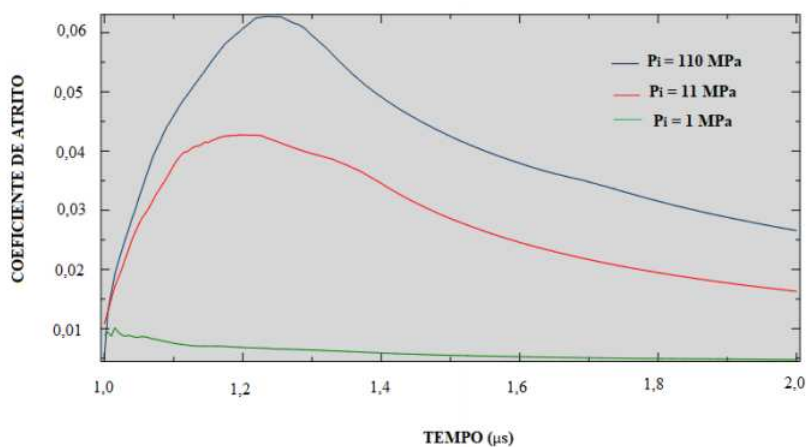


Figura 8: Impacto da variação de pressão no fluido na determinação do coeficiente de atrito.

4.3.3 Influência da viscosidade dinâmica do fluido no coeficiente de atrito

Lorentz (2013) mostrou em seus estudos que, quanto mais viscoso for o óleo, maior será a carga suportada pelo fluido, e conseqüentemente o coeficiente de atrito entre os pares sólidos será reduzido, uma vez que o fluido receberá grande parte da carga. Entretanto, no modelo de contato oclusal dentário esta relação não foi estabelecida, como se pode observar na Fig. 9.

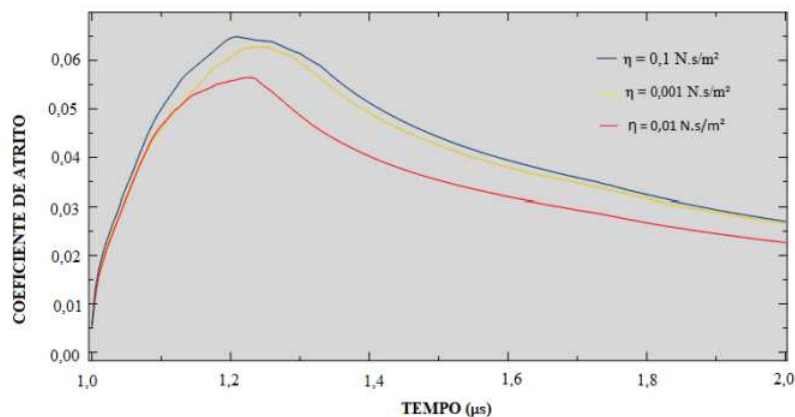


Figura 9: Avaliação da viscosidade na determinação do coeficiente de atrito.

Logo, há a necessidade de realizar investigações mais aprofundadas com relação ao fenômeno ou das propriedades do fluido modelado para uma maior compreensão da influência do fluxo viscoso no mecanismo de contato.

4.3.4 A direção do deslizamento e o coeficiente de atrito

Para este teste de sensibilidade, foi proposta uma modificação das condições de contorno do modelo de modo que o deslizamento, antes na direção x – positivo, passasse a ser considerado na direção z . A partir deste novo modelo gerado, os resultados demonstram que, quando o movimento relativo se dá em z o fluido tem maior capacidade de escoar por entre os vales e contribuir de maneira relevante para a eficiência da lubrificação na redução do atrito. A Fig. 10 mostra o coeficiente de atrito para cada uma das configurações analisadas, de tal forma que, quando o movimento relativo se dá na posição z para este modelo de contato lubrificado, os coeficientes de atrito se reduzem significativamente quando comparados a outra configuração preestabelecida.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho consistiu no estudo do contato lubrificado entre superfícies tribológicas com base nos modelos clássicos de contato entre asperezas. O acoplamento da interação fluido-estrutura se dá a partir de uma formulação definida pela descrição Lagrangiana-Euleriana Arbitrária e a simulação do problema é realizada pelo Método dos Elementos Finitos através do programa Abaqus[®]. Buscou-se, neste caso, para fins de modelagem e atribuição de propriedades de materiais, uma aplicação ao contato oclusal dentário humano, de modo a investigar os efeitos da lubrificação entre as estruturas dentárias. Desta forma, verificou-se que o coeficiente de atrito admitido para o contato sólido-sólido se reduz significativamente para a interação superficial modelada, isto é, quando inserida a lubrificação no sistema.

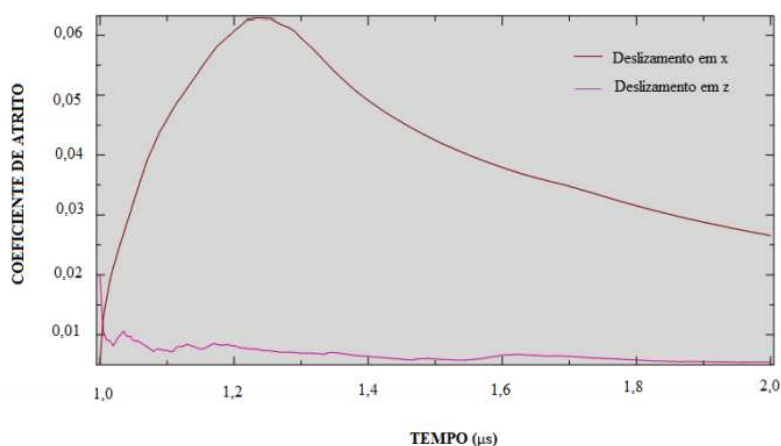


Figura 10: Avaliação do coeficiente de atrito para o deslizamento nas direções x e z.

Com relação às análises de sensibilidade, a influência da viscosidade não representou o efeito desejado. Por isso, é importante reconhecer as limitações do modelo, uma vez que é necessária uma investigação mais criteriosa a respeito do fenômeno avaliado.

Uma outra consideração é a de que, como se trata de uma investigação em microescala do contato, de natureza local, os resultados podem não representar o comportamento tribológico de uma superfície como um todo. Desta forma, é necessário se buscar formas de tratar o problema de contato lubrificado em macroescala, uma vez que aqui avaliou-se somente o comportamento tribológico em escala microscópica. Como trabalhos futuros, sugere-se obter perfis de rugosidade tridimensionais de superfícies rugosas e importá-los para o Abaqus[®], de modo que se tenha resultados mais realísticos em um modelo de macrocontato. Portanto, há ainda uma lacuna a ser explorada e muitas pesquisas a serem desenvolvidas para uma compreensão mais realística do mecanismo de contato lubrificado entre pares sólidos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional (PPGMC) e à Universidade Federal de Juiz de Fora pelo apoio através da concessão de bolsas de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Almqvist A. *On the effects of surface roughness in lubrication*. Tesis de Doutorado, Luleå tekniska universitet, 2006.
- Bastos F. *Análise Numérica do Contato Oclusal, Atrito e Desgaste Dentário Humano*. Tesis de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.
- Bhushan B. *Introduction to tribology*. 2002. *Ohio State University, Columbus, Ohio*, 2002.
- Greenwood J. e Williamson J.P. Contact of nominally flat surfaces. Em *Proc. R. Soc. Lond. A*, volume 295, páginas 300–319. The Royal Society, 1966.
- Lohse H.R.S. *Análise elasto-plástica com não linearidade geométrica usando uma formulação Arbitrária Lagrangeana-Euleriana*. Tesis de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.
- Lorentz B. *An approach to investigate surface roughness influence on non-lubricated and lubricated contacts by means of the finite element analysis*. Tesis de Mestrado, Instituto de Desenvolvimento de Produto e Instituto de Tecnologia de Karlsruhe, 2013.

- Meireles A.B. *Métodos para acompanhamento do desgaste dentário no bruxismo*. Tesis de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- Montmitonnet P. Plasto-hydrodynamic lubrication (phd)—application of lubrication theory to metal forming processes. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IV-Physics*, 2(5):729–737, 2001.
- Rodrigues F.A.T. *Efeito do branqueamento dentário com peróxido de hidrogénio na morfologia, hidrofiliçidade, propriedades mecânicas e tribológicas do esmalte*. Tesis de Mestrado, Técnico Lisboa, 2015.
- Simulia D.S. Abaqus analysis user's manual. *Dassault Systemes, Pawtucket, USA*, 2010.
- Wilson W. Friction and lubrication in bulk metal-forming processes. *Journal of applied metalworking*, 1(1):7–19, 1978.