



XXXVII IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS
ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING
BRASÍLIA - DF - BRAZIL

INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA EM MODELO DE CONTATO LUBRIFICADO ENTRE ASPEREZA E PLANO RÍGIDO

Flávia de Souza Bastos - flavia.bastos@ufjf.edu.br

Marcus Vinícius de Souza Ferraz - marcus.ferraz@engenharia.ufjf.br

Universidade Federal de Juiz de Fora

Rua José Lourenço Kelmer, s/n - Bairro São Pedro - CEP: 36036-900 - Juiz de Fora - MG

Sara Del Vecchio - sara.vecchio@ifsudestemg.edu.br

Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais

Rua Bernardo Mascarenhas, 1283 - Bairro Fábrica - CEP: 36080-001 - Juiz de Fora - MG

Resumo. *A tribologia (estudo do atrito, desgaste e lubrificação) é considerada um tema interdisciplinar, que trata das interações entre superfícies cujas aplicações podem ser vistas em vários campos da engenharia e das ciências. Simulações numéricas são úteis para avaliar a influência de diferentes parâmetros operacionais e imprescindíveis na tentativa de estudar os fenômenos interfaciais de uma forma especialmente controlada. Uma película de fluido entre duas superfícies em movimento relativo alivia o contato sólido-sólido e pode proporcionar atrito muito baixo. No presente trabalho foi desenvolvido um modelo qualitativo em elementos finitos para simulação do contato entre micro-aspereza (pico) e um plano rígido, incluindo interação fluido-estrutura. Esse modelo, baseado no acoplamento euleriano-lagrangeano visa aplicações em problemas de contato entre superfícies rugosas, quando identifica-se no tribosistema a ocorrência de lubrificação. Objetiva-se, portanto, comparar os resultados de pressão de contato entre um modelo não-lubrificado e um modelo lubrificado, verificando o quanto a pressão advinda do confinamento do fluido influencia na interação superficial entre duas superfícies rugosas. Os resultados obtidos na interface de contato foram satisfatórios, uma vez que verificou-se que a pressão hidrostática devido à película de fluido confinado aliviou as pressões e deformações de contato quando comparadas a um modelo não-lubrificado.*

Palavras-Chave: *lubrificação, interação fluido-estrutura, acoplamento euleriano-lagrangeano, tribologia*

1 INTRODUÇÃO

A Tribologia é uma ciência interdisciplinar que se dedica ao estudo da interação entre superfícies em movimento relativo e à compreensão dos fenômenos ligados ao atrito, desgaste e lubrificação (Stachowiak, 2013). O atrito e desgaste entre pares sólidos são mecanismos que interferem diretamente no comportamento tribológico de estruturas e são influenciados por uma diversificação de fatores, dentre os quais a topografia das superfícies é consideravelmente importante. A lubrificação tem como finalidade reduzir os impactos ocasionados pelos mecanismos acima mencionados e, em um sistema tribológico, influi na análise do contato entre pares sólidos. A motivação inicial deste estudo é compreender o comportamento de superfícies lubrificadas, fator importante para a estimativa do atrito entre pares de contato.

De acordo com Sanches (2006), os problemas de interação fluido-estrutura estão presentes nas mais diversas áreas, tais como obras de engenharia civil, mecânica, aeronáutica, naval, e até em problemas de biomecânica. Pesquisas relacionadas a este campo de estudo estão se tornando comuns devido à maior capacidade de processamento dos computadores atuais e à demanda por resultados mais precisos, capazes de representar com mais fidelidade os fenômenos existentes. Em muitos casos entretanto, há ainda a necessidade de se introduzir muitas hipóteses simplificadas do problema real para permitir alguma forma de modelagem matemática que conduza a soluções mais simples.

O objetivo geral deste trabalho consiste em construir, a partir de modelos e abordagens preliminares, um modelo qualitativo (sem levar em consideração a ordem de grandeza das dimensões) que simula o contato lubrificado entre aspereza e plano rígido identificando a interação fluido-estrutura do sistema. E, especificamente, este trabalho visa:

- i. Buscar uma compreensão dos mecanismos de lubrificação na interação entre superfícies tribológicas;
- ii. Familiarização com um programa de elementos finitos – Abaqus, visando a geração de modelos computacionais de interação fluido-estrutura que represente o contato lubrificado;
- iii. Compreender a diferenciação entre descrições eulerianas, lagrangeanas, e o acoplamento entre ambas, e como uma interação fluido-estrutura pode ser representada por tais descrições, verificando os procedimentos necessários para a modelagem das condições impostas.

Uma comparação entre os modelos construídos foi apresentada e discutida, verificando se a distribuição de pressões de contato e deformação nos corpos envolvidos apresentaram diferenças consideráveis.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estado da Arte

Trabalhos recentes vem sendo realizados a fim de estudar o comportamento de superfícies no contato lubrificado. Neste contexto, Boman et al. (2004), apresenta uma formulação euleriana-lagrangeana arbitrária baseada no método dos Elementos Finitos, capaz de modelar sistemas com grandes deformações, representando fisicamente as forças de atrito resultantes da presença de um lubrificante na interface de contato.

Lorentz (2013) se concentra na investigação da rugosidade superficial em contatos lubrificadas e não - lubrificadas em sistemas. Esta tarefa é realizada numericamente por meio do método dos elementos finitos. Para ambos os tipos de contato, é utilizado o modelo de adesão de Bowden e Tabor (1964). Leva-se em consideração o regime de lubrificação mista, e a combinação dos tipos de contato, sólido - sólido e fluido-sólido é modelada usando a abordagem definida pelo método de acoplamento euleriano-lagrangeano.

2.2 Tribossistemas e fenômenos tribológicos

A análise de sistemas pode ser muito útil para a descrição dos processos tribológicos. De acordo com Trentin (2013), em cada tribossistema têm-se diferentes entradas, como velocidade, força normal, materiais, lubrificantes, temperatura, geometria e ambiente, e, dessa maneira, diferentes saídas na forma de atrito e desgaste. As características dos materiais antes do contato são de suma importância e funcionam como um ponto de partida para a análise do sistema tribológico. Entre tais características se destacam a geometria das superfícies dos corpos, a geometria relativa entre as duas superfícies e as propriedades dos materiais envolvidos.

As interações existentes no contato geram materiais e estruturas novos que formam a interface entre o par de deslizamento. A camada formada no deslizamento entre os dois materiais – tribocamada – define as condições tribológicas, desempenhando funções primordiais na determinação dos fenômenos de atrito e desgaste (Barbosa, 2014).

O termo “atrito” é genericamente utilizado para descrever a dissipação de energia em diversas situações envolvendo o contato entre corpos ou substâncias (Profito, 2010). O atrito viscoso, em particular, descreve a componente tangencial da força de contato que existe quando há um fluido separando duas superfícies em contato e em velocidades diferentes. O atrito viscoso tem fundamental importância em problemas que envolvem o escoamento de fluidos através de tubos e orifícios ou que envolvem corpos imersos em fluidos em movimento, sendo essencial na análise de mecanismos lubrificadas (Bhushan, 2002).

2.3 Lubrificação e Regimes de Lubrificação

Quando duas superfícies estão em contato, os carregamentos externos atuantes sobre as mesmas são suportados pela interação das diversas asperezas existentes na interface de contato. Nestas condições, a força tangencial suficiente para gerar o movimento relativo das superfícies torna-se elevada, promovendo altos níveis de atrito e desgaste. Como medida para minimizar os esforços resistentes ao movimento, os lubrificantes, sejam líquidos, sólidos ou gases, são introduzidos na região de contato.

Uma película de fluido entre duas superfícies em movimento relativo reduz o contato sólido-sólido e pode proporcionar coeficientes de atrito muito baixos (da ordem de 0,001 - 0,003) e desgaste desprezível conforme Bhushan (2002).

Dependendo das características das superfícies lubrificadas e da espessura do filme lubrificante, podem ser identificados vários regimes de lubrificação. Stribeck (1902) executou uma série de experiências com mancais radiais e mediu o coeficiente de atrito como uma função da carga, da velocidade, e da viscosidade. Posteriormente, Hersey (1914) realizou experiências semelhantes e traçou uma representação gráfica baseada em um parâmetro $\eta \frac{V}{W}$, onde η é a viscosidade, V é a velocidade linear entre as superfícies e W é a carga aplicada (Couto, 2006).

A curva de Stribeck/Hersey, a qual pode ser visualizada na Fig. 1, caracteriza os regimes de lubrificação apresentando o coeficiente de atrito como uma função de viscosidade, velocidade, e carga. Pode-se observar que, para as superfícies que se apresentam completamente separadas por um espesso filme de lubrificante ($h > 0,25\mu\text{m}$), têm-se o regime de lubrificação hidrodinâmica, onde o atrito é determinado pelas características do lubrificante. Neste regime, todo o carregamento externo que atua no sistema é suportado pelo campo de pressões hidrodinâmicas desenvolvidas pelo fluido; sendo caracterizado por baixos níveis de atrito e resistência ao desgaste elevada. Quando se aumentam as cargas, até atingir uma deformação elástica das superfícies, identifica-se o regime de lubrificação elastohidrodinâmica, de modo que a espessura h varia de $0,025$ a $1,250\ \mu\text{m}$. Com a aplicação de mais carga, tem-se o regime de lubrificação mista, no qual os efeitos de interação entre as superfícies e efeitos de filme fluido estão presentes. Este é caracterizado por espessuras de filme lubrificante cujas dimensões são insuficientes para a completa separação das superfícies em contato.

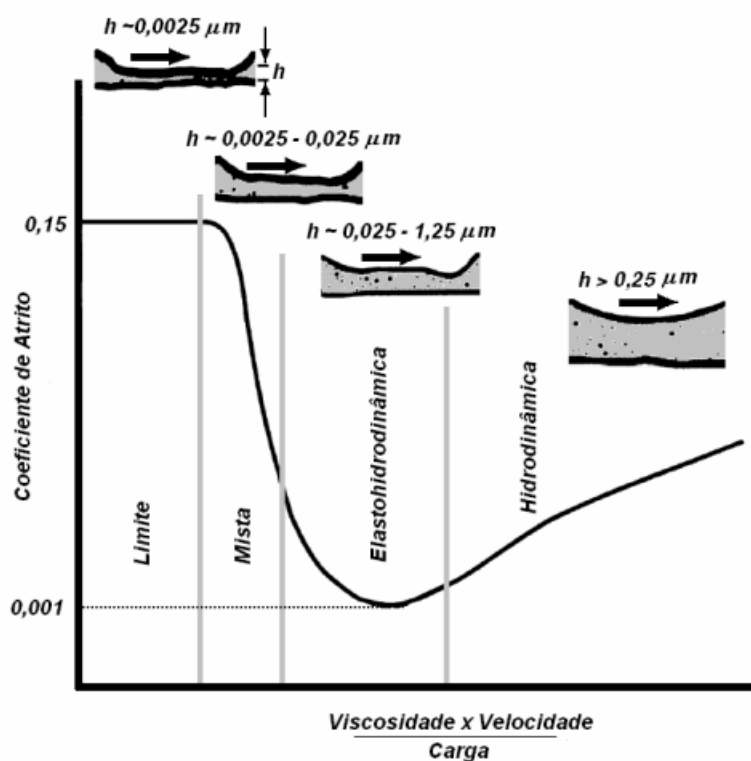


Figura 1: Regimes de Lubrificação por Filme Fluido – Curva de Stribeck (Couto, 2006).

De acordo com Profito (2010), esse último regime é caracterizado pela combinação dos efeitos inerentes aos regimes hidrodinâmico e limite e, conseqüentemente, o carregamento externo atuante no sistema é suportado, concomitantemente, pelo campo de pressões hidrodinâmicas e pelo contato das asperezas.

Para o regime de lubrificação limite, considera-se que o contato entre as asperezas das superfícies e a espessura do filme de lubrificante é da ordem de nanômetros, sendo, portanto, de difícil compreensão. As asperezas das superfícies não são separadas por nenhum filme lubrificante, de tal forma que todo o carregamento externo seja suportado tanto pelo contato direto das asperezas, quanto pela interação das moléculas que compõem o filme tribológico.

A lubrificação hidrostática ocorre quando o lubrificante é injetado sob pressão no espaço entre as superfícies, antes do início da operação. Este tipo de lubrificação é geralmente visualizado quando altas cargas estão envolvidas e não é descrita na curva de Stribeck. Neste regime não há a necessidade de movimentos relativos entre as duas superfícies para produzir a película lubrificante.

2.4 Teoria da Mecânica dos Fluidos

Um ponto fundamental a ser considerado em tribologia e essencial para o desenvolvimento deste trabalho é o estudo da mecânica dos fluidos, uma vez que esta é responsável por descrever o comportamento do lubrificante presente entre dois sólidos.

Para a construção de modelos tendo-se em vista a presença de fluido lubrificante, noções básicas referentes à mecânica dos fluidos são necessárias recorrendo-se a abordagem de mecânica do contínuo. Navier e Stokes descrevem o movimento de fluido utilizando a três equações abaixo (Lorentz, 2013):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

correspondente à conservação da massa,

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \otimes \vec{V}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{f} \quad (2)$$

correspondente à equação do momento e,

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [(\rho e + p)\vec{V}] = \vec{\nabla} \cdot (\vec{\tau} \cdot \vec{V}) + p \vec{f} \cdot \vec{V} \quad (3)$$

à energia, em que:

\vec{V} : campo de velocidade;

\vec{f} : força por massa aplicada a um volume de fluido;

e : energia por unidade de massa;

t : tempo;

ρ : massa específica do fluido;

p : pressão;

$\vec{\tau}$: tensor de tensão de cisalhamento.

De acordo com as abordagens de Lorentz (2013), uma propriedade do fluido de tamanha relevância é a compressibilidade; e lubrificantes convencionais são considerados incompressíveis. No entanto, quando uma alta pressão é aplicada a estes, um fenômeno de compressão não-negligenciável é observado. Isto é apresentado para os resultados da Fig. 7 para valores acima de 200 atm.

Há de considerar que nos fluidos newtonianos, como considerado neste trabalho, existe uma relação linear entre o valor da tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de deformação resultante. Neste caso, deve-se considerar que, na teoria geral de viscosidade, para duas superfícies separadas por uma película fluida de espessura z , e ambas em movimento relativo, a uma velocidade linear v , a força por unidade de área (F/A) ou tensão de cisalhamento (τ) é

proporcional à taxa de deformação (d_v/d_z) (Bhushan, 2002):

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dz} \quad (4)$$

sendo η a viscosidade absoluta do lubrificante.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A técnica utilizada no trabalho foi a de acoplamento Euleriano-Lagrangeano, aplicado a um modelo idealizado e qualitativo, de maneira a avaliar e comparar as pressões de contato quando há ou não a presença de lubrificante. As condições de contorno aplicadas ao modelo lubrificado são do tipo velocidade, visto que problemas de acoplamento euleriano-lagrangeano são aplicados à dinâmica, embora neste caso a velocidade de deslocamento seja muito pequena.

3.1 Modelo Estatístico de contato baseado em asperezas

Um modelo de mecânica de contato depende da forma como as superfícies rugosas são descritas matematicamente. A abordagem clássica de descrição de uma superfície a partir do perfil digitalizado consiste na construção de um histograma de alturas (Fig. 2), que registra a frequência com que uma determinada aspereza de uma altura qualquer definida é encontrada na superfície estudada. Tal histograma pode ser aproximado por uma função de densidade de probabilidades.

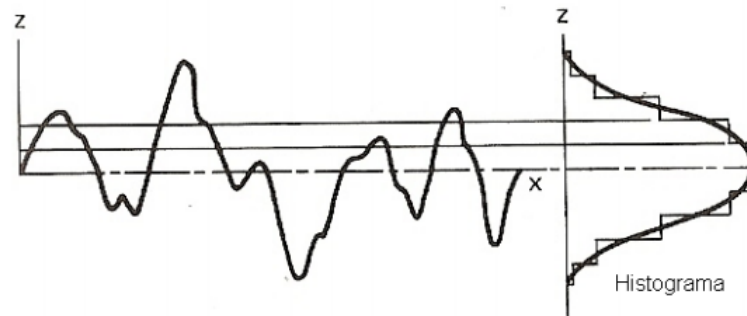


Figura 2: Modelo de contato baseado em asperezas (Myers, 1999)

Baseando-se nas abordagens propostas por Tworzydło et al. (1998) e Karpenko e Akay (2001) para modelos de interfaces de contato baseados em asperezas, os seguintes procedimentos foram estabelecidos em trabalhos anteriores (Bastos, 2016):

- I. Determinação dos parâmetros de rugosidade;
- II. Cálculo da função de densidade de probabilidade das alturas das asperezas;
- III. Modelagem geométrica de uma série de asperezas chamadas asperezas principais, com diferentes alturas z_i ;
- IV. Análise por elementos finitos do microcontato para cada aspereza principal em contato com um plano rígido, como uma analogia ao ensaio de dureza, onde a ponta do penetrador é quase lisa. A partir das respostas obtidas para cada micro-aspereza, $X(z_i)$, onde X pode ser força ou pressão de contato, por exemplo, é feita uma homogeneização de modo a obter a resposta da superfície como um todo;

- V. Estimativa da dureza superficial homogeneizada como a razão entre a força de resistência geral e área de contato real, e a tensão de escoamento superficial homogeneizada, através da relação entre pressão de contato e indentação.

3.2 Acoplamento Euleriano-Lagrangeano

A análise computacional da interação fluido-estrutura exige um desenvolvimento matemático para descrever:

- i. o comportamento do fluido;
- ii. o comportamento da estrutura;
- iii. o acoplamento entre ambos.

Desta forma, no que se refere a problemas de interação fluido-estrutura, existe a necessidade de tratar de forma diferente o domínio fluido em relação ao domínio sólido, e reformular as equações eulerianas do fluido de forma que possam ser acopladas às equações lagrangeanas do sólido.

Nesta subseção, procura-se mostrar, de forma simplificada, a metodologia implementada no programa comercial Abaqus para acoplar a representação do fluido, modelado por uma malha euleriana, à deformação da estrutura, modelada por uma malha lagrangeana.

Para resolver as equações de Navier-Stokes para fluidos Newtonianos, em que as severas deformações dos elementos finitos levam a grandes mudanças na razão de aspecto dos elementos dificultando a correta análise de uma malha lagrangeana, outra abordagem se faz necessária onde a representação euleriana do fluido vem se destacando promissora (Benson, 1992).

O ABAQUS inicia-se com uma análise lagrangeana normal, conhecida como fase linear de Stokes, na qual a malha se movimenta junto ao deslocamento das partículas do fluido onde as variações de velocidade, pressão e energia interna devido a forças externas e internas são computadas explicitamente. Na segunda fase, conhecida como fase de advecção ou de transporte, o incremento no tempo de deformação é suspenso, os elementos significativamente deformados são remapeados na malha euleriana original (fixa no espaço) e o fluxo de material entre elementos vizinhos é computado. No CEL explícito, a estratégia geral utilizada para acoplar os cálculos lagrangeanos aos eulerianos e vice-versa, é aplicar a pressão exercida pela malha euleriana como condição de contorno na malha lagrangeana e tratar as fronteiras da malha lagrangeana como velocidade prescrita nas condições de contorno da malha euleriana (Ruiz, 2013).

A malha em uma parte euleriana é rígida. Deslocamento zero como condição de contorno pode ser usado. Condições e restrições de limite com base em deslocamentos nodais não nulos são ignoradas; normalmente, são usadas condições de contorno de velocidade para prescrever o movimento inicial em um modelo de Euler. A malha é tridimensional com elementos hexaédricos. A definição geral de contato permite criar interações entre superfícies de Lagrange e de Euler. As cargas, as condições de contorno, e campos predefinidos são aplicados às peças de Lagrange e de Euler na maneira usual.

Na maioria dos casos a parte de Lagrange é montada dentro da parte euleriana em uma área de vazio dentro da parte euleriana. Geralmente, para modelar uma parte lagrangeana tridimensional que está completamente cercada por material euleriano, utiliza-se a ferramenta “Fração

de Volume”.

Os domínios de atribuição de material só podem ser criados no passo inicial de uma análise Euleriana. Em passos subsequentes os materiais se deformam a partir da sua configuração inicial e fluem através da malha euleriana de acordo com as forças presentes no modelo.

3.3 Desenvolvimento do modelo de contato entre asperezas

Para futuramente incluir a lubrificação no modelo estatístico de contato descrito na subseção 3.1, buscou-se construir um modelo inicial simplificado. O mesmo apresenta o contato entre uma barreira e um pico (fazendo analogia ao plano rígido em contato com a aspereza da superfície). A geometria proposta para a realização da simulação é representada pela Fig. 3, não levando em conta a escala real de nenhum problema específico.

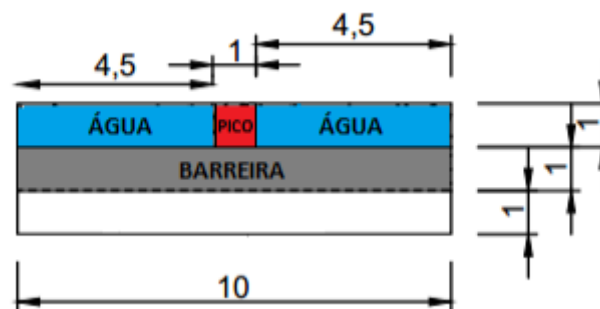


Figura 3: Geometria do Modelo (dimensões em m).

Assumindo que o plano já se encontra em contato com o pico, sem gerar esforços, modelou-se o problema para duas condições:

- Para o fluido livre: de forma que haja pressões de contato somente entre o plano e o pico;
- Para o fluido confinado: no qual além das pressões de contato entre plano e pico, a água também exerce pressão hidrostática sobre os sólidos.

Ressalta-se que o tipo de análise realizada é dinâmica e leva em conta um intervalo de tempo significativamente pequeno. Apesar da notoriedade da evolução dos resultados com o tempo, objetiva-se verificar o campo de pressões na interface de contato no tempo final de análise. Desconsiderou-se a carga gravitacional, sendo que o fluido é pressurizado a partir da velocidade imposta pela barreira. Os mesmos parâmetros foram aplicados para as duas situações de interação fluido-estrutura (módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e densidade para a barreira; e densidade e viscosidade para o fluido). Os seguintes passos descrevem as etapas de modelagem:

- I. Criou-se uma parte, definida pelo domínio euleriano, do tipo 3D euleriana;
- II. Aplicou-se uma seção euleriana para todo o domínio criado, atribuindo a esta seção o material fluido, com as propriedades específicas deste;
- III. A malha de elementos finitos aplicada no domínio de Euler se constituiu em elementos hexaédricos, de 8 nós, lineares, do tipo *EC3D8R* considerando integração reduzida e com tamanho global aproximado de 0,005. A integração reduzida diminui consideravelmente

o tempo de execução, sobretudo em problemas tridimensionais, e não compromete a precisão dos resultados obtidos.

- IV. Foram criadas partições para posterior identificação da região inicial de fluido e atribuição;
- V. Criou-se o pico, considerando-o lagrangeano, do tipo 3D, deformável;
- VI. Ao pico aplicou-se uma seção sólida-homogênea, atribuindo a essa seção o material elástico criado, com suas propriedades;
- VII. A malha de elementos finitos para o pico consistiu em elementos com geometria linear, do tipo “Standard” – 3D Stress, hexaédricos, *C3D8R*, 8 nós, 3 graus de liberdade e com tamanho global aproximado de 0,005;
- VIII. Para a barreira seguiram-se os mesmos procedimentos adotados para a parte lagrangeana;
- IX. Nas propriedades dos materiais estabeleceu-se:
 - $\rho = 1000\text{kg/m}^3$ e $\eta = 0,001\text{Ns/m}^2$ para a água, sendo ρ e η , a massa específica e a viscosidade dinâmica ou absoluta da água, respectivamente.
 - $E = 1,2 \cdot 10^7\text{N/m}^2$, $\nu = 0,4$, e $\rho = 1100\text{kg/m}^3$ para o material elástico, sendo E , ν e ρ , respectivamente, o módulo de elasticidade do material, o coeficiente de Poisson e a massa específica do mesmo.
- X. No módulo “*Assembly*”, juntaram-se as partes;
- XI. No passo inicial, definiram-se as condições de contorno para o modelo. A velocidade da barreira é modificada, posteriormente, para que a mesma possa gerar pressões no contato com o pico. A velocidade aplicada é pequena, garantindo teoricamente que o problema seja quase estático. Todas as condições de contorno determinadas para o modelo estão ilustradas na Fig. 4. Para o modelo com o fluido confinado, foi acrescentada a condição de contorno (g).

De maneira simplificada, podem-se definir as condições de contorno representadas pela Fig. 4:

 - a. Velocidade nula na direção z – pico;
 - b. Velocidade nula na direção x – barreira;
 - c. Velocidade nula na direção x – parte euleriana;
 - d. Velocidade nula na direção y – pico;
 - e. Velocidade nula na direção y – barreira, modificada adequadamente ao problema;
 - f. Velocidade nula na direção z – domínio euleriano e barreira;
 - g. Velocidade nula na região em que o fluido poderia escapar, sendo que a partir desta condição de contorno especificada, a água estará confinada.
- XII. Criou-se no passo inicial em “*Predefined Field*”, um campo de atribuição de material à região inicial em que o fluido se encontra, utilizando para tal, a ferramenta fração de volume, com domínio uniforme;
- XIII. Definiu-se um novo passo, do tipo *dinâmico explícito*, determinando o período de tempo da análise – 0,1s.

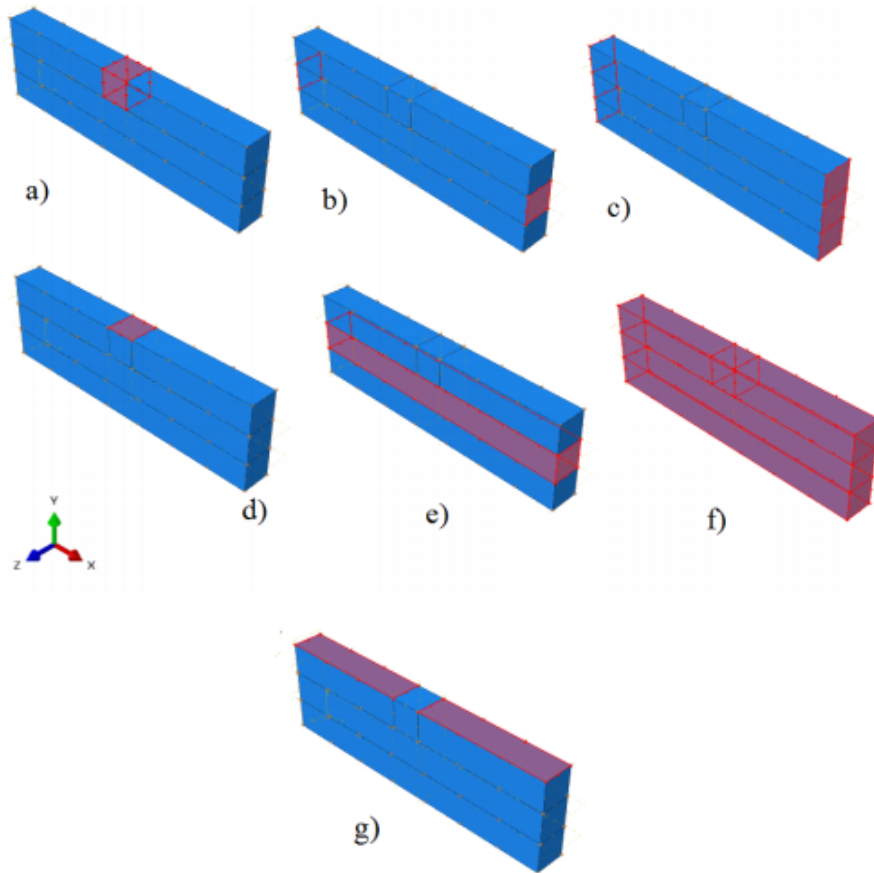


Figura 4: Condições de contorno impostas ao modelo.

XIV. No módulo de *Interações*, estabeleceu-se uma interação definindo o contato geral entre as partes envolvidas – superfície escrava (pico) e superfície mestre (plano/barreira). A configuração inicial do modelo é apresentada na Fig. 5.

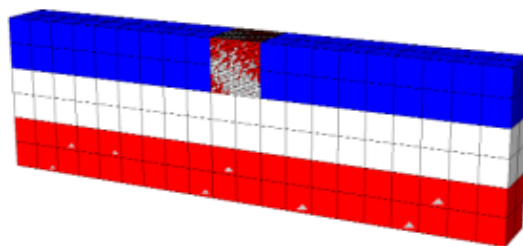


Figura 5: Configuração Inicial do Modelo

XV. O modelo foi submetido à análise, após a criação do *JOB*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a interação fluido-estrutura considerada e comparação do modelo idealizado nas duas condições estabelecidas, considera-se para fins de análise, os resultados de pressão de contato

na interface barreira/pico e de deformação nos mesmos. Para a pressão de contato do modelo sem e com o efeito da lubrificação, respectivamente, obtiveram-se os seguintes resultados apresentados na Fig. 6.

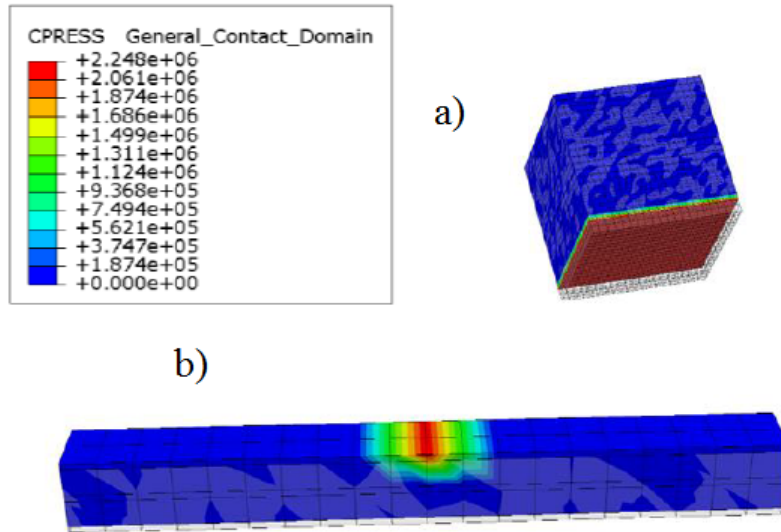


Figura 6: Resultados da pressão de contato (N/m^2) na interação com fluido livre: a) detalhe da visualização no pico; b) detalhe da visualização na barreira

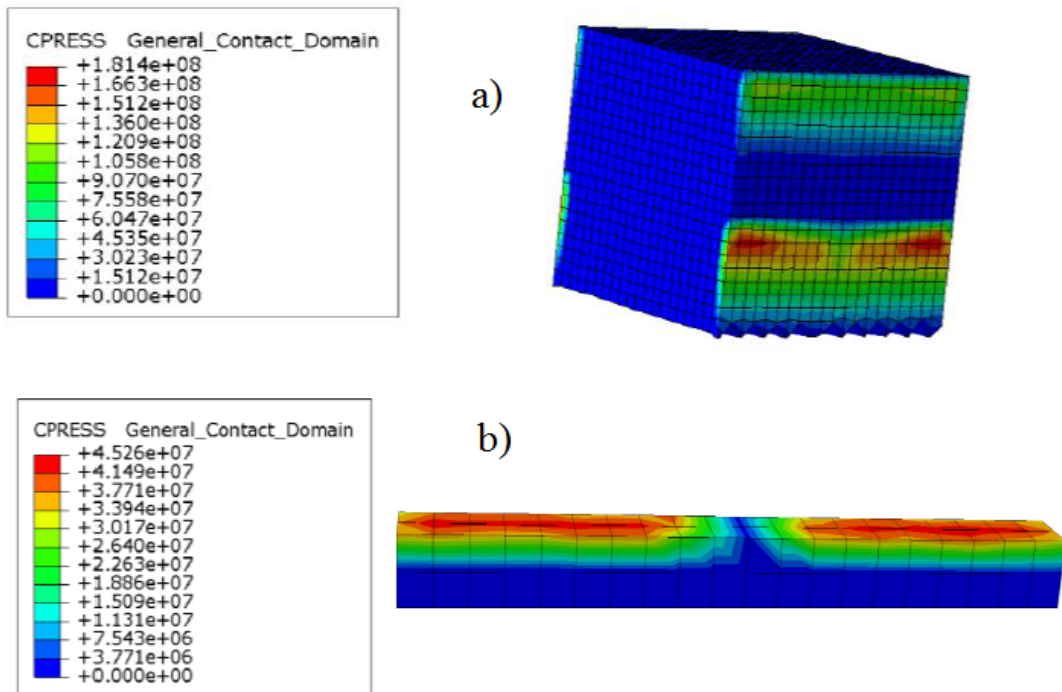


Figura 7: Visualização da distribuição de pressões em N/m^2 incluindo a interação fluido-estrutura: a) no pico, e b) na barreira

Quando o fluido está livre para fluir para fora do domínio euleriano, o modelo representa a situação onde não existe influência da interação fluido-estrutura. Observa-se que a distribuição de pressões de contato se dá somente na interface determinada pela barreira e pelo pico, visto que desprezou-se o carregamento gravitacional da água para este estudo.

A partir dos resultados dispostos na Fig. 7b é possível observar que na interface de contato entre barreira e pico, a distribuição de pressões apresenta efeitos distintos em comparação ao modelo com fluido livre. Devido ao confinamento do fluido, as pressões são geradas na barreira, quando a mesma é deslocada à velocidade especificada. O fluido, por sua vez, ao ser pressurizado, gera pressões nas laterais dos picos (Fig. 7a), constituindo assim condições de lubrificação. Destaca-se neste caso a Fig. 7b, onde máximos valores de pressão de contato estão presentes na parte da barreira que interage com a água. É possível identificar que, para o fluido confinado, as máximas pressões de contato presentes no modelo são da ordem de 10^2 vezes as pressões de contato quando não há confinamento. A deformação máxima no modelo com fluido livre, obtida no pós-processamento, é menor que a máxima deformação do modelo em que os efeitos da lubrificação estão presentes.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos para pressão de contato na interface entre barreira e pico no modelo gerado neste trabalho foram satisfatórios, pois apesar de não demonstrarem de maneira mensurável as ordens de grandezas envolvidas, qualitativamente verificou-se uma compatibilidade nas comparações simuladas. Isto se justifica pelo fato de que a presença do fluido em confinamento no domínio euleriano tende de fato a causar pressões e deformações significativamente maiores quando comparadas a um modelo em que as condições de lubrificação não estão presentes. Logo, a lubrificação é responsável por interferir nos resultados de um modelo de contato baseado em asperezas.

Dentro deste escopo, os próximos passos a serem realizados para uma melhor avaliação da interação fluido-estrutura no contato lubrificado entre superfícies rugosas são:

- i. Aplicar a metodologia deste trabalho em modelos mais realistas de contato entre superfícies tribológicas;
- ii. A partir das respostas obtidas para cada aspereza principal, recorrer às técnicas de homogeneização para analisar o macrocontato no tribossistema;
- iii. Acrescentar a curvatura das asperezas ao modelo desenvolvido neste trabalho e identificar a influência dos parâmetros de textura superficial nas propriedades homogeneizadas de contato lubrificado;
- iv. Validar o modelo com base nos estudos experimentais disponibilizados na literatura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio concedido pelas seguintes agências: CNPq, CAPES, FAPEMIG e à Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF).

REFERÊNCIAS

- Barbosa, M. V., 2014. *Metodologia de caracterização físico-química de tribocamada*. Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Bastos, F. S., Oliveira, E. A., Fonseca, L. G., Vargas, S. M., & Las Casas, E. B., 2016. A FEM-based study on the influence of skewness and kurtosis surface texture parameters in human dental occlusal contact. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 295, 139-148.
- Benson, D. J., 1992. Computational methods in Lagrangian and Eulerian hydrocodes. *Computer methods in Applied mechanics and Engineering*, 99(2), 235-394.
- Bhushan, B., 2002. Introduction to Tribology. *John Wiley & Sons*. New York.
- Boman, R., & Ponthot, J. P., 2004. Finite element simulation of lubricated contact in rolling using the arbitrary Lagrangian–Eulerian formulation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193(39), 4323-4353.
- Couto, P. R. C., 2006. *Análise de mancais radiais hidrodinâmicos com aplicação em compressores herméticos de refrigeração*. Tese, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Karpenko, Y. A., & Akay, A., 2001. A numerical model of friction between rough surfaces. *Tribology International*, 34(8), 531-545.
- Lorentz, B., 2013. *An approach to investigate surface roughness influence on non-lubricated and lubricated contacts by means of the finite element analysis*. Tese, Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Manual, A., 2013. Abaqus Documentation Version 6.13.
- Myers, D., 1999. Surfaces, Interfaces and Colloids: Principles and Applications.
- Profito, F. J., 2010. *Modelagem unidimensional do regime misto de lubrificação aplicada a superfícies texturizadas*. Tese, Universidade de São Paulo.
- Ruiz, H. G., 2013. *Estudo de Slamming em Catamarã de fibra de vidro*. Tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Sanches, R. A. K., 2006. *Análise bidimensional de interação fluido-estrutura: desenvolvimento de código computacional*. Tese, Universidade de São Paulo).
- Stachowiak, G., & Batchelor, A. W., 2013. *Engineering tribology*. Butterworth-Heinemann.
- Trentin, R. E., 2014. *Propriedades físico-químicas, mecânicas e tribológicas de filmes finos de Si3N4 contendo MoS2*. Dissertação, Universidade de Caxias do Sul.
- Tworzydło, W. W., Cecot, W., Oden, J. T., & Yew, C. H., 1998. Computational micro-and macroscopic models of contact and friction: formulation, approach and applications. *Wear*, 220(2), 113-140.