



Cálculo da Distribuição de Temperatura do Lubrificante em Mancais de Deslizamento

Palavras-Chave: Mancal radial hidrodinâmico, Equação de Reynolds generalizada, Teoria da lubrificação

Gabriel Lopes Soderi, FEM - UNICAMP
Prof. Dr. Thales Freitas Peixoto, FEM - UNICAMP

1 Introdução

Mancais hidrodinâmicos dependem do fluxo constante de fluido lubrificante para prevenir falhas mecânicas. No entanto, o atrito constante entre o mancal, o fluido e o eixo gera um gradiente de temperatura no fluido, o que pode ser prejudicial para a operação eficaz, uma vez que mudanças na temperatura alteram sua densidade e viscosidade, reduzindo sua eficácia e, conseqüentemente, a vida útil de todos os componentes envolvidos.

Este trabalho analisa como o custo computacional de simulações de fluidos, envolvidas em análises de lubrificação termo-hidrodinâmica em mancais hidrodinâmicos de geometria fixa inclinada, pode ser reduzido ao se desprezarem termos de impacto insignificante na solução da equação de energia adimensional.

2 Metodologia

2.1 Soluções da Equação de Reynolds

Para resolver a equação de energia adimensional, primeiramente foram determinados os campos de velocidade do escoamento no mancal. Esses campos puderam ser calculados através do campo de pressão, um resultado direto da solução da equação de Reynolds (Hamrock *et al.* (2004)).

Então, com o objetivo de obter um caso base para a comparação da solução da equação de Reynolds por diferentes métodos numéricos, utilizou-se a solução analítica da literatura (Hamrock *et al.* (2004)) como caso base para a validação dos métodos numéricos. Para este caso, apenas é considerado a solução unidimensional, desconsidera o escoamento lateral (vazamento nas bordas), uma simplificação necessária para a obtenção de uma solução analítica. Para casos bidimensionais, métodos numéricos são mais adequados. A implementação desta solução foi aplicada utilizando a equação 1, a seguir:

$$\bar{p} = \frac{6\bar{x}(1 - \bar{x})}{(\bar{h}_0 + 1 - \bar{x})^2(1 + 2\bar{h}_0)} \quad (1)$$

Então, a partir da equação 2 foi possível calcular o campo de pressão bidimensional por meio dos métodos de diferenças finitas e volumes finitos, a consideração do escoamento lateral introduz o termo λ , que representa a razão entre as dimensões do mancal, no plano bidimensional.

$$\frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left[\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} \right] + \lambda^2 \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left[\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{z}} \right] = \frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{x}} \quad (2)$$

Sendo assim, através do método de Gauss-Siedel foi possível obter o campo de pressão. A acurácia dos métodos numéricos foi verificada comparando-se o caso unidimensional ($\lambda = 0$) com a solução analítica. É importante mencionar, que para os cálculos finais em conjunto com a equação de energia, utilizamos a equação de Reynolds generalizada de acordo com Dowson (1962).

2.2 Gradientes de Velocidade

A partir da solução da equação de Reynolds, os gradientes de velocidade foram determinados por meio da Equação 3, apresentada por Hamrock *et al.* (2004).

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{2y - h}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{u_b - u_a}{h}; \quad \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{2y - h}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{w_b - w_a}{h} \quad (3)$$

Já para o cálculo da velocidade na direção da espessura do filme de fluido, foi necessária a utilização da equação de continuidade (Eq. 4) em conjunto com o método de Gauss-Siedel para diferenças finitas.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

2.3 Solução da Equação de Energia Acoplada

Para a solução da equação de energia acoplada, através da literatura (Patankar (1980) e Versteeg and Malalasekera (1995)) determinamos que a discretização mais adequada é o método Power Law (método de Patankar), o que permite uma simulação com maior acurácia independente da direção de escoamento do fluido. A equação a seguir foi solucionada através do método de Gauss-Siedel em uma esquematização em volumes finitos.

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \mu \Phi \quad (5)$$

Como a viscosidade é um fator importante nos fluidos lubrificantes, a solução leva em conta as mudanças nos seus valores de acordo com a temperatura, portanto também fazendo parte do processo iterativo. em conjunto com o termo de dissipação viscosa (Φ), de acordo com Vieira (2014). Desta forma, foram realizadas sucessivas simulações, cada uma desprezando diferentes termos dentro da equação de dissipação viscosa a seguir:

$$\Phi = 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (6)$$

3 Resultados

3.1 Solução da Equação de Reynolds

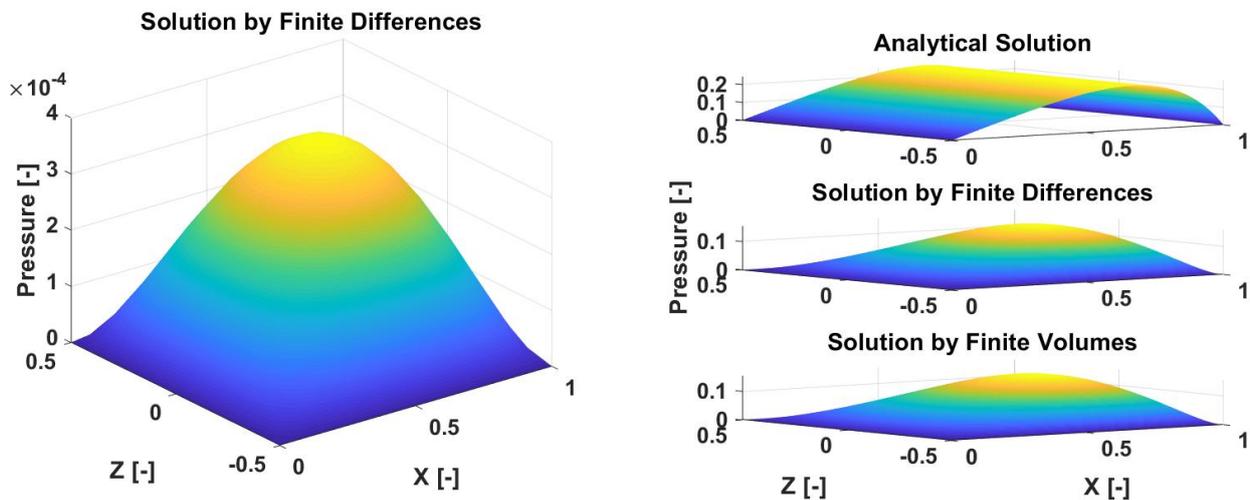


Figura 1: Solução da equação de Reynolds por diferenças finitas (esquerda) Comparação entre diferentes soluções (direita).

Para as soluções da equação de Reynolds, comparamos os resultados obtidos através da solução analítica, do método de diferenças finitas e do método de volumes finitos. A Fig. 1 mostra estes resultados e pode ser observado que para malhas refinadas ambos os métodos de discretização fornecem os mesmos resultados. Como mencionado na metodologia, uma forma de verificar a acuracia das soluções numéricas é compara-las com a solução analítica quando excluimos a influencia da direção z (quando $\lambda = 0$). Essa verificação pode ser observada na Fig. 2, mostrando convergência para todos os pontos nas três soluções.

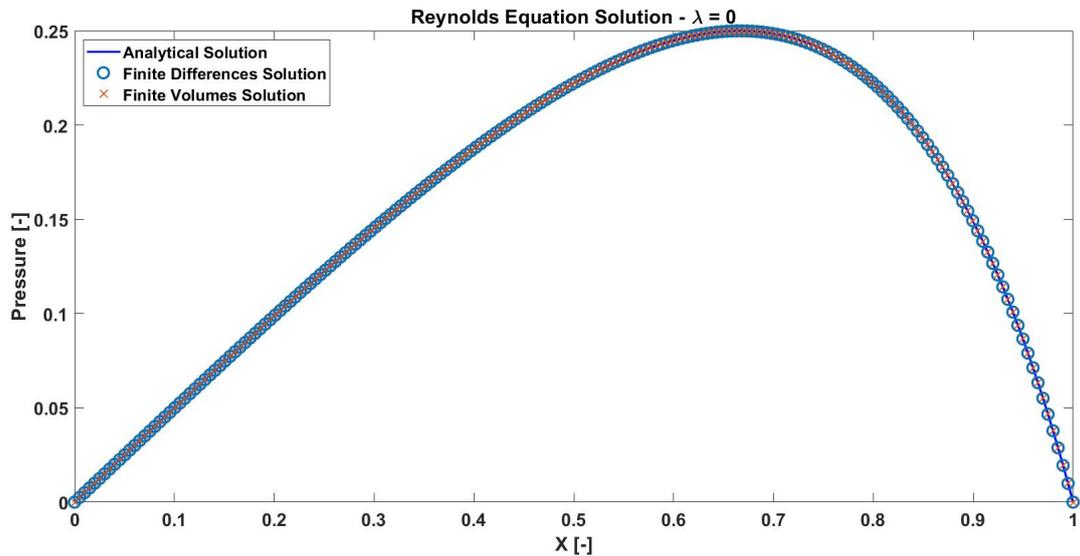


Figura 2: Comparação entre soluções quando $\lambda = 0$.

3.2 Gradientes de Velocidade

Com as Eq. 3 e Eq. 4 nós calculamos os gradientes de velocidade nos planos XZ e XY , conforme a Fig. 3. No plano XZ é possível verificar o vazamento de fluido lubrificante pelas bordas e no plano XY a direção do escoamento. É notável que, na Figura 3, a velocidade na direção Y foi multiplicada por 10^6 para fins de visualização, evidenciando sua baixa magnitude em comparação com as outras componentes. Também observamos problemas de convergência na borda direita da malha. Para corrigir os resultados, seria necessário a aplicação de diferenças finitas de alta ordem. Dado que a magnitude deste gradiente de velocidade é muito baixa, ele foi considerado desprezível na análise, uma abordagem alinhada com a literatura e que mantém o foco do trabalho.

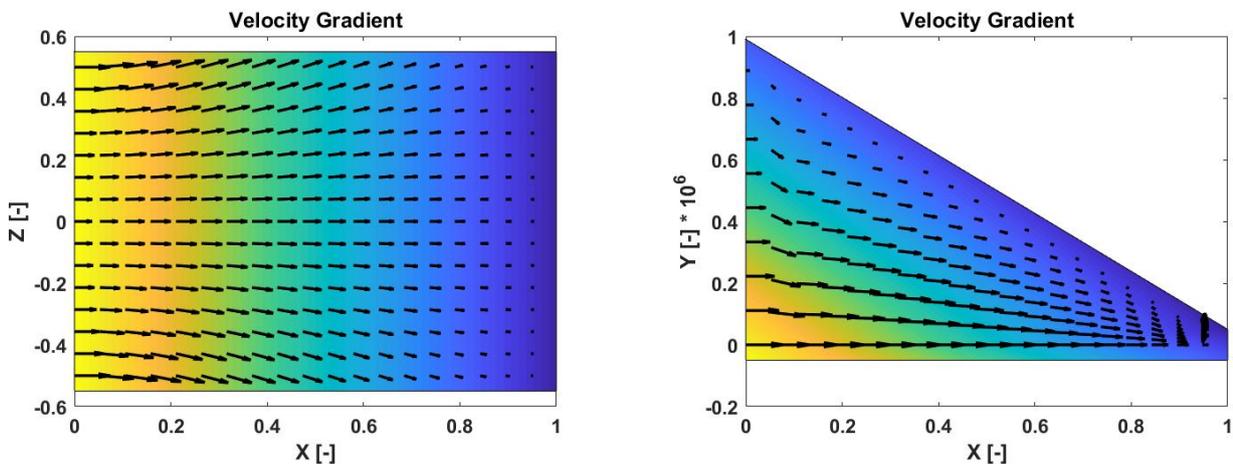


Figura 3: Gradientes de velocidade nos planos XZ (esquerda) e XY (direita).

3.3 Solução da Equação de Energia

Para os primeiros resultados utilizamos a simplificação do termo de dissipação viscosa utilizada na tese do Vieira (2014), considerando apenas o quadrado das derivadas dos campos de velocidade em X e Z pela coordenada y . De acordo com a Fig 4, obtivemos os resultados da distribuição da temperatura para os planos XZ e XY considerando uma fatia no centro dos planos que não são visíveis em cada gráfico. No plano XZ há um aumento da temperatura na direção do fluxo de lubrificante e no plano XY um aumento próximo à rampa devido ao esmagamento do fluido, ambos resultados aproximados com o esperado da literatura. Como condições de contorno, foram consideradas superfícies adiabáticas para o mancal, e temperatura prescrita de $20\text{ }^\circ\text{C}$ tanto na face inferior (eixo) quanto na entrada do fluido.

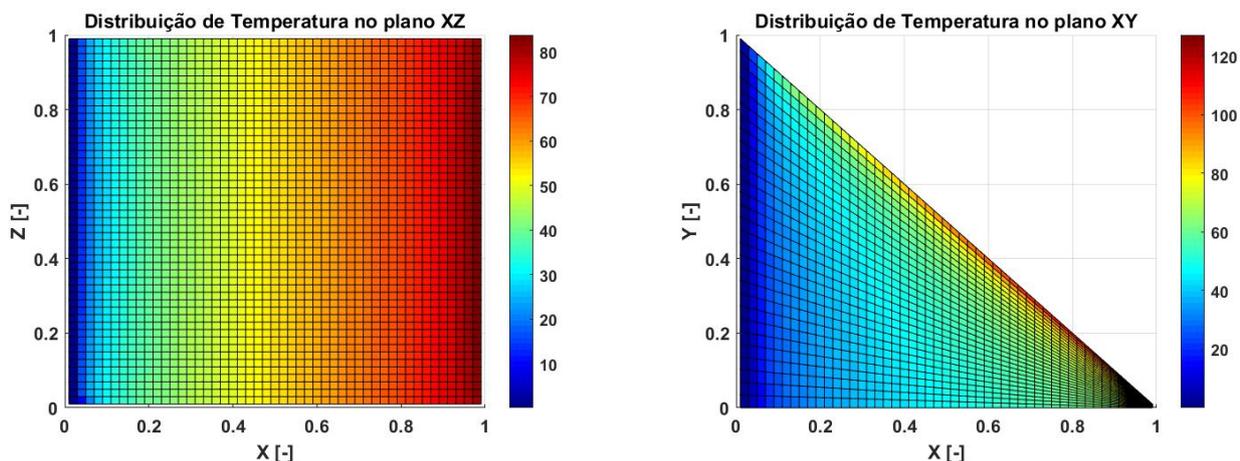


Figura 4: Distribuição de temperatura nos planos XZ (esquerda) e XY (direita).

4 Conclusões

O cálculo numérico da equação de Reynolds foi verificado com a sua solução analítica e foi possível garantir a sua acurácia para a posterior utilização dos resultados no cálculo dos gradientes de velocidade. No cálculo dos gradientes, é possível verificar a influência do campo de pressão calculado, sendo que na Fig. 3 observamos o escoamento que vaza nas bordas do mancal, e o fluxo na direção do escoamento, com a rampa esmagando o fluido. Com relação ao campo de velocidades na direção da espessura do fluido, como mencionado anteriormente, há um erro de convergência na borda direita da malha, o qual podemos desprezar devido ao valor muito baixo (ordem de 10^{-6}) deste gradiente de velocidade, algo que boa parte da literatura disponível já realiza.

Os resultados preliminares da equação de energia, embora demonstrem tendências físicas consistentes com o esperado, indicam a necessidade de ajustes no modelo numérico. A principal divergência observada é que a temperatura na fronteira de entrada não converge para o valor de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ prescrito na condição de contorno. Notamos que o erro se torna ainda maior quando consideramos todos os termos dentro da equação de dissipação viscosa. Investiga-se que estas divergências possam ser causadas por instabilidades numéricas ou por inconsistências na implementação da discretização e da adimensionalização das equações. Para que fosse possível garantir a convergência no método Gauss-Siedel para a equação de energia, foi necessária a utilização de um fator de sub-relaxação de 0.2 para garantir a convergência. Os ajustes no código estão em andamento para a consolidação dos resultados que serão apresentados no relatório final desta pesquisa.

Referências

- Dowson, D., 1962. "A generalized reynolds equation for fluid-film lubrication". *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 4, No. 2, pp. 159–170.
- Hamrock, B., Schmid, S. and Jacobson, B., 2004. *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*. 2nd edition.
- Patankar, S., 1980. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Taylor & Francis, London.
- Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., 1995. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Longman Ltd., London.
- Vieira, L.C., 2014. *Análise de um modelo Termohidrodinâmico para Mancais Axiais*. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP, Brasil. Orientadora: Prof. Dr. Katia Lucchesi Cavalca Dedini.