

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Aplicação do Método de Diferenças Finitas
para Análise do Desempenho Operacional de
Mancais Radiais Hidrodinâmicos**

Autor: Antônio Edson de Castro Lima
Orientador: Prof. PhD. Vilmar Arthur Schwarz
Co-orientador: Prof. Dr. André Garcia Chiarello

Itajubá, MG, dezembro de 2012

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Aplicação do Método de Diferenças Finitas
para Análise do Desempenho Operacional de
Mancais Radiais Hidrodinâmicos**

Autor: Antonio Edson de Castro Lima

Orientador: Prof. PhD. Vilmar Arthur Schwarz

Co-orientador: Prof. Dr. André Garcia Chiarello

Curso: Mestrado em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Projeto e Fabricação

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

ITAJUBÁ, dezembro de 2012
MG, BRASIL

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

L732a

Lima, Antonio Edson de Castro

Aplicação do Método de Diferenças Finitas para análise de desempenho operacional de mancais radiais hidrodinâmicos / Antonio Edson de Castro Lima. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2012.
117 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Vilmar Arthur Schwarz.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Lubrificação hidrodinâmica. 2. Equação de Reynolds. 3. Mancal radial cilíndrico. 4. Mancal de dois lóbulos. 5. Método de Diferenças Finitas. I. Schwarz, Vilmar Arthur, orient. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Aplicação do Método de Diferenças Finitas
para Análise do Desempenho Operacional de
Mancais Radiais Hidrodinâmicos**

Autor: Antonio Edson de Castro Lima

Orientador: Prof. PhD. Vilmar Arthur Schwarz

Co-orientador: Prof. Dr. André Garcia Chiarello

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci – UNESP/GUAR

Prof. Dr. Genésio José Menon - IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Marcos Theiss Neves - IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Vilmar Arthur Schwarz (Orientador)

Dedicatória

Walter Paes de Lima, in memoriam, meu amado pai;

Benedita de Castro Lima, minha querida mãe;

Fábio e Filipe, meus filhos queridos;

Meus dez irmãos, meus amigos;

Meus 51 sobrinhos, meus descendentes;

E a uma nova estrela Fleming brilhando muito perto...

Agradecimentos

Ao meu ORIENTADOR professor Vilmar Arthur Schwarz pela amizade, ensinamento, dedicação e empenho;

Ao CO-ORIENTADOR professor Dr. André Garcia Chiarello, aos professores Marcos Moura Galvão e Rodrigo Barbosa da Fonseca e Albuquerque pela colaboração;

Aos professores do IEM, e ao funcionário Messias Tadeu Salgado, pela ajuda na confecção de desenhos;

Aos colegas de mestrado e doutorado, Adriana Amaro Diacenco, Alberto Cardoso Almeida, Aureliano Rodrigues Barborati Ribeiro, Exdras Devys Alves Moura, Felipe de Souza Eloy, Leonardo Albergaria Oliveira, Júlio César Silva de Souza, Luciana Bernardo Justino, Luís Guilherme Cunha Santos, Janaína Cunha Vaz Albuquerque, e Nancy Del Ducca Barbedo, pelo convívio nesse período;

A CAPES e FAPEMIG pelo apoio às publicações em congressos nacionais e internacionais;

A UNIFEI.

Se estudar é viver, vamos continuar estudando!

Resumo

Castro Lima, A. E. de (2012), *Aplicação do Método de Diferenças Finitas para Análise do Desempenho Operacional de Mancais Radiais Hidrodinâmicos*, Itajubá, 117p. (Mestrado em Projeto e Fabricação) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Neste trabalho é apresentado um modelo teórico para analisar o comportamento operacional de mancais radiais hidrodinâmicos operando com lubrificantes newtonianos e não-newtonianos usando o modelo exponencial (*power-law*). A equação de Reynolds da lubrificação hidrodinâmica para fluidos newtonianos e modificada para fluidos não-newtonianos modelo *power-law* é resolvida através do método de diferenças finitas e do esquema de sobre-relaxação sucessiva. No modelo teórico são considerados os efeitos das temperaturas do óleo lubrificante de suprimento e de recirculação para a determinação da temperatura média efetiva do filme de óleo que é realizada através de um procedimento iterativo, cujo critério de parada é a sua convergência, ou seja, o estabelecimento da condição de operação em regime. Um programa computacional foi desenvolvido (FORTRAN), para simular o comportamento operacional de mancais radiais operando com lubrificantes do tipo pseudoplástico ($n < 1$) e dilatante ($n > 1$), bem como um óleo mineral comum, ou seja, fluido newtoniano ($n = 1$). Foi feito um estudo inicial de um mancal de dois lóbulos, também chamado de mancal limão, para o qual foram desenvolvidas equações exatas e simplificadas de grande precisão para determinação da espessura do filme de óleo nos dois lóbulos do mancal. Isto possibilitou obter a solução da equação bidimensional de Reynolds, mediante aplicação do método de diferenças finitas, obtendo-se então a distribuição de pressão em ambos os lóbulos e alguns parâmetros de desempenho do mancal.

Palavras-chave:

Lubrificação hidrodinâmica, Equação de Reynolds, Mancal radial cilíndrico, Mancal de dois lóbulos, Método de diferenças finitas.

Abstract

Castro Lima, A. E. de (2012), Application of the Finite Difference Method to the Analysis of Operating Performance of Hydrodynamic Journal Bearings, Itajubá, 117p. (MSc em Projeto e Fabricação) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

A theoretical model to analyze the operational performance of hydrodynamic thrust bearings operating with Newtonian and non-Newtonian lubricants using the exponential model (power-law) is presented. The Reynolds equation of hydrodynamic lubrication modified for non-newtonian fluids model *power-law* is solved by finite difference method and the successive over-relaxation scheme. An iterative procedure is employed for determining the average oil film temperature, by taking into account the effect of the lubricating oil supply and the recirculation oil temperatures. The stop criterion is the convergence of the iterative procedure, that is, the establishment of the thermal equilibrium condition between the heat generation within the bearing and the heat dissipation. Based on this theoretical model a computer program was developed, in FORTRAN language, to simulate the operational behavior of journal bearings operating with lubricants of different rheological characteristics, i.e. pseudoplastic and dilatant, as well as a common mineral oil (newtonian fluid). An initial study of a two lobes journal bearing, also called lemon bearing, was developed. Exact and simplified high precision equations were developed for determining the oil film thicknesses in the two bearing lobes, enabling the solution of the two-dimensional Reynolds equation. The finite difference method was applied for obtaining the pressure distribution in both lobes and some performance parameters of the bearing.

Keywords:

Hydrodynamic lubrication, Reynolds equation, cylindrical journal bearings, two lobe bearings, finite difference method.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
SUMÁRIO.....	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xiv
SIMBOLOGIA	xvi
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Princípios básicos da lubrificação hidrodinâmica	2
1.2.1 Cunha de óleo e pressão hidrodinâmica	2
1.2.2 Consistência do filme de óleo e perfis de velocidade.....	4
1.3 Objetivos principais.....	4
CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA	6
CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO TEÓRICO	11
3.1. Modelo físico.....	11
3.2. Equação de Reynolds para lubrificantes de diferentes índices de característica reológica ...	14
3.3. Discretização por diferenças finitas da Equação de Reynolds	17
CAPÍTULO 4 – PARÂMETROS DE DESEMPENHO DO MANCAL	21
4.1. Introdução.....	21
4.2. Capacidade de carga adimensional.....	22
4.3. Ângulo de atitude ou posição angular da espessura mínima do filme de óleo.....	25
4.4. Número de Sommerfeld.....	25
4.5. Força de atrito e Coeficiente de atrito	25
4.6. Perda de Potência.....	28
4.7. Vazões de lubrificante	29

4.8. Elevação de temperatura do óleo lubrificante e temperatura média do filme	32
4.9. Pressão máxima adimensional e posição angular correspondente	35
CAPÍTULO 5 – ESTUDO PRELIMINAR SOBRE MANCAIS RADIAIS HIDRODINÂMICOS DE DOIS LÓBULOS.....	36
5.1. Introdução.....	36
5.2. Modelo físico.....	38
5.3. Desenvolvimento teórico.....	39
5.3.1. Espessura do filme de óleo	39
5.3.2. Dedução das fórmulas	41
CAPÍTULO 6 – RESULTADOS, CONCLUSÕES E SUGESTÕES	43
6.1 Dados dos mancais radiais hidrodinâmicos.....	43
6.2 Distribuição de pressão.....	44
6.2.1 Análise comparativa da distribuição de pressões	44
6.3 Parâmetro de desempenho do mancal	52
6.3.1 Análise comparativa dos parâmetros de desempenho	52
6.3.2 Análise complementar sobre a variação da folga radial do mancal nos parâmetros de desempenho	92
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	96
7.1 Conclusões.....	96
7.2 Sugestões para trabalhos futuros	97
7.3 Contribuições do presente trabalho	98
CAPÍTULO 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
APÊNDICE A – CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS PRINCIPAIS DOS FLUÍDOS LUBRIFICANTES.....	103
APÊNDICE B – MÉTODO ITERATIVO PARA DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA DO FILME DE ÓLEO	109
APÊNDICE C – ANÁLISE COMPARATIVA DE CONDIÇÕES DE CONTORNO	113
APÊNDICE D – DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO ADIMENSIONAL.....	114

Lista de Figuras

Figura 1.1 Conjunto mancal-munhão	1
Figura 1.2 Princípio básico de funcionamento de um mancal radial hidrodinâmico	3
Figura 3.1 Filme de óleo e principais parâmetros de funcionamento de um mancal radial hidrodinâmico	11
Figura 3.2 Distribuição de pressão, P , no filme de óleo, na seção média, $z = L/2$ e componentes de carga	13
Figura 3.3 Distribuição de pressões e condições de contorno (a) Distribuição de pressões no plano médio do mancal, $z = L/2$; (b) Condições de contorno no "plano desenvolvido"; (c) Distribuição de pressões no plano (θ, z)	16
Figura 3.4 Malha de discretização por diferenças finitas para a equação de Reynolds	18
Figura 4.1 Nomenclatura da função $y = f(x)$ para aplicação da regra de Simpson	22
Figura 4.2 Componentes de vazão de lubrificante e temperaturas correspondentes	29
Figura 5.1 Comparação entre mancal cilíndrico e mancal de dois lóbulos	37
Figura 5.2 Filme de óleo e principais parâmetros de funcionamento de um mancal limão	39
Figura 5.3 Variação das espessuras adimensionais de filme de óleo nos dois lóbulos	41
Figura 6.1 Pressão adimensional \bar{P} : plano axial (Kasai et al.)	45
Figura 6.2 Pressão adimensional \bar{P} : plano axial (Kasai et al.)	45

Figura 6.3 Pressão adimensional \bar{P} : plano axial (Gertzos et al.)	47
Figura 6.4 Pressão adimensional \bar{P} : plano radial (Gertzos et al.)	47
Figura 6.5 Pressão adimensional \bar{P} : plano axial ($\varepsilon=0,7; n=0,8; L/D=0,75$)	48
Figura 6.6 Pressão adimensional \bar{P} : plano radial ($\varepsilon=0,7; n=0,8; L/D=0,75$)	48
Figura 6.7 Pressão adimensional \bar{P} : plano axial ($\varepsilon=0,7; n=1,0; L/D=0,5$)	49
Figura 6.8 Pressão adimensional \bar{P} : plano radial ($\varepsilon=0,7; n=1,0; L/D=0,5$)	49
Figura 6.9 Pressão adimensional \bar{P} : plano axial ($\varepsilon=0,7; n=1,1; L/D=0,5$)	50
Figura 6.10 Pressão adimensional \bar{P} : plano radial ($\varepsilon=0,7; n=1,1; L/D=0,5$)	50
Figura 6.11 Pressão adimensional \bar{P} : plano axial ($\varepsilon=0,7; n=0,8; L/D=1,0$)	51
Figura 6.12 Pressão adimensional \bar{P} : plano radial ($\varepsilon=0,7; n=0,8; L/D=1,0$)	51
Figura 6.13 Número de Sommerfeld, S , versus ε ; $n=0,8, N=1500$ rpm, $c=0,1$ mm	67
Figura 6.14 Temperatura média, T_m , versus ε ; $n=0,8, N=1500$ rpm, $c=0,1$ mm	68
Figura 6.15 Temperatura média, T_m , versus ε ; $n=1,0, N=1500$ rpm, $c=0,1$ mm	68
Figura 6.16 Temperatura média, T_m , versus ε ; $n=1,1, N=1500$ rpm, $c=0,1$ mm	69
Figura 6.17 Pressão máxima adimensional, \bar{P}_{max} , versus ε ; $n=0,8, N=1500$ rpm	70
Figura 6.18 Pressão máxima adimensional, \bar{P}_{max} , versus ε ; $n=1,0, N=1500$ rpm	70
Figura 6.19 Pressão máxima adimensional, \bar{P}_{max} , versus ε ; $n=1,1, N=1500$ rpm	71
Figura 6.20 Pressão máxima dimensional, \bar{P}_{max} , versus ε ; $n=0,8, N=1500$ rpm	71
Figura 6.21 Pressão máxima dimensional, \bar{P}_{max} , versus ε ; $n=1,0, N=1500$ rpm	72
Figura 6.22 Pressão máxima dimensional, \bar{P}_{max} , versus ε ; $n=1,1, N=1500$ rpm	72

Figura 6.23 Vazão de entrada adimensional, \bar{Q}_t , versus ε ; $n=1,0$, $N=1500$ rpm	73
Figura 6.24 Vazão lateral, Q_L [ml/min], versus ε ; $n=0,8$, $N=1500$ rpm, $c=0,1$ mm	74
Figura 6.25 Capacidade de carga adimensional, \bar{F} , versus ε ; $n=0,8$, $N=1500$ rpm	75
Figura 6.26 Capacidade de carga adimensional, \bar{F} , versus ε ; $n=1,0$; $N=1500$ rpm	75
Figura 6.27 Capacidade de carga adimensional, \bar{F} , versus ε ; $n=1,1$; $N=1500$ rpm	76
Figura 6.28 Capacidade de carga, F [kN], versus ε ; $n=0,8$, $N=1500$ rpm	76
Figura 6.29 Capacidade de carga, F [kN], versus ε ; $n=1,0$, $N=1500$ rpm	77
Figura 6.30 Capacidade de carga, F [kN], versus ε ; $n=1,1$, $N=1500$ rpm	77
Figura 6.31 Ângulo de atitude, ϕ , versus ε ; $n=0,8$, $N=1500$ rpm, $c=0,1$ mm, $T_s=35^\circ\text{C}$	78
Figura 6.32 Força de atrito adimensional, \bar{F}_a , versus ε ; $L/D=1,0$, $N=1500$ rpm	79
Figura 6.33 Força de atrito, F_a [N], versus ε ; $n=0,8$, $N=1500$ rpm, $c=0,1$ mm	79
Figura 6.34 Força de atrito, F_a [N], versus ε ; $n=1,0$, $N=1500$ rpm, $c=0,1$ mm	80
Figura 6.35 Força de atrito, F_a [N], versus ε ; $n=1,1$, $N=1500$ rpm, $c=0,1$ mm	80
Figura 6.36 Vasões adimensionais, $\bar{Q}_t, \bar{Q}_L, \bar{Q}_{rec}$, versus ε ; para $L/D=1,0$, $c=0,1$ mm	81
Figura 6.37 Perda de potência, ΔPot [kW], versus ε ; $N=1500$ rpm; $c=0,1$ mm	81
Figura 6.38 Capacidade de carga adimensional, \bar{F} , versus ε ; $N=1500$ rpm; $L/D=1,0$	82
Figura 6.39 Capacidade de carga, F [kN], versus ε ; $N=1500$ rpm; $L/D=1,0$; $n=1,0$	83
Figura 6.40 Pressão máxima adimensional, \bar{P}_{max} , versus ε ; $n=1,0$, $N=1500$ rpm	83
Figura 6.41 Pressão máxima, P [MPa], versus ε ; $N=1500$ rpm; $L/D=1,0$	84

Figura 6.42 Força de atrito adimensional, $\bar{F}a$, versus ε para $N=1500$ rpm; $L/D=1,0$	84
Figura 6.43 Força de atrito, Fa [N], versus ε para $N=1500$ rpm; $L/D=1,0$; $n=1,0$	85
Figura 6.44 Elevação de temperatura do filme de óleo, ΔT [°C], versus ε ; $N=1500$ rpm	85
Figura 6.45 Vazão lateral, Q_L [ml/min], versus ε ; $N=1500$ rpm; $L/D=1,0$; $n=1,0$	86
Figura 6.46 Pressão adimensional, \bar{P} , e Pressão, P [MPa], versus ε ; $N=1500$ rpm	86
Figura 6.47 Capacidade de carga adimensional, \bar{F} , e dimensional, F , versus ε	87
Figura 6.48 Força de atrito $\bar{F}a$ e Fa [N], versus ε ; $N=1500$ rpm; $L/D=1,0$; $n=1,0$	87
Figura 6.49 Viscosidade absoluta, μ , e absoluta adimensional, \bar{m} , versus ε ; $N=1500$ rpm	88
Figura 6.50 Temperatura média, T_m [°C], versus ε ; $c=0,1$ mm; $L/D=1,0$; $n=1,0$	88
Figura 6.51 Vazão, Q_L [ml/min], versus ε ; $L/D=1,0$; $n=1,0$; $c=0,1$ mm, $T_s=35$ °C	89
Figura 6.52 Força de atrito adimensional, $\bar{F}a$, versus ε ; $c=0,1$ mm; $L/D=1,0$; $n=1,0$	89
Figura 6.53 Força de atrito, Fa [N], versus ε ; $c=0,1$ mm; $L/D=1,0$; $n=1,0$	90
Figura 6.54 Distribuição de pressão adimensional, \bar{P} , versus posição angular, θ , $n=0,8$	90
Figura 6.55 Distribuição de pressão adimensional, \bar{P} , versus posição angular, θ , $n=1,0$	91
Figura 6.56 Distribuição de pressão adimensional, \bar{P} , versus posição angular, θ , $n=1,1$	91
Figura 6.57 Distribuição de pressão adimensional, \bar{P} , versus posição axial, j	92
Figura 6.58 Espessura adimensional H e distribuição de pressão \bar{P} versus posição nodal	94
Figura 6.59 Distribuição de Pressão \bar{P} para lubrificante pseudoplástico, newtoniano e dilatante	95

Figura A.1 Tensão de cisalhamento, τ , versus taxa de deformação $\partial u/\partial y$	105
Figura A.2 Comportamento da viscosidade em função da variação de temperatura para: A - óleo mineral comum; B - óleo mineral com um aditivo aumentador do índice de viscosidade; C - óleo sintético a base de silicone	107
Figura A.3 Viscosidade versus taxa de deformação para fluido lubrificante newtoniano	108
Figura A.4 Viscosidade versus taxa de deformação para lubrificantes não-newtonianos: (a) pseudoplástico; (b) dilatante	108
Figura B.1 Diagrama de blocos do procedimento iterativo	112
Figura C.1 Distribuição de \bar{P} segundo condição de contorno de Reynolds	113
Figura C.2 Distribuição de \bar{P} segundo condição de Sommerfeld	113

Lista de Tabelas

Tabela 6.1	Distribuição de pressão p : $\varepsilon = 0,87$; $n = 1$; $L/D = 0,8$; Malha (361x57) nós (Kasai et al.)	45
Tabela 6.2	Distribuição de pressão p : $\varepsilon = 0,7$; $n = 1$; $L/D = 1$; Malha (361x57) nós (Gertzos et al.)	47
Tabela 6.3	Distribuição de pressão p : $\varepsilon = 0,7$; $n = 1$; $L/D = 0,5$; Malha (361x57) nós	48
Tabela 6.4	Distribuição de pressão p : $\varepsilon = 0,7$; $n = 0,8$; $L/D = 0,5$; Malha (361x57) nós	49
Tabela 6.5	Distribuição de pressão p : $\varepsilon = 0,7$; $n = 1,1$; $L/D = 0,5$; Malha (361x57) nós	50
Tabela 6.6	Distribuição de pressão p : $\varepsilon = 0,7$; $n = 0,8$; $L/D = 1$; Malha (361x57) nós	51
Tabela 6.7	Comparação dos parâmetros de desempenho com outros autores	52
Tabela 6.8	Parâmetros de desempenho: $L/D = 0,25$, $n = 0,8$ $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$	54
Tabela 6.9	Parâmetros de desempenho: $L/D = 0,25$, $n = 1,0$ $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$	55
Tabela 6.10	Parâmetros de desempenho: $L/D = 0,25$, $n = 1,1$ $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$	56
Tabela 6.11	Parâmetros de desempenho: $L/D = 0,50$, $n = 0,8$ $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$	57
Tabela 6.12	Parâmetros de desempenho: $L/D = 0,50$, $n = 1,0$ $N = 1500$ rpm, $c = 0,05$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$	58

Tabela 6.13	Parâmetros de desempenho: $L/D = 0,50$, $n = 1,1$ $N = 1500$ rpm, $c = 0,15$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$	59
Tabela 6.14	Parâmetros de desempenho: $L/D = 1,0$, $n = 0,8$ $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$	60
Tabela 6.15	Parâmetros de desempenho: $L/D = 1,0$, $n = 1,0$ $N = 1500$ rpm, $c = 0,05$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$	61
Tabela 6.16	Parâmetros de desempenho: $L/D = 1,0$, $n = 1,1$ $N = 1500$ rpm, $c = 0,10$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$	62
Tabela 6.17	Parâmetros de desempenho: $L/D = 1,0$, $n = 1,0$ $N = 1500$ rpm, $c = 0,10$ mm, $T_s = 45^\circ\text{C}$	63
Tabela 6.18	Parâmetros de desempenho: $L/D = 1,0$, $n = 1,0$ $N = 1500$ rpm, $c = 0,10$ mm, $T_s = 55^\circ\text{C}$	64
Tabela 6.19	Parâmetros de desempenho: $L/D = 1,0$, $n = 1,0$ $N = 1500$ rpm, $c = 0,05$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$	65
Tabela 6.20	Parâmetros de desempenho: $L/D = 1,0$, $n = 1,0$ $N = 1500$ rpm, $c = 0,15$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$	66
Tabela 6.21	Dados técnicos do óleo lubrificante	92
Tabela 6.22	Parâmetros de comportamento do mancal para três folgas radiais, $F \cong 21$ kN, $N = 1500$ rpm, $T_s = 35^\circ\text{C}$, $L/D = 1$, $n = 1$, óleo ISO 22	93
Tabela 6.23	Parâmetros de comportamento do mancal para três folgas radiais, $F \cong 21$ kN, $N = 1500$ rpm, $T_s = 35^\circ\text{C}$, $L/D = 1$, $n = 1$, óleo ISO 32	93
Tabela 6.24	Parâmetros de comportamento do mancal para três folgas radiais, $F \cong 21$ kN, $N = 1500$ rpm, $T_s = 35^\circ\text{C}$, $L/D = 1$, $n = 1$, óleo ISO 46	93
Tabela D.1	Distribuição de pressão adimensional para $\varepsilon = 0,7$ $N = 1500$ rpm, $c = 0,10$ mm, $L/D = 1,0$, $T_s = 35^\circ\text{C}$	114

Simbologia

a	Fator de pré-carga usada no mancal limão	[mm]
b	Número de intervalos da malha na direção circunferencial	
c	Folga radial no mancal cilíndrico	[mm]
c	Pré-carga no mancal limão	[mm]
C_p	Calor específico do óleo lubrificante	[J/kg°C]
A_i, B_i, C_i	Constantes para cálculo das pressões adimensionais	
D	Diâmetro interno do mancal	[mm]
d	Diâmetro do munhão	[mm]
Den1, Den2	Denominadores usados na discretização da Equação de Reynolds	
E	Constante para a equação de Walther	
e	Excentricidade operacional do munhão	[μm]
F	Capacidade de carga ou carga aplicada	[N]
\bar{F}	Capacidade de carga adimensional	
f	Coefficiente de atrito	
Fa	Força de atrito	[N]
$\bar{F}a$	Força de atrito adimensional	
Fr	Componente radial da capacidade de carga	[N]
$\bar{F}r$	Componente radial adimensional da capacidade de carga	
Ft	Componente tangencial da capacidade de carga	[N]
$\bar{F}t$	Componente tangencial adimensional da capacidade de carga	
h	Espessura do filme de óleo	[mm]
h_0	Espessura mínima do filme de óleo	[mm]
H	Espessura adimensional do filme	
i, j	Índices representativos indicando o número de pontos na direção radial e axial	
k	Contador usado no método de Simpson	
K_A, K_B	Características do óleo para a equação de Walther	
L	Largura axial do mancal	[m]
m	Viscosidade absoluta do óleo	[Pa.s ⁿ]
\bar{m}	Viscosidade absoluta adimensional	
m_g	Viscosidade do óleo lubrificante sem referência de temperatura	[Pa.s ⁿ]

m_s	Viscosidade absoluta do óleo à temperatura de referência	[Pa.s ⁿ]
m_1, m_2	Viscosidades absolutas às temperaturas T_1 e T_2	[Pa.s ⁿ]
n	Índice de característica reológica do lubrificante	
nf	Número de faixas para integração de Simpson	
N	Velocidade de rotação do munhão	[rpm]
P	Pressão específica do mancal = $F/(LD)$	[Pa]
p	Pressão do filme de óleo	[Pa]
\bar{p}	Pressão adimensional do filme de óleo	
\bar{p}_{max}	Pressão adimensional máxima do filme de óleo	
\bar{p}_{ij}^{pr}	Pressões na iteração anterior usada no método de Gauss-Seidel	
$\bar{p}_{i,j}$	Pressão adimensional no ponto (i, j) da malha computacional	
Q_L	Vazão lateral (ou axial) de lubrificante	[m ³ /s]
\bar{Q}_L	Vazão lateral adimensional	
Q_{rec}	Vazão de recirculação (ou circunferencial de saída)	[m ³ /s]
\bar{Q}_{rec}	Vazão de recirculação adimensional	
Q_s	Vazão de suprimento	[m ³ /s]
Q_t	Vazão total (ou circunferencial de entrada)	[m ³ /s]
\bar{Q}_t	Vazão total adimensional	
R	Raio do mancal	[m]
b	Número de intervalos da malha na direção circunferencial	
S	Número de Sommerfeld	
t	Número de intervalos da malha na direção axial	
T	Temperatura do filme de óleo	[°C]
T_m	Temperatura média do filme lubrificante	[°C]
T_{mist}	Temperatura da mistura de óleo	[°C]
T_{rec}	Temperatura de recirculação do óleo	[°C]
T_s	Temperatura do óleo de suprimento	[°C]
u	Componente de velocidade na direção x	[m/s]
U	Velocidade tangencial do eixo	[m/s]
v	Componente de velocidade na direção y	[m/s]
w	Componente de velocidade na direção z	[m/s]
W_{ot}	Parâmetro de relaxação do processo iterativo	
x	Coordenada na direção circunferencial (movimento)	

$x_0, x_1, x_2 \dots$	Valores da abscissa x para a regra de Simpson
y	Coordenada da direção radial
$y_0, y_1, y_2 \dots$	Valores da função $y = f(x)$ para aplicação da regra de Simpson
z	Coordenada na direção axial
\bar{z}	Coordenada adimensional na direção axial

Caracteres Gregos

α	Constante do processo iterativo do cálculo da pressão	
δ	Parâmetro genérico da regra de Simpson para direções	
γ		
ΔT	Elevação de temperatura	[°C]
$\overline{\Delta T}$	Elevação de temperatura adimensional	
$\Delta \theta$	Incremento de posição na direção circunferencial	[rd]
Δz	Incremento de posição na direção axial	[μm]
ΔPot	Perda de potência	[W]
$\overline{\Delta Pot}$	Perda de potência adimensional	
ε	Excentricidade específica do munhão	
ϕ	Ângulo de atitude	[grau]
Ψ	Fator de convergência do processo iterativo para o cálculo da pressão	
μ	Viscosidade aparente	[Pa.s]
$\bar{\mu}$	Viscosidade aparente adimensional	
ρ	Massa específica do óleo lubrificante	[kg/m ³]
θ	Ângulo de posição de pressão circunferencial	[grau]
θ_{max}	Posição angular da pressão máxima em relação à linha de centros OO'	[grau]
θ_{Pmax}	Posição angular da pressão máxima em relação à linha de ação de F	[grau]
θ'	Ângulo definido pela região de pressão na condição de contorno de Reynolds ($\pi + \theta'$)	[grau]
σ	Parâmetro de perturbação da expansão em série	
τ	Tensão de cisalhamento do filme lubrificante	[Pa]
ω	Velocidade angular	[rd/s]

Abreviaturas

LIE1	Limite inferior devido a excentricidade 1 (lóbulo 1)
LSE2	Limite superior devido a excentricidade 2 (lóbulo 2)
LICE1E2	Limite comum devido aos lóbulos 1 e 2

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

Mancais são basicamente suportes ou guias de partes móveis, conforme mostrado na Figura 1.1. São elementos essenciais em grande maioria das máquinas e seu bom funcionamento é, portanto, fundamental para o bom desempenho das mesmas. Estando duas superfícies em contato, eixo-mancal, deslocando-se com movimentos relativos, podem surgir problemas tais como atrito e elevação de temperatura excessivos, desgastes, desprendimentos de materiais, etc, podendo ocorrer até o travamento do eixo (munhão) no mancal.

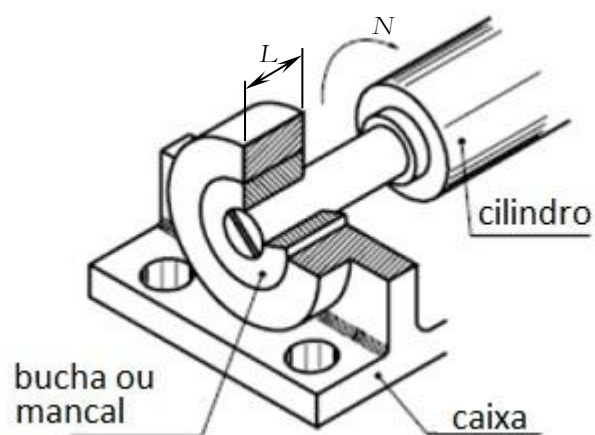


Figura 1.1 Conjunto mancal-munhão (Internet com adaptações)

Para evitar ou reduzir tais problemas, procura-se proporcionar uma lubrificação adequada, com o objetivo de separar as partes metálicas por intermédio de um filme de material lubrificante, que pode ser um dos diversos tipos de óleo ou graxa, existentes no mercado, ou até água ou ar.

Nesta dissertação será considerada a lubrificação hidrodinâmica, na qual a formação de uma película de óleo entre as superfícies do munhão rotativo e da bucha (mancal) depende essencialmente da velocidade de rotação, N , da folga radial do mancal, c , do diâmetro, d , e comprimento, L , do munhão, da carga aplicada, F , e da viscosidade do lubrificante, m .

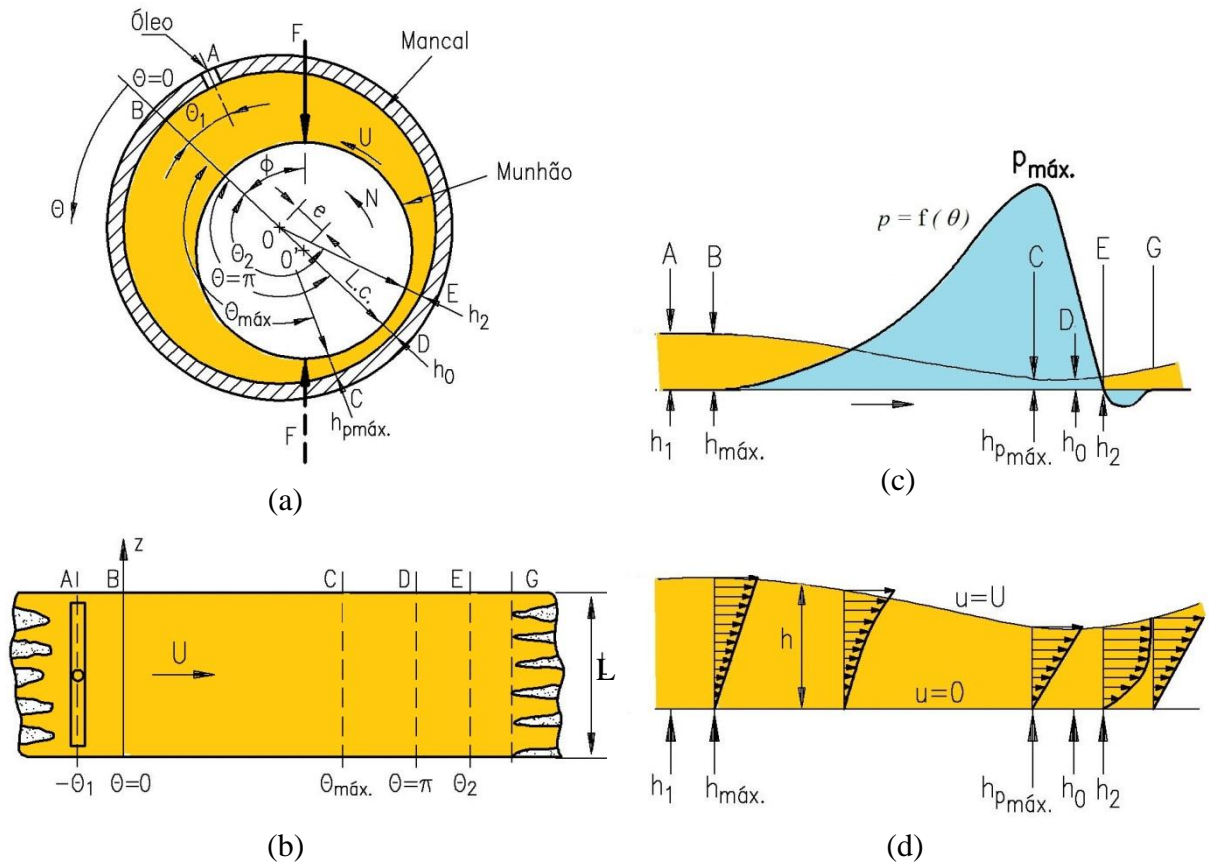
1.2 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA LUBRIFICAÇÃO HIDRODINÂMICA

1.2.1 Cunha de Óleo e Pressão Hidrodinâmica

Na lubrificação hidrodinâmica, após o estabelecimento da condição de operação em regime, o munhão ocupa uma posição excêntrica em relação ao mancal (buchas), conforme mostrado na Figura 1.2a, formando-se a chamada “cunha de óleo” no mancal, desde a posição angular $\theta = 0$ até $\theta = \pi$. Devido à sua propriedade de aderir às superfícies metálicas, o óleo lubrificante é arrastado pela superfície do munhão rotativo para esta cunha convergente, gerando-se a chamada pressão hidrodinâmica no filme de óleo (Figura 1.2c).

Conforme descrito em Pinkus e Sternlicht (1961), se o óleo lubrificante for fornecido ao mancal em uma posição angular θ_1 compreendida entre $\theta = 0$ e $\theta = -\phi$ (Figura 1.2a), o perfil de pressão hidrodinâmica, mostrado na Figura 1.2c, começa em $\theta = 0$, passa por um valor máximo em $\theta = \theta_{max}$ e termina em θ_2 (posição angular de espessura h_2), pouco adiante da posição de espessura mínima, h_0 . Nessa posição, indicada pela letra E na Figura 1.2c, a pressão hidrodinâmica no filme de óleo cai a um valor ligeiramente menor que a pressão nas extremidades laterais do mancal e então aumenta novamente e se torna igual a essa pressão lateral, na posição G. A pressão “negativa” na região EG, é totalmente desprezível em relação às pressões na região BE. Portanto, se a pressão de suprimento, na posição angular θ_1 , for ligeiramente maior do que a pressão nas extremidades laterais do mancal, e desprezando-se a “pressão negativa” na região EG, obtém-se a chamada “condição de contorno de Reynolds”, a qual será utilizada na presente dissertação. Essa condição de contorno encontra-se descrita com mais detalhes no Capítulo 3.

O perfil de pressão hidrodinâmica, $P = f(\theta, z)$, em um mancal radial hidrodinâmico, depende essencialmente da espessura do filme de óleo, h , da velocidade tangencial, U , e da viscosidade absoluta, m , do óleo lubrificante, tendo sido equacionado por Reynolds (1886) através da clássica equação de Reynolds da lubrificação hidrodinâmica.



O - centro do mancal
 O' - centro do munhão
 e - excentricidade, medida na linha de centros, $L.c.$
 N - velocidade de rotação do munhão
 U - velocidade tangencial do munhão
 ϕ - ângulo de atitude
 θ_1 - posição do furo e canal de suprimento de óleo ao mancal

θ - variável angular, a partir da linha de centros, $L.c.$
 $\theta = 0$ - posição de espessura máxima, $h_{m\acute{a}x}$
 $\theta = \pi$ - posição de espessura mínima, h_0
 $\theta_{m\acute{a}x}$ - posição angular de pressão máxima, espessura $h_{p\acute{m}\acute{a}x}$ (ver Figura 1.3)
 θ_2 - posição angular de pressão relativa igual a zero, espessura h_2 (ver Figura 1.3)

Figura 1.2 Princípio básico de funcionamento de um mancal radial hidrodinâmico

- (a) Conjunto mancal - munhão
 (b) Filme de óleo sobre a superfície circunferencial desenvolvida
 (c) Perfil de pressões hidrodinâmica no filme de óleo
 (d) Perfis de velocidade ao longo da espessura do filme de óleo

1.2.2 Consistência do Filme de Óleo e Perfis de Velocidade

Conforme exposto em Pinkus e Sternlicht (1961), o filme de óleo começa efetivamente, ao longo de toda a largura L do mancal, na posição de espessura máxima, na entrada da cunha convergente de óleo, em $\theta = 0$, isto é, na posição B (Figura 1.2 b). Devido ao gradiente desfavorável de pressão na região BC, o escoamento ou vazão consistirá da parcela produzida pelo arraste oriundo da velocidade circunferencial do munhão menos a parcela devida ao gradiente de pressão, caracterizando o perfil de velocidades côncavo da Figura 1.2d. Na posição C, isto é, posição de pressão máxima, resulta $\frac{dp}{d\theta} = 0$ e o escoamento consiste somente do arraste devido à velocidade tangencial U , com o correspondente perfil de velocidades linear mostrado na Figura 1.2d. Na região entre os pontos C e E, o escoamento será composto do arraste mais a parcela devida ao gradiente de pressão, caracterizando o perfil de velocidades convexo da Figura 1.2d. A partir da posição de espessura mínima, h_0 , o espaço entre as superfícies do munhão e do mancal começa a aumentar (cunha divergente). Um volume extra de óleo, impulsionado pelo gradiente de pressão em D, ajuda a preencher o espaço crescente, de modo que a vazão será constituída do arraste circunferencial da superfície do munhão, pouco antes da posição G. A partir daí, o espaço divergente entre as superfícies do munhão e do mancal continua a aumentar e não haverá óleo suficiente para preenchê-lo, de modo que a película de lubrificante se decompõe em estrias de óleo intercaladas com estrias constituídas por ar, vapor e espuma, conforme mostrado esquematicamente na Figura 1.2b. Essa consistência em forma de estrias intercaladas continua ao longo da cunha divergente até a região de alimentação de óleo, reconstituindo-se então o filme completo ao longo da largura L .

1.3 OBJETIVOS PRINCIPAIS

O objetivo principal da presente dissertação é desenvolver um modelo teórico para análise preditiva do comportamento operacional de mancais radiais hidrodinâmicos. Será desenvolvido um programa computacional em linguagem FORTRAN, tomando por base o programa elaborado por Miyazima (1989).

Inicialmente, a equação de Reynolds será resolvida mediante aplicação do método de diferenças finitas, obtendo-se a distribuição de pressões no filme de óleo, a partir da qual os parâmetros de desempenho de um mancal radial serão calculados e apresentados em gráficos e tabelas, tanto na forma adimensional, como é usual na literatura, como também na forma

dimensional, para uma análise mais criteriosa do comportamento do mancal.

Uma das dificuldades para a solução da equação de Reynolds e obtenção dos parâmetros de desempenho do mancal é devida à variação da viscosidade dos óleos lubrificantes com a temperatura, a qual depende da perda de potência, que por sua vez depende da viscosidade. Normalmente, na literatura, a distribuição de pressão e demais parâmetros de comportamento do mancal têm sido apresentados na forma adimensional, em função de alguns parâmetros tais como, velocidade de rotação, dimensões principais e folga radial do mancal, e ainda em função de uma viscosidade do óleo, geralmente sem qualquer referência à temperatura do mesmo. Em muitos casos não é feita nenhuma especificação do óleo utilizado, como por exemplo, em Singh e Gupta (1982). Isso impossibilita a obtenção do parâmetro efetivo (dimensional) correspondente.

No presente trabalho, será considerada uma temperatura média do filme de óleo, obtida através de um processo iterativo, descrito no Apêndice B, de modo que a distribuição de pressão e os parâmetros adimensionais de desempenho do mancal serão relacionados com a viscosidade média correspondente do óleo lubrificante.

Serão analisadas principalmente as características de desempenho de mancais operando com lubrificantes newtonianos. No entanto, algumas aplicações com lubrificantes não-newtonianos modelo power-law também serão consideradas. Nesse caso, deve-se levar em conta também a variação da viscosidade aparente com a taxa de deformação, o que pode ser encontrado em várias literaturas, tais como Barnes et al. (1993) e Silva et al. (2001). Para tanto, torna-se necessário trabalhar com uma forma convenientemente adaptada da equação de Reynolds. Na presente dissertação será utilizada a equação proposta por Dien e Elrod (1983) para o caso de mancais radiais operando com lubrificantes de diferentes índices de característica reológica.

Finalmente, será realizado um estudo sobre o funcionamento de mancais de dois lóbulos, com o desenvolvimento de equações exatas e aproximadas para determinação da espessura do filme de óleo, em função de uma folga radial de referência, da excentricidade e do ângulo de atitude, tanto para o lóbulo inferior quanto para o lóbulo superior do mancal. Dessa forma, a distribuição de pressão em ambos os lóbulos pode ser obtida.

Capítulo 2

REVISÃO DA LITERATURA

Uma revisão da literatura indica que os mancais radiais hidrodinâmicos apresentam a mais longa história de estudos científicos em relação a qualquer outro tipo de mancal já estudado.

Alguns dos artigos pioneiros a esse respeito, tais como Petroff (1883), Tower (1883) e Sommerfeld (1904), não são facilmente encontrados na forma original, no entanto, os dados e conclusões principais estão muito bem relacionados por Cameron (1966), como a seguir:

Petroff (1883), considerando a hipótese de que a viscosidade do lubrificante permanecia constante através do filme, apresentou resultados experimentais sobre a temperatura média do filme de óleo em um mancal radial de deslizamento para diferentes velocidades. Surgiu desta pesquisa um método gráfico para se calcular o atrito e a temperatura média do filme de óleo para diferentes temperaturas ambientes e diferentes lubrificantes. Em suas pesquisas, baseado na lei de Newton para um escoamento viscoso, ele ainda desenvolveu uma relação aproximada entre a força de atrito, a viscosidade, a velocidade e alguns parâmetros geométricos do mancal (diâmetro, largura e folga radial), como segue:

$$Fa = \frac{\mu U}{c} \pi D L \quad (2.1)$$

Nessa mesma época, o engenheiro inglês Beauchamp Tower (1883), investigando o atrito em mancais ferroviários, utilizou um mancal radial lubrificado por banho de óleo, em

seu laboratório. Observou que o óleo, no mancal ensaiado, vazava através de um furo de alimentação de óleo, localizado na região de carga do mancal. Para impedir esse vazamento, Tower obstruiu este furo com uma rolha que foi expulsa automaticamente pelo óleo, causando o vazamento do mesmo. Colocou então um tarugo de madeira, para bloquear o orifício, e constatou que o mesmo também foi deslocado lentamente, com conseqüente vazamento de óleo. Em vista disso, Tower concluiu que estava ocorrendo uma geração de pressão no filme de óleo. Determinou então a distribuição de pressões na película do óleo, ao longo do comprimento do mancal e do diâmetro, na região carregada do mancal, e concluiu que a mesma era suficiente para separar completamente as superfícies do munhão e do mancal (bucha). Os coeficientes de atrito verificados por Beauchamp Tower foram da ordem de milésimos, muito reduzidos com relação aos valores esperados.

Osborne Reynolds (1886), de posse dessas evidências, publicou seu artigo estabelecendo os fundamentos físicos e matemáticos básicos da “ciência da lubrificação hidrodinâmica”. Por essa razão a assim chamada “equação de Reynolds da lubrificação hidrodinâmica”, faz parte obrigatória de qualquer texto sobre mancais de deslizamento, como segue:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6U \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.2)$$

Reynolds chegou a propor uma condição de contorno semelhante à mostrada na Figura 3.3, isto é: $p = \frac{\partial p}{\partial x} = 0$ em $\theta = 0$; e $\theta = \pi + \theta'$ e tentou resolver a Equação (2.2), para um mancal infinitamente longo (desprezando a variação da pressão na direção axial), sem muito sucesso.

Finalmente, Sommerfeld (1904), de uma maneira muito simples e engenhosa, introduzindo as chamadas transformadas de Sommerfeld, conseguiu resolver a equação de Reynolds para um mancal infinitamente longo, isto é:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 6U \frac{dh}{dx} \quad (2.3)$$

A falta de formação em engenharia levou Sommerfeld a admitir uma distribuição antissimétrica de pressão hidrodinâmica no filme de óleo, sem cavitação, conforme mostrado no Apêndice C. Foi a utilização dessa hipótese absurda que permitiu a continuidade do estudo

da lubrificação hidrodinâmica e que havia permanecido interrompida por 18 anos, após Reynolds. Posteriormente, vários pesquisadores passaram a utilizar a chamada condição de contorno de meio Sommerfeld, também chamada de condição de contorno de Gumbel desprezando a parte negativa de pressões.

Cameron e Wood (1949), para o caso de um mancal completo (360°), utilizaram a condição de contorno de Reynolds, descrita no Capítulo 1 e no Apêndice C, apresentaram soluções para um mancal de 360° e relações $L/D = 1/4, 1/2$ e $1,0$.

De maneira semelhante, Sassenfeld e Walther (1954), utilizando também a condição de contorno de Reynolds, determinaram a distribuição de pressões e os parâmetros de desempenho para mancais com arcos de 180° e 360° , para relações $L/D = 1/8, 1/6, 1/5, 1/4, 1/3, 1/2$ e $1,0$, bem como para mancal infinitamente longo.

Nessa mesma época, nos Estados Unidos, Pinkus (1956) foi o primeiro a usar o computador, utilizando o método de diferenças finitas e a condição de contorno de Reynolds, obteve resultados para mancais cilíndricos e elípticos, bem como para outras configurações, usando relações $L/D = 0,25; 0,50;$ e 1 . A condição de contorno de Reynolds está mostrada na Figura 3.3 e encontra-se muito bem explicada em Pinkus (1956), e ainda mais detalhada em Pinkus e Sternlicht (1961), incluindo comparação e excelente equivalência com dados experimentais.

De maneira semelhante Raimondi e Boyd (1958), dando sequência ao estudo de mancais radiais hidrodinâmicos, apresentaram soluções completas através de tabelas para mancais de arcos iguais a $120^\circ, 180^\circ$ e 360° e $L/D = 0,25; 0,5; 1;$ e ∞ .

Logo após, com base em seus trabalhos anteriores e de vários outros pesquisadores, Pinkus e Sternlicht (1961) e Cameron (1966) demonstraram que a condição de contorno de Reynolds se aproxima muito mais da realidade do que a condição de contorno de meio Sommerfeld, também chamada de condição de contorno de Gumbel.

Wada e Hayashi (1971, 1974), apresentaram análises teóricas e trabalhos experimentais sobre a lubrificação hidrodinâmica de mancais radiais finitos operando com lubrificantes pseudoplásticos, comprovando assim a aplicabilidade de seu modelo teórico. Foi concluído que a pressão no filme de óleo, bem como a capacidade de carga e a força de atrito são menores para os lubrificantes pseudoplásticos, em relação a um lubrificante newtoniano, para as mesmas condições de operação do mancal.

Wada et al. (1973, 1974), apresentaram trabalhos teóricos e experimentais sobre mancais radiais hidrodinâmicos operando com graxa lubrificante, que corresponde ao modelo sólido de Bingham e mostraram que a pressão no filme de óleo, a capacidade de carga e o coeficiente de atrito são maiores para os lubrificantes do tipo sólido de Bingham, em relação a um lubrificante newtoniano, para as mesmas condições de operação do mancal.

Gero e Ettles (1986), elaboraram o desenvolvimento com várias soluções da equação de Reynolds por diferenças finitas e ainda por elementos finitos. Puderam avaliar os métodos em termos de precisão, custos operacionais e a complexidade dos programas.

Prashad (1988) apresentou análise do comportamento térmico operacional envolvendo o relacionamento entre os parâmetros de funcionamento e a integral da viscosidade, a temperatura do óleo na saída e a capacidade de carga do mancal. Concluiu que o óleo de maior viscosidade implica na necessidade de aumentar a relação de folga c/R e maior elevação de temperatura na região carregada do mancal. Foi visto que a vazão de óleo contribuiu apenas para refrigeração do óleo, mas não eficazmente para o mancal.

Miyazima (1989) apresentou, de maneira muito bem detalhada, a dedução e solução da equação de Reynolds para os três casos clássicos de mancais radiais hidrodinâmicos:

- mancais infinitamente largos;
- mancais infinitamente curtos;
- mancais finitos.

Para os dois primeiros casos a equação de Reynolds foi resolvida analiticamente, ao passo que para os mancais finitos foi desenvolvido um programa computacional usando o método de diferenças finitas e a condição de Gumbel.

Silva (1993) aplicou o método de elementos finitos para a análise do comportamento operacional de mancais radiais de deslizamento operando com lubrificante newtoniano. Utilizou um processo iterativo para determinar a temperatura média do filme de óleo e a correspondente viscosidade básica para cálculo dos parâmetros de desempenho do mancal. Posteriormente, passando a estudar a influência da utilização de lubrificantes não-newtonianos no comportamento de mancais de deslizamento hidrodinâmico, Silva et al. (2001), com base em vários pesquisadores, apresentou as equações básicas do escoamento de fluídos não-newtonianos modelo *power-law*.

Gertzos et al. (2008) elaboraram uma análise para determinar as características de desempenho de um mancal radial lubrificado por um fluido tipo Bingham, através de análise tridimensional por dinâmica dos fluidos computacional (3-D DFC), utilizando o software FLUENT e a condição de contorno de meio Sommerfeld. Os autores argumentaram que a condição de contorno de Reynolds, embora mais realística, não pode ser utilizada, uma vez que o FLUENT resolve as equações de Navier-Stokes ao invés da equação de Reynolds. As características de comportamento tais como distribuição de pressão, excentricidade específica, ângulo de atitude, coeficiente de atrito, vazão de lubrificante e ângulo onde ocorre a pressão máxima foram obtidas não apenas para um fluido tipo Bingham, mas também para um lubrificante newtoniano para várias relações L/D .

Sfyris e Chasalevris (2012), utilizando também a condição de contorno de meio Sommerfeld, apresentaram soluções analíticas da equação de Reynolds para um mancal radial com diferentes relações L/D e excentricidades específicas ε . Foi observada uma excelente equivalência entre as distribuições de pressão assim calculadas com aquelas obtidas numericamente por Wada et al. (1974), bem como as obtidas por Gertzos et al. (2008).

Kasai et al. (2012) obtiveram experimentalmente a distribuição de pressões na seção transversal média de um mancal radial hidrodinâmico de diâmetro 100 mm, largura 80 mm e folga radial 86 μm , utilizando um óleo sintético polialfaolefina (PAO) puro, bem como com três formulações com esse tipo de óleo adicionado de polímeros (polimetacrilatos) de diferentes pesos moleculares. Além da distribuição de pressões foram obtidos também a distribuição de temperaturas subsuperficiais da bucha, para uma carga radial de 9 kN, rotação de 500 rpm e temperatura do(s) óleo(s) de suprimento (mantida constante) igual a 60 °C.

Castro Lima et al. (2012), a partir das proposições de Pinkus (1956), desenvolveram equações exatas para representar a variação da espessura do filme de óleo em um mancal de dois lóbulos, também conhecido como mancal limão, ou elíptico. A partir dessas equações foram desenvolvidas duas equações simplificadas e de grande precisão para o cálculo da espessura do filme de óleo em qualquer posição angular nos dois lóbulos de 180°, ao invés dos lóbulos de 150°, normalmente utilizado por outros pesquisadores. Foi empregado o método de diferenças finitas para determinar a distribuição de pressões, ângulo de atitude, número de Sommerfeld e capacidade de carga do mancal, para várias excentricidades e fatores de pré-carga, bem como diferentes folgas radiais de referência do mancal limão.

Capítulo 3

DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

3.1 MODELO FÍSICO

Conforme pode ser observado na Figura 3.1, um mancal radial hidrodinâmico em operação apresenta o eixo (munhão) localizado excêntricamente em relação à bucha. Se o munhão estiver perfeitamente alinhado com a bucha (mancal), a espessura do filme de óleo lubrificante é uma função somente da coordenada x , ou seja, $h = h(x)$. Considerando-se a coordenada angular $\theta = x/R$, a espessura do filme de óleo lubrificante é dada por:

$$h = c + e \cos \theta \quad (3.1)$$

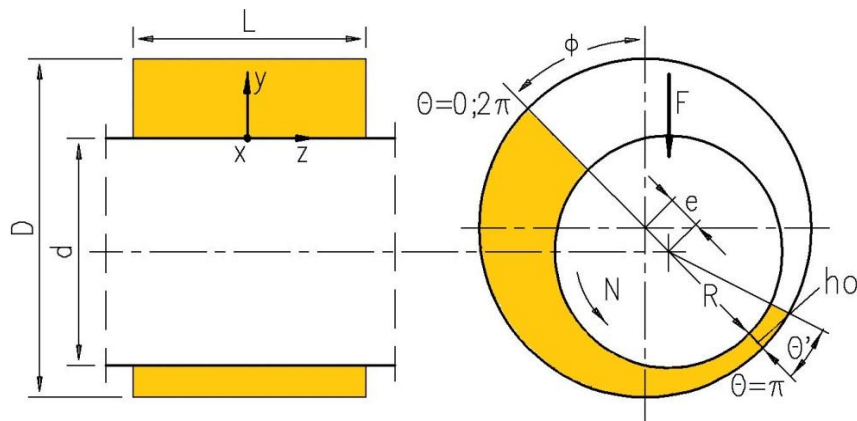


Figura 3.1 Filme de óleo e principais parâmetros de funcionamento de um mancal radial hidrodinâmico

Para o projeto, vários parâmetros dimensionais e condições de carga, velocidade e temperatura de trabalho (parâmetros independentes) são fixados inicialmente, como segue (ver Figura 3.1):

- Diâmetro da bucha, D , [mm]
- Comprimento do mancal (buchas), L [mm]
- Raio nominal, R [mm]
- Diâmetro do eixo, d [mm]
- Folga radial, $c = (D-d)/2$ [mm]
- Viscosidade plástica (absoluta) do óleo lubrificante, m , à temperatura efetiva [Pa.s]
- Temperatura de suprimento do óleo lubrificante, T_s [°C]
- Viscosidade absoluta do óleo lubrificante à temperatura de suprimento, m_s [Pa.s]
- Velocidade de rotação do eixo, N [rpm]
- Força aplicada ou capacidade de carga do mancal, F [N]

A partir destes dados de projeto, é possível obter os parâmetros resultantes (parâmetros dependentes), mostrados nas Figuras 3.1 e 3.2, os quais são:

- Excentricidade operacional do mancal, e [mm]
- Excentricidade específica, $\varepsilon = e/c$
- Espessura mínima do filme, h_0 [mm]
- Pressão hidrodinâmica máxima, P_{max} [Pa]
- Posição angular θ_{max} [graus] ou $\theta_{P_{max}}$ [graus] (define a posição de P_{max})
- Ângulo de atitude, ϕ [graus] (define a posição de h_0)
- Vazão total, Q_t [m³/s]
- Vazão de recirculação, Q_{rec} [m³/s]
- Vazão lateral, Q_L [m³/s]
- Vazão de suprimento, Q_s [m³/s]
- Coeficiente de atrito, f
- Perda de potência, ΔP_{ot} [kW]
- Elevação de temperatura, ΔT [°C]
- Temperatura média, T_m [°C]
- Viscosidade média da película de óleo lubrificante, m [Pa.s]

Esses parâmetros resultantes são utilizados para analisar o comportamento operacional do mancal. Caso um ou mais desses parâmetros não sejam considerados satisfatórios, o projetista pode modificar um ou mais dos parâmetros independentes até que o comportamento

operacional previsto seja adequado. Observe na Figura 3.2, que cada vetor pressão, p , pode ser decomposto em uma componente, $p \cos \theta$, paralela à linha de centros, e uma componente perpendicular a essa linha, $p \sin \theta$. Como será mostrado no item 4.1, o somatório do produto das componentes $p \cos \theta$ pelas correspondentes áreas elementares $R d\theta dz$ representa a componente de carga na direção paralela à linha de centros.

De maneira semelhante, o somatório do produto $p \sin \theta R d\theta dz$ representa a componente de carga na direção perpendicular à linha de centros. Tradicionalmente e de maneira não muito apropriada, essas componentes têm sido referidas como componente radial e componente tangencial, respectivamente.

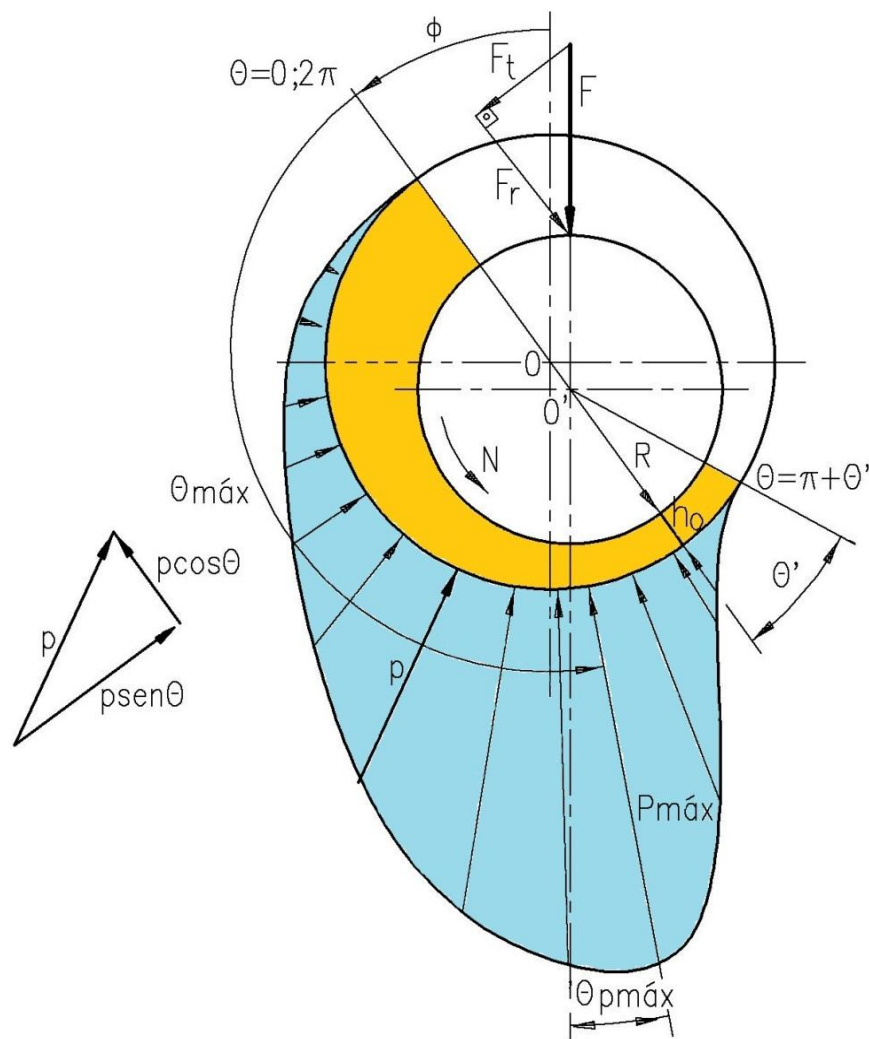


Figura 3.2 – Distribuição de pressões no filme de óleo, na seção transversal média, $z = L/2$ e componentes de carga.

3.2 EQUAÇÃO DE REYNOLDS PARA LUBRIFICANTES DE DIFERENTES ÍNDICES DE CARACTERÍSTICA REOLÓGICA

Na presente dissertação serão consideradas principalmente as características de desempenho de mancais operando com lubrificantes newtonianos. No entanto, alguns casos de utilização de lubrificantes não-newtonianos modelo *power-law* também serão analisados. Conforme mostrado no Apêndice A, os lubrificantes podem ser classificados da seguinte maneira, em função do índice de característica reológica, n :

$n < 1$, fluído pseudoplástico;

$n = 1$, fluído newtoniano;

$n > 1$, fluído dilatante.

Alguns pesquisadores, tais como Wada et al. (1971) e Dien e Elrod (1983), adaptaram a equação de Reynolds para o caso de mancais operando com lubrificantes não newtonianos. Na presente dissertação será utilizada a equação proposta por Dien e Elrod (1983), por ser mais abrangente.

A equação bidimensional de Reynolds modificada para fluidos não-newtonianos modelo exponencial, desenvolvida por Dien e Elrod (1983), rege a distribuição de pressões, p , em um mancal hidrodinâmico radial, em função da espessura do filme de óleo, h , da velocidade tangencial, U , da viscosidade absoluta do óleo, m , e do índice de característica reológica, n , do óleo lubrificante, como segue:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^{n+2}}{n} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^{n+2} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 6mU^n \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3.2)$$

Para o caso de um fluído newtoniano, $n = 1$, a Equação 3.2 toma a forma tradicional dada na literatura, Pinkus e Sternlicht (1961) e Cameron (1966), isto é:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{n} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 6mU \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3.3)$$

A Equação (3.2) pode ser adimensionalizada da seguinte maneira:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{H^{n+2}}{n\bar{m}} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right) + \left(\frac{R}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left(\frac{H^{n+2}}{\bar{m}} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{z}} \right) = 6 \left(\frac{h_0}{c} \right)^2 \frac{\partial H}{\partial \theta}, \quad (3.4)$$

mediante utilização dos seguintes parâmetros adimensionais:

$$\theta = \frac{x}{R}; \quad \bar{z} = \frac{z}{L}; \quad H = \frac{h}{c}; \quad \bar{m} = \frac{m}{m_s}, \quad (3.5)$$

$$\bar{P} = \frac{P}{2\pi N m_s \left(\frac{U}{c} \right)^{n-1} \left(\frac{R}{h_0} \right)^2} \quad (3.6)$$

sendo:

m_s é a viscosidade absoluta do óleo à temperatura de suprimento ou de referência, T_s ,

m é a viscosidade absoluta do óleo lubrificante, dada pela equação de Walther da ASTM:

$$m = \left[-0,6 + 10^E \right]; \quad E = 10^{(K_A \log T + K_B)} \quad (3.7)$$

K_A e K_B são constantes características do óleo lubrificante a ser utilizado;

T é a temperatura absoluta do óleo lubrificante.

A equação de Walther pode ser encontrada em Stachowiak e Batchelor (2005) e representa com muita precisão a variação da viscosidade do lubrificante com a temperatura, principalmente na faixa de 40°C a 100°C. As constantes K_A e K_B são obtidas para qualquer óleo lubrificante, seguindo o procedimento descrito no Apêndice A.

As condições de contorno para a solução da Equação (3.2), e da Equação (3.4), na forma adimensional, são definidas pela condição de Reynolds, e estão representadas na Figura 3.3, que mostra a distribuição de pressão na seção transversal média ($z = L/2$) do mancal desenvolvido e as condições de contorno no plano (θ, \bar{z}) , isto é:

$$p = 0 \text{ em } z = 0; z = L; x = 0 \text{ e } R(\pi + \theta') \leq x \leq 2\pi R \quad (3.8)$$

$$\bar{P} = 0 \text{ em } \bar{z} = 0, \bar{z} = 1, \theta = 0 \text{ e } \pi + \theta' \leq \theta \leq 2\pi \quad (3.8a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \text{ em } x = 0; \text{ e } x = R(\pi + \theta') \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} = 0 \text{ em } \theta = 0 \text{ e } \theta = \pi + \theta', \quad (3.9a)$$

sendo θ' é um ângulo que define as posições circunferenciais, a partir da qual a pressão hidrodinâmica passa a ser nula (ver também Tabelas 6.1 a 6.6, onde os valores de pressão nula estão em branco).

As condições expressas pelas Equações (3.8) e (3.9) são condições naturais e satisfeitas automaticamente, devido à influência da pressão nas adjacências laterais do mancal, conforme Pinkus e Sternlicht (1961).

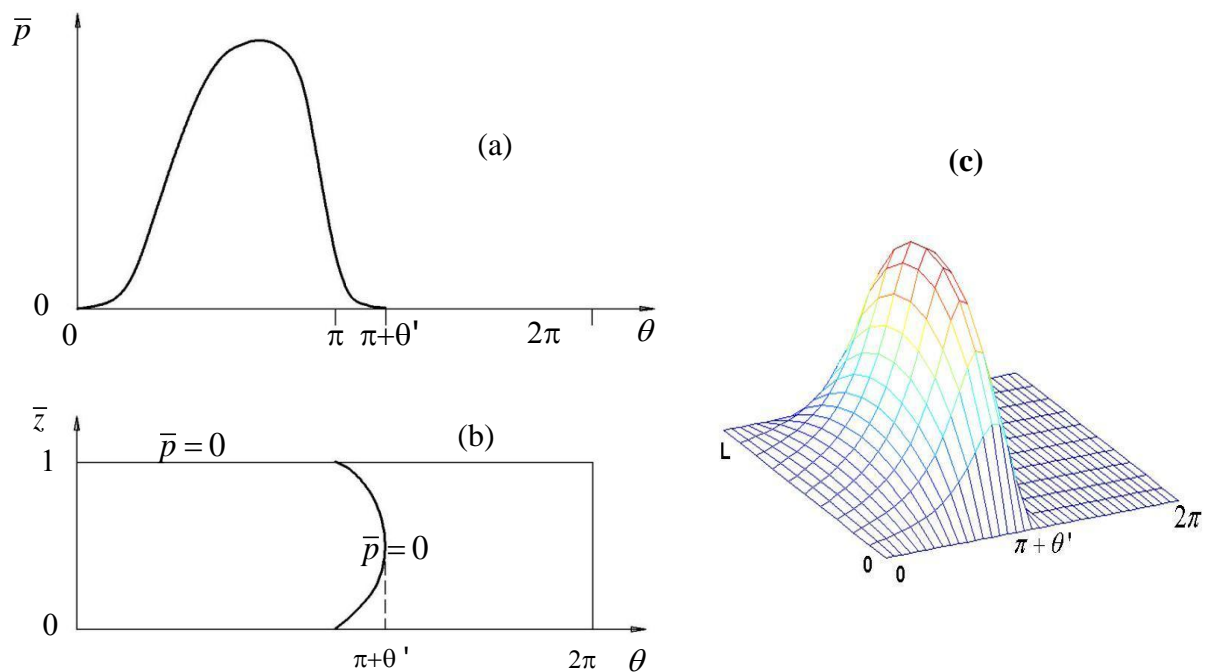


Figura 3.3 – Distribuição de pressões e condições de contorno
 (a) Distribuição de pressões no plano médio do mancal, $z = L/2$;
 (b) Condições de contorno no "plano desenvolvido";
 (c) Distribuição de pressões no plano (θ, z) .

Para o caso de um mancal perfeitamente alinhado, a espessura adimensional, H , do filme de óleo é função somente de θ , de modo que a Equação (3.4) pode ser escrita como segue:

$$\frac{n+2}{n\bar{m}} H^{n+1} \frac{dH}{d\theta} \left(\frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right) + \frac{H^{n+2}}{n\bar{m}} \left(\frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial \theta^2} \right) + \left(\frac{R}{L} \right)^2 \left[\frac{H^{n+2}}{\bar{m}} \left(\frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial \bar{z}^2} \right) \right] = 6 \left(\frac{h_0}{c} \right)^2 \frac{dH}{d\theta} \quad (3.10)$$

Dividindo-se os dois membros da Equação (3.10) pela relação $\frac{H^{n+2}}{n\bar{m}}$, obtém-se:

$$\frac{n+2}{H} \frac{dH}{d\theta} \left(\frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right) + \left(\frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial \theta^2} \right) + n \left(\frac{R}{L} \right)^2 \left(\frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial \bar{z}^2} \right) = 6 \left(\frac{h_0}{c} \right)^2 \frac{n\bar{m}}{H^{n+2}} \frac{dH}{d\theta} \quad (3.11)$$

Pode-se observar na Figura (3.1) que a espessura mínima, h_0 , ocorre na posição angular $\theta = \pi$, de modo que, da Equação (3.1), tem-se $h_0 = c(1 - \varepsilon)$. Além disso, a partir da Equação (3.1) e das Equações (3.5), a espessura adimensional H , a diferencial $\frac{dH}{d\theta}$ e a relação $\left(\frac{h_0}{c} \right)^2$ resultam:

$$H = 1 + \varepsilon \cos \theta; \quad \frac{dH}{d\theta} = -\varepsilon \sin \theta; \quad \left(\frac{h_0}{c} \right)^2 = (1 - \varepsilon)^2 \quad (3.12)$$

Substituindo-se as Equações (3.12) na Equação (3.11), tem-se:

$$\frac{-(n+2)\varepsilon \sin \theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial \theta^2} + n \left(\frac{R}{L} \right)^2 \frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial \bar{z}^2} = -6\bar{m}n(1 - \varepsilon)^2 \frac{\varepsilon \sin \theta}{(1 + \varepsilon \cos \theta)^{n+2}} \quad (3.13)$$

3.3 DISCRETIZAÇÃO DA EQUAÇÃO DE REYNOLDS NA FORMA DE DIFERENÇAS FINITAS

Para colocar a Equação (3.13) na forma de diferenças finitas, a distribuição de pressões, $\bar{P} = \bar{P}(\theta, \bar{z})$, deve ser discretizada conforme mostrado na Figura 3.4, com a seguinte simbologia:

$$i = 1, 2, 3, \dots, b + 1;$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, t + 1;$$

b é o número de intervalos na direção circunferencial;

t é o número de intervalos na direção axial;

$(b + 1)$ é o número de pontos nodais na direção circunferencial;

$(t + 1)$ é o número de pontos nodais na direção axial.

Desta forma, a posição circunferencial e a posição axial de cada ponto nodal são dadas respectivamente por:

$$\theta = (i-1)\Delta\theta = (i-1)\frac{2\pi}{b} \quad (3.14)$$

$$\bar{z} = (j-1)\Delta\bar{z} = \frac{(j-1)}{t} \quad (3.15)$$

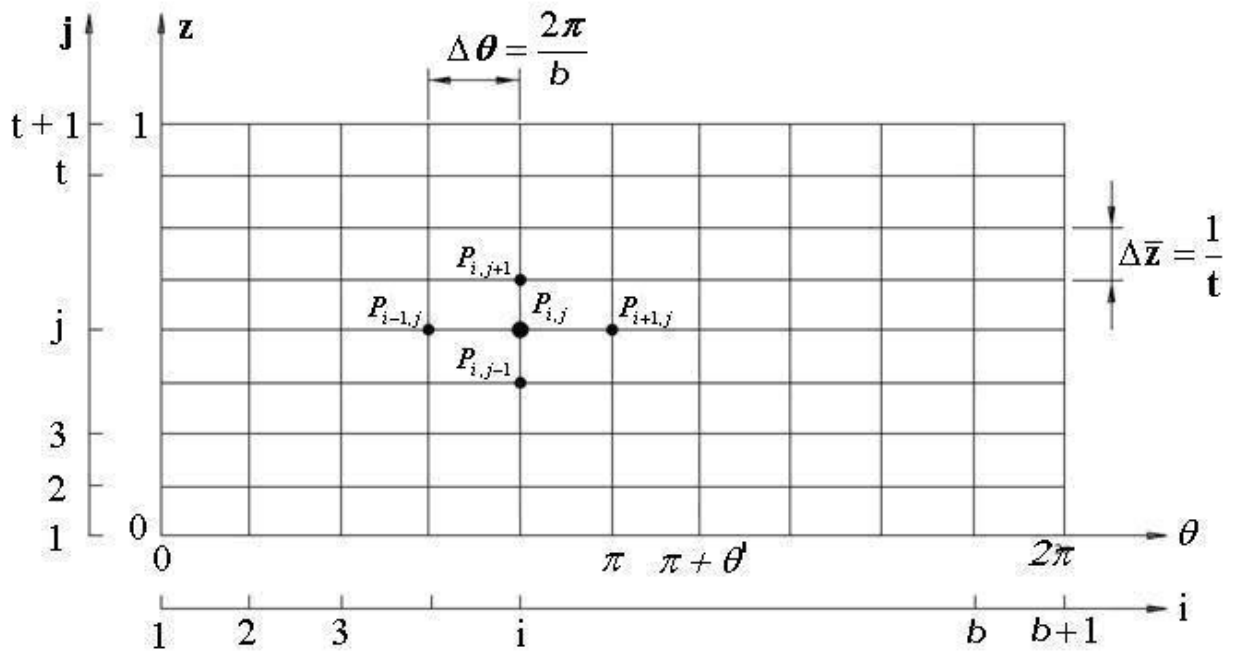


Figura 3.4. Malha de discretização por diferenças finitas para a equação de Reynolds

Desenvolvendo-se os diferenciais da pressão adimensional \bar{P} da Equação (3.13) em série de Taylor e desprezando-se termos de ordem superior, obtêm-se esses diferenciais na forma de diferenças finitas, isto é:

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} = \frac{\bar{P}_{i+1,j} - \bar{P}_{i-1,j}}{2\Delta\theta}; \quad \frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial \theta^2} = \frac{\bar{P}_{i+1,j} - 2\bar{P}_{i,j} + \bar{P}_{i-1,j}}{\Delta\theta^2} \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{z}} = \frac{\bar{P}_{i,j+1} - \bar{P}_{i,j-1}}{2\Delta\bar{z}}; \quad \frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial \bar{z}^2} = \frac{\bar{P}_{i,j+1} - 2\bar{P}_{i,j} + \bar{P}_{i,j-1}}{\Delta\bar{z}^2} \quad (3.17)$$

Substituindo-se então as Equações (3.16) e as Equações (3.17) na Equação (3.13), resulta:

$$\begin{aligned}
& \frac{-(n+2)\varepsilon \operatorname{sen}\left[\left(i-1\right)\frac{2\pi}{b}\right]}{\left(1+\varepsilon \cos\left[\left(i-1\right)\frac{2\pi}{b}\right]\right)}\left(\frac{\bar{P}_{i+1;j}-\bar{P}_{i-1;j}}{2\Delta\theta}\right)+\left(\frac{\bar{P}_{i+1;j}-2\bar{P}_{i;j}+\bar{P}_{i-1;j}}{\Delta\theta^2}\right)+ \\
& n\left(\frac{R}{L}\right)^2\left(\frac{\bar{P}_{i;j+1}-2\bar{P}_{i;j}+\bar{P}_{i;j-1}}{\Delta\bar{Z}^2}\right)=-6\bar{m}n(1-\varepsilon)^2\frac{\varepsilon \operatorname{sen}\theta}{\left(1+\varepsilon \cos\theta\right)^{n+2}}
\end{aligned} \quad (3.18)$$

Explicitando $\bar{p}_{i,j}$, após considerável manipulação algébrica, obtém-se a pressão adimensional no ponto de coordenadas i, j , em função das pressões nos quatro pontos circunvizinhos, como segue:

$$\bar{P}_{i,j}=A_i \bar{P}_{i+1,j}+B_i \bar{P}_{i-1,j}+2n\left(\frac{R}{L}\right)^2\frac{\Delta\theta^2}{Den1}\left(\bar{P}_{i,j+1}+\bar{P}_{i,j-1}\right)+C_i \quad (3.19)$$

sendo:

$$A_i=\left\{2-\frac{(n+2)\varepsilon \operatorname{sen}\left[\left(i-1\right)\frac{2\pi}{b}\right]}{1+\varepsilon \cos\left[\left(i-1\right)\frac{2\pi}{b}\right]}\Delta\theta\right\}\frac{\Delta\bar{z}^2}{Den1} \quad (3.20a)$$

$$B_i=\left\{2+\frac{(n+2)\varepsilon \operatorname{sen}\left[\left(i-1\right)\frac{2\pi}{b}\right]}{1+\varepsilon \cos\left[\left(i-1\right)\frac{2\pi}{b}\right]}\Delta\theta\right\}\frac{\Delta\bar{z}^2}{Den1} \quad (3.20b)$$

$$C_i=\frac{12\bar{m}n(1-\varepsilon)^2\varepsilon \operatorname{sen}\left[\left(i-1\right)\frac{2\pi}{b}\right]}{\left\{1+\varepsilon \cos\left[\left(i-1\right)\frac{2\pi}{b}\right]\right\}^{n+2}}\frac{\Delta\theta^2\Delta\bar{z}^2}{Den1} \quad (3.20c)$$

$$Den1=4\left[\left(\Delta\bar{Z}\right)^2+n\left(\frac{R}{L}\right)^2\left(\Delta\theta\right)^2\right] \quad (3.20d)$$

Conforme as condições de contorno estabelecidas anteriormente, Equação (3.8), as pressões nodais, $\bar{p}_{i,j}$, serão impostas como sendo sempre nulas ou positivas (ver Figuras 3.2 e 3.3). Dessa forma, em relação à Figura 3.4, pode-se escrever:

$$\bar{p}_{i,j}=0\begin{cases} \text{para } i=1 \text{ e } i=b+1, \forall j \\ \text{para } j=1 \text{ e } j=t+1, \forall i \end{cases} \quad (3.21)$$

Em um programa computacional, a condição de contorno é imposta fazendo-se $\bar{p}_{i,j}=0$ para $(i=1)$, $(i= b+1)$, $(j=1)$ e $(j=t+1)$. Dessa forma, as pressões nodais $\bar{p}_{i,j}$ serão calculadas para $(i= 2)$ até... $(i= b)$ e $(j= 2)$ até... $(j= t)$, obedecendo ao seguinte critério: se $\bar{p}_{i,j} \leq 0$, fazer $\bar{p}_{i,j} = 0$.

A Equação (3.19) representa um sistema de equações algébricas, o qual é solucionado no presente trabalho utilizando-se o método iterativo de Gauss-Seidel, juntamente com o esquema de sobre-relaxação sucessiva. O esquema de cálculo é o seguinte:

$$\bar{p}_{i,j} = \bar{p}_{i,j}^{pr} + (W_{ot} - 1)(\bar{p}_{i,j} + \bar{p}_{i,j}^{pr}), \quad (3.22)$$

sendo:

$$\bar{p}_{i,j} = A_i \bar{p}_{i+1,j}^{pr} + B_i \bar{p}_{i-1,j} + 2n \left(\frac{R}{L} \right)^2 \frac{\Delta\theta^2}{Den} (\bar{p}_{i,j+1}^{pr} + \bar{p}_{i,j-1}) + C_i, \quad (3.23)$$

onde as pressões adimensionais com sobrescrito “pr” referem-se às pressões na iteração precedente (anterior) e as pressões sem expoente referem-se à iteração atual.

O valor de W_{ot} conforme proposto por Lloyd e McCallion (1968), é dado por:

$$W_{ot} = 2 \left[1 - \frac{(1-\alpha^2)^{1/2}}{\alpha^2} \right], \Rightarrow \alpha = 1 - \frac{\pi^2 \left[4 + \left(\frac{\pi d}{L} \right)^2 \right]}{2 \left[b^2 + \left(\frac{\pi d t}{L} \right)^2 \right]}, \quad (3.24)$$

com o seguinte critério de parada:

$$\left| \bar{p}_{i,j} - \bar{p}_{i,j}^{pr} \right| \leq \Psi \left| \bar{p}_{i,j} \right|, \quad (3.25)$$

onde Ψ é o fator de convergência do processo iterativo.

Capítulo 4

PARÂMETROS DE DESEMPENHO DO MANCAL

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão desenvolvidas as expressões analíticas e as correspondentes equações discretizadas para determinação dos chamados parâmetros de desempenho ou de comportamento operacional do mancal.

Uma vez determinada a distribuição de pressões, os parâmetros de desempenho (parâmetros resultantes) do mancal podem ser obtidos. Para tanto é necessário usar um método numérico para a solução de algumas integrais que aparecem nos desenvolvimentos teóricos descritos nos itens 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5. Para a solução destas integrais foi utilizado o método de integração de Simpson, que consiste em calcular a área compreendida entre o eixo x e a curva $y = f(x)$, no intervalo de x_0 até x_n conforme mostrado na Figura 4.1. Essa área é dividida em certo número nf (par) de faixas de largura $\delta = (x_{nf} - x_0) / nf$.

Resumidamente, a regra de Simpson estabelece que a área sob a curva $y = f(x)$ é dada por:

$$\int_{x_0}^{x_{nf}} f(x) dx = \frac{\delta}{3} [y_0 + 4y_1 + 2y_2 + \dots + 4y_{nf-1} + y_{nf}] \quad (4.1)$$

ou

$$\int_{x_0}^{x_{2nf}} f(x) dx = \frac{\delta}{3} [y_0 + y_{2nf} + 2(y_2 + y_4 + \dots + y_{2nf-2}) + 4(y_1 + y_3 + \dots + y_{2nf-1})] \quad (4.2)$$

ou ainda, de forma compacta, pode-se escrever:

$$\int_{x_0}^{x_{2nf}} f(x) dx = \frac{\delta}{3} \left[y_0 + y_{nf} + 4 \sum_{k=1}^{nf/2} y_{2k-1} + 2 \sum_{k=1}^{nf/2-1} y_{2k} \right], \quad (4.3)$$

sendo:

δ é a distância genérica entre dois pontos consecutivos, mostrada na Figura 4.1;

$y_0, y_1, y_2, \dots, y_{nf-1}, y_{nf}$ são os valores da função y nos respectivos pontos.

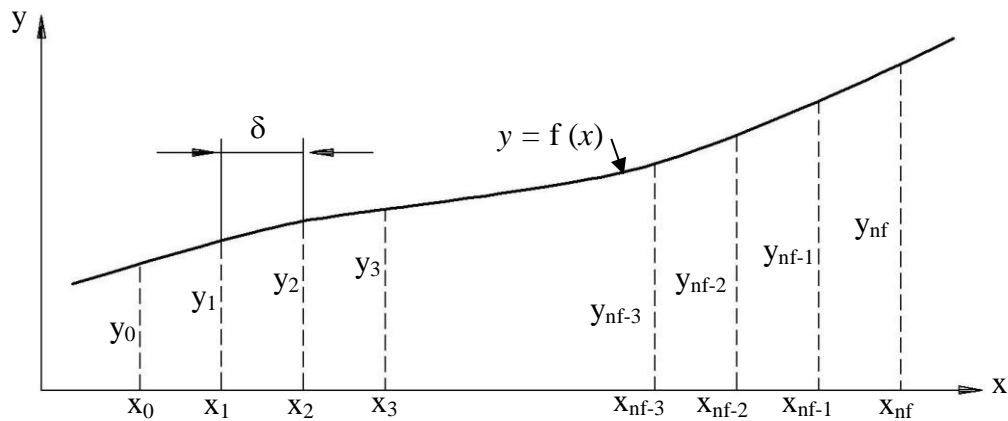


Figura 4.1 – Nomenclatura da função $y = f(x)$ para aplicação da regra de Simpson

No presente trabalho, para integrar qualquer parâmetro de desempenho do mancal em relação à θ e em relação a \bar{z} , a distância δ mostrada na Figura 4.1, toma respectivamente os seguintes valores em relação à Figura 3.4:

$$\delta = \Delta\theta = \frac{2\pi}{b} \quad ; \quad \delta = \Delta\bar{z} = \frac{1}{t} \quad (4.4)$$

4.2 CAPACIDADE DE CARGA ADIMENSIONAL

Conforme mostrado na Figura 3.2, a carga aplicada ou capacidade de carga, F , do mancal pode ser decomposta em uma componente paralela à linha de centros, $F \cos\phi$, e uma componente perpendicular a essa linha, $F \sin\phi$. Na presente dissertação essas componentes serão referidas como força radial e força tangencial, respectivamente, de acordo com a nomenclatura corrente na literatura. Portanto, pode-se escrever:

$$F = \sqrt{F_r^2 + F_t^2} \quad (4.5)$$

Assim, com base na Figura 3.2, as componentes de carga radial, F_r , e tangencial, F_t , são calculadas respectivamente por:

$$Fr = F \cos \phi = \int_0^L \int_0^{2\pi} P R \cos \theta \, d\theta \, dz \quad (4.6)$$

e

$$Ft = F \sen \phi = \int_0^L \int_0^{2\pi} P R \sen \theta \, d\theta \, dz \quad (4.7)$$

Substituindo-se os parâmetros adimensionais definidos pelas Equações (3.5) e (3.6), nas Equações (4.6) e (4.7) obtêm-se, respectivamente:

$$Fr = \int_0^L \int_0^{2\pi} 2\pi N m_s \left(\frac{U}{c}\right)^{n-1} \left(\frac{R}{h_0}\right)^2 \bar{p} R \cos \theta \, d\theta \, L \, d\bar{z} \quad (4.8)$$

e

$$Ft = \int_0^L \int_0^{2\pi} 2\pi N m_s \left(\frac{U}{c}\right)^{n-1} \left(\frac{R}{h_0}\right)^2 \bar{p} R \sen \theta \, d\theta \, L \, d\bar{z} \quad (4.9)$$

Substituindo-se $\left(\frac{R}{h_0}\right)^2$ por $\left(\frac{R}{c}\right)^2 \left(\frac{c}{h_0}\right)^2 = \left(\frac{R}{c}\right)^2 / (1-\varepsilon)^2$ nas Equações (4.8) e (4.9) as componentes de carga adimensionais podem ser definidas da seguinte maneira:

$$\bar{F}r = Fr \frac{c^{n+1}(1-\varepsilon)^2}{U^n m_s L R^2} = \int_0^1 \int_0^{2\pi} \bar{P} \cos \theta \, d\theta \, d\bar{z} \quad (4.10)$$

$$\bar{F}t = Ft \frac{c^{n+1}(1-\varepsilon)^2}{U^n m_s L R^2} = \int_0^1 \int_0^{2\pi} \bar{P} \sen \theta \, d\theta \, d\bar{z} \quad (4.11)$$

Considerando-se as Equações (3.14) e (3.15), conclui-se que as componentes adimensionais podem ser reescritas como segue:

$$\bar{F}r = \int_{j=1}^{j=t+1} \int_{i=1}^{i=b+1} \bar{P}_{i,j} \cos \left[(i-1) \frac{2\pi}{b} \right] d\theta \, d\bar{z} \quad (4.12)$$

$$\bar{F}t = \int_{j=1}^{j=t+1} \int_{i=1}^{i=b+1} \bar{P}_{i,j} \sen \left[(i-1) \frac{2\pi}{b} \right] d\theta \, d\bar{z} \quad (4.13)$$

Integrando-se as equações acima, inicialmente em relação a θ , tem-se:

$$\bar{F}r_j = \int_{i=1}^{i=b+1} \bar{P}_{i,j} \cos \left[(i-1) \frac{2\pi}{b} \right] d\theta; \quad (4.14)$$

$$\bar{F}t_j = \int_{i=1}^{i=b+1} \bar{P}_{i,j} \sin \left[(i-1) \frac{2\pi}{b} \right] d\theta. \quad (4.15)$$

A partir das condições de contorno mostradas na Figura 3.3 e observando-se simultaneamente as Figuras 3.4 e 4.1, observa-se que $y_0 = \bar{P}_1 = 0$ e $y_{nf} = \bar{P}_{b+1} = 0$, de modo que, aplicando-se a regra de Simpson, Equação (4.3), tem-se:

$$\bar{F}r_j = \frac{4\pi}{3b} \sum_{i=2}^{i=b/2} \bar{P}_{2i-1} \cos \left[(2i-2) \frac{2\pi}{b} \right] + \frac{8\pi}{3b} \sum_{i=2}^{i=b/2+1} \bar{P}_{2i-2} \cos \left[(2i-3) \frac{2\pi}{b} \right] \quad (4.16)$$

$$\bar{F}t_j = \frac{4\pi}{3b} \sum_{i=2}^{i=b/2} \bar{P}_{2i-1} \sin \left[(2i-2) \frac{2\pi}{b} \right] + \frac{8\pi}{3b} \sum_{i=2}^{i=b/2+1} \bar{P}_{2i-2} \sin \left[(2i-3) \frac{2\pi}{b} \right] \quad (4.17)$$

Assim sendo, as Equações (4.12) e (4.13) podem ser reescritas como:

$$\bar{F}r = \int_{j=1}^{j=t+1} \bar{F}r_j d\bar{z}; \quad \text{e} \quad \bar{F}t = \int_{j=1}^{j=b+1} \bar{F}t_j d\bar{z}. \quad (4.18)$$

Substituindo-se então as Equações (4.16) e (4.17) nas Equações (4.18), obtêm-se as componentes radial $\bar{F}r$ e tangencial $\bar{F}t$ da capacidade de carga adimensional do mancal. Para isso, deve-se aplicar novamente a regra de Simpson, integrando-se $\bar{F}r_j$ e $\bar{F}t_j$ em relação a \bar{z} , obtendo-se:

$$\bar{F}r = \frac{1}{3t} \left(Fr_1 + Fr_{t+1} + 2 \sum_{j=2}^{j=t/2} Fr_{2j-1} + 4 \sum_{j=2}^{j=t/2+1} Fr_{2j-2} \right), \quad (4.19)$$

$$\bar{F}t = \frac{1}{3t} \left(Ft_1 + Ft_{t+1} + 2 \sum_{j=2}^{j=t/2} Ft_{2j-1} + 4 \sum_{j=2}^{j=t/2+1} Ft_{2j-2} \right). \quad (4.20)$$

Logo, a capacidade de carga adimensional \bar{F} do mancal pode então ser calculada por:

$$\bar{F} = \sqrt{\bar{F}r^2 + \bar{F}t^2} = F \frac{c^{n+1}(1-\varepsilon)^2}{U^n m_s LR^2} \quad (4.21)$$

4.3 ÂNGULO DE ATITUDE OU POSIÇÃO ANGULAR DA ESPESSURA MÍNIMA DO FILME DE ÓLEO

Como pode ser observado na Figura 3.2, o ângulo de atitude, ϕ , isto é, a posição angular da linha de ação da carga resultante, F , com relação à posição de espessura mínima, h_0 , é dado por:

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{F_t}{F_r}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\bar{F}_t}{\bar{F}_r}\right) \quad (4.22)$$

4.4 NÚMERO DE SOMMERFELD

O número de Sommerfeld ou número característico do mancal, S , é um agrupamento adimensional de alguns parâmetros independentes, fixados pelo projetista, e é definido pela seguinte relação:

$$S = \frac{\mu N}{P} \left(\frac{R}{c}\right)^2 = \frac{m N L d}{F} \left(\frac{U}{c}\right)^{n-1} \left(\frac{R}{c}\right)^2, \quad (4.23)$$

sendo,

$$P = \frac{F}{Ld} \text{ a pressão específica ou unitária do mancal, e, do Apêndice A, } \mu = m \left(\frac{U}{c}\right)^{n-1}.$$

Substituindo-se a Equação (4.21) na Equação (4.23) e lembrando que $\pi d N = U$ e $m = \bar{m} m_s$, obtém-se, após algum algebrismo:

$$S = \frac{\bar{m}}{\pi \bar{F}} (1 - \varepsilon)^2 \quad (4.24)$$

4.5 FORÇA DE ATRITO E COEFICIENTE DE ATRITO

A partir das equações desenvolvidas por Silva et al. (2001) e Dien e Elrod (1983), a velocidade tangencial, u , de uma partícula do filme de óleo, bem como o diferencial $\partial u / \partial y$ são dados por:

$$u = U \left(1 - \frac{y}{h} \right) + \frac{1}{2mn} \left(\frac{h}{U} \right)^{n-1} \frac{\partial P}{\partial x} (y^2 - hy) \quad (4.25)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{2mn} \left(\frac{h}{U} \right)^{n-1} (2y - h) \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{U}{h} \quad (4.26)$$

Assim, a tensão de cisalhamento em $y = 0$, isto é, na superfície do mancal, é dada por:

$$\tau \Big|_{y=0} = -m \left(-\frac{\partial u}{\partial y} \right) \Big|_{y=0} = -m \left[\frac{h}{2nm} \left(\frac{h}{U} \right)^{n-1} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{U}{h} \right]^n \quad (4.27)$$

A expressão que fornece a força de atrito, F_a , é obtida integrando-se a tensão de cisalhamento, τ , ao longo da superfície do mancal, da seguinte forma:

$$F_a = \int_0^L \int_0^{2\pi R} \tau \Big|_{y=0} dx dz \quad (4.28)$$

Substituindo-se a Equação (4.27) na Equação (4.28) obtém-se:

$$F_a = \int_0^L \int_0^{2\pi R} -m \left[\frac{h}{2mn} \left(\frac{h}{U} \right)^{n-1} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{U}{h} \right]^n dx dz \quad (4.29)$$

Substituindo-se então os parâmetros adimensionais definidos nas Equações (3.5) e (3.6), na Equação (4.29), simplificando-se e agrupando-se convenientemente, obtêm-se:

$$F_a = \int_0^1 \int_0^{2\pi} -\bar{m} m_s \left(\frac{U}{cH} \right)^n \left[\frac{H^{n+1}}{2\bar{m}n} \left(\frac{c}{h_0} \right)^2 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} + 1 \right]^n RL d\theta d\bar{z} \quad (4.30)$$

Finalmente, pode-se definir a força de atrito adimensional, como segue:

$$\bar{F}_a = \frac{F_a}{m_s LR \left(\frac{U}{c} \right)^n} = - \int_0^1 \int_0^{2\pi} \frac{\bar{m}}{H^n} \left[\frac{H^{n+1}}{2\bar{m}n} \left(\frac{c}{h_0} \right)^2 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} + 1 \right]^n d\theta d\bar{z} \quad (4.31)$$

Utilizando-se as Equações (3.14) e (3.15) pode-se reescrever a Equação (4.31), da seguinte maneira:

$$\bar{F}a = - \int_{j=1}^{j=t+1} \int_{i=1}^{i=b+1} \frac{\bar{m}}{H_i^n} \left[\frac{H_i^{n+1}}{2\bar{m}n} \left(\frac{c}{h_0} \right)^2 \frac{\partial \bar{P}_{i,j}}{\partial \theta} + 1 \right]^n d\theta d\bar{z} \quad (4.32)$$

Integrando-se inicialmente em relação a θ , tem-se:

$$\bar{F}a_j = \int_{i=1}^{i=b+1} \frac{\bar{m}}{H_i^n} \left[\frac{H_i^{n+1}}{2\bar{m}n} \left(\frac{c}{h_0} \right)^2 \frac{\partial \bar{P}_{i,j}}{\partial \theta} + 1 \right]^n d\theta \quad (4.33)$$

Observando da Figura 3.4 que $\bar{P}_b = \bar{P}_{b+1} = 0$ e aplicando-se a regra de Simpson, Equação (4.3), tem-se:

$$\delta = \frac{2\pi}{b} \quad (4.34)$$

$$y_0 = \frac{\bar{m}}{H_1^n} \left[\frac{H_1^{n+1}}{2\bar{m}n} \left(\frac{\bar{P}_2 - \bar{P}_1}{\Delta\theta} \right) + 1 \right]^n \quad (4.35)$$

$$y_{2nf} = \frac{\bar{m}}{H_{b+1}^n} \left[\frac{H_{b+1}^{n+1}}{2\bar{m}n} \left(\frac{\bar{P}_{b+1} - \bar{P}_b}{\Delta\theta} \right) + 1 \right]^n \quad (4.36)$$

$$\sum_{k=1}^{nf} f_{2k-1} = y_1 + y_3 + \dots + y_{2nf-1} = \sum_{i=2}^{b/2+1} \frac{\bar{m}}{H_{2i-2}^n} \left[\frac{H_{2i-2}^{n+1}}{2\bar{m}n} \left(\frac{\bar{P}_{2i-1} - \bar{P}_{2i-3}}{2\Delta\theta} \right) + 1 \right]^n \quad (4.37)$$

$$\sum_{k=1}^{nf-1} f_{2k} = y_2 + y_4 + \dots + y_{2nf-2} = \sum_{i=2}^{b/2} \frac{\bar{m}}{H_{2i-1}^n} \left[\frac{H_{2i-1}^{n+1}}{2\bar{m}n} \left(\frac{\bar{P}_{2i} - \bar{P}_{2i-2}}{2\Delta\theta} \right) + 1 \right]^n \quad (4.38)$$

Portanto, a Equação (4.33) resulta em:

$$\begin{aligned}
\bar{F}a_j = & \frac{2\pi}{3b} \left(\frac{\bar{m}}{H_1^n} \left[\frac{H_1^{n+1}}{2\bar{m}n} \left(\frac{\bar{P}_2 - \bar{P}_1}{\Delta\theta} \right) + 1 \right]^n + \frac{\bar{m}}{H_{b+1}^n} \right) \\
& + \frac{4\pi}{3b} \sum_{i=2}^{b/2} \frac{\bar{m}}{H_{2i-1}^n} \left[\frac{H_{2i-2}^{n+1}}{2\bar{m}n} \left(\frac{\bar{P}_{2i} - \bar{P}_{2i-2}}{2\Delta\theta} \right) + 1 \right]^n \\
& + \frac{8\pi}{3b} \sum_{i=2}^{b/2+1} \frac{\bar{m}}{H_{2i-2}^n} \left[\frac{H_{2i-2}^{n+1}}{2\bar{m}n} \left(\frac{\bar{P}_{2i-1} - \bar{P}_{2i-3}}{2\Delta\theta} \right) + 1 \right]^n
\end{aligned} \tag{4.39}$$

Aplicando-se novamente a regra de Simpson, Equações (4.3), para integrar em relação a "j", obtém-se finalmente a expressão para o cálculo da força de atrito adimensional, isto é:

$$\bar{F}a = \frac{1}{3t} \left[Fa_1 + Fa_{t+1} + 2 \sum_{j=2}^{t/2} Fa_{2j-1} + 4 \sum_{j=2}^{t/2+1} Fa_{2j-2} \right] \tag{4.40}$$

O coeficiente de atrito, f , conforme a definição básica é a relação entre a força de atrito e a carga aplicada no mancal. Considerando-se as Equações (4.31) e (4.21), tem-se:

$$f = \frac{Fa}{F} = \frac{c \bar{F}a}{R \bar{F}} (1 - \varepsilon)^2, \tag{4.41}$$

ou

$$f \left(\frac{R}{c} \right) = \frac{\bar{F}a}{\bar{F}} (1 - \varepsilon)^2. \tag{4.42}$$

4.6 PERDA DE POTÊNCIA

A perda de potência, devida ao atrito viscoso gerado pela rotação do eixo, é igual ao produto da força de atrito, Fa , pela velocidade tangencial, U .

Portanto, considerando-se a Equação (4.31), as perdas de potência dimensional, ΔPot , e adimensional, $\overline{\Delta Pot}$, podem ser escritas como segue:

$$\Delta Pot = U Fa \tag{4.43}$$

$$\overline{\Delta Pot} = \frac{\Delta Pot}{m_s L R \left(\frac{U}{c} \right)^n U} \tag{4.44}$$

4.7 VAZÕES DE LUBRIFICANTE

Conforme pode ser visto na Figura 4.2, as seguintes componentes de vazão de lubrificante podem ser observadas em um mancal radial hidrodinâmico:

Q_s , vazão de suprimento;

Q_t , vazão circunferencial de entrada ou vazão total, na posição de espessura máxima do filme de óleo;

Q_L , vazão lateral ou axial;

Q_{rec} , vazão circunferencial de saída ou vazão de recirculação, em $\theta = \pi + \theta'$.

Podem-se estabelecer as seguintes relações entre essas componentes de vazão:

$$Q_L = Q_t - Q_{rec} \quad (4.45)$$

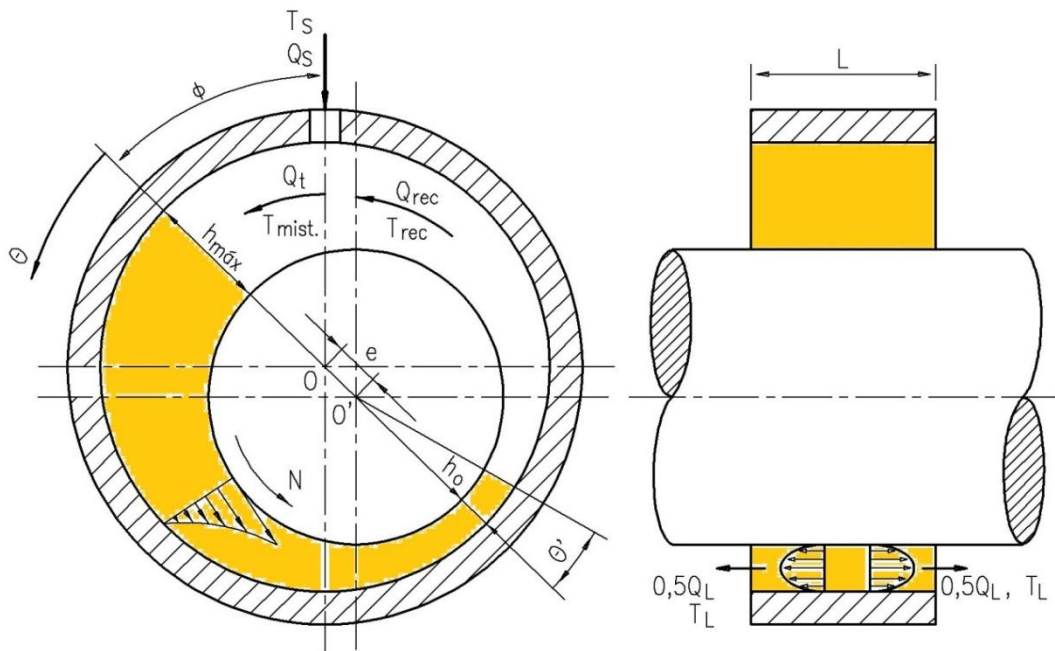


Figura 4.2. Componentes de vazão de lubrificante e temperaturas correspondentes

A partir das equações propostas por Silva et al. (2001), para o escoamento de um fluido não-newtoniano, modelo *power-law*, a vazão circunferencial de óleo lubrificante, pode ser calculada pela seguinte equação:

$$Q = \int_0^L q_x \Big|_{\theta} dz = \int_0^L \left(\frac{U h}{2} - \frac{h^{n+2}}{12mnU^{n-1}} \frac{\partial P}{\partial x} \right) \Big|_{\theta} dz \quad (4.46)$$

A viscosidade aparente adimensional $\bar{\mu}$ pode ser definida da seguinte maneira:

$$\bar{\mu} = \frac{\mu}{\mu_s} = \frac{\mu}{m_s} \left(\frac{c}{U} \right)^{n-1} \quad (4.47)$$

Substituindo-se a Equação (4.47) na Equação (4.46), a vazão circunferencial de óleo lubrificante, pode ser escrita como:

$$Q = \int_0^L \left(\frac{U h}{2} - \frac{h^{n+2}}{12 \bar{\mu} m_s n U^{n-1}} \frac{\partial P}{\partial x} \right) \Big|_{\theta} dz \quad (4.48)$$

Substituindo-se então os parâmetros adimensionais dados pelas Equações (3.5) e (3.6) na Equação (4.48), resulta:

$$Q = \int_0^1 \left[R \pi H N c L - \frac{\pi H^{n+2} N c}{6 \bar{\mu} n} \left(\frac{c}{h_0} \right)^2 R \frac{\partial \bar{p}}{\partial \theta} L \right] \Big|_{\theta} d\bar{z} \quad (4.49)$$

Dividindo-se a Equação (4.49) por $(RcNL)$ obtém-se a vazão adimensional na direção circunferencial, isto é:

$$\bar{Q} = \frac{Q}{RcNL} = \left[\pi H - \frac{\pi H^{n+2}}{6 n \bar{\mu}} \left(\frac{c}{h_0} \right)^2 \int_0^1 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} d\bar{z} \right]_{\theta} \quad (4.50)$$

Substituindo-se a Equação (3.8a) na Equação (4.50), as vazões adimensionais, \bar{Q}_t , na entrada, $(\theta = 0)$ e na saída da cunha de óleo, \bar{Q}_{rec} , em $(\theta = \pi + \theta')$, podem ser escritas como segue:

$$\bar{Q}_t = \frac{Q_t}{RcNL} = \pi(1 + \varepsilon) - \frac{\pi(1 + \varepsilon)^{n+2}}{6 n \bar{\mu} (1 - \varepsilon)^2} \int_0^1 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} d\bar{z} \quad (4.51)$$

$$\bar{Q}_{rec} = \frac{\pi}{t+1} \sum_{j=1}^{t+1} [1 + \varepsilon \cos(\pi + \theta')]_j - \frac{\pi [1 + \varepsilon \cos(\pi + \theta')]^{n+2}}{6 n \bar{\mu} (1 - \varepsilon)^2} \int_0^1 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} d\bar{z} \quad (4.52)$$

Para resolver as integrais dos segundos membros das Equações (4.51) e (4.52), aplicam-se, respectivamente, as aproximações por diferenças progressivas e regressivas de três pontos, obtendo-se:

$$\int_0^1 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0} d\bar{z} = \int_{j=1}^{j=t+1} \frac{b}{4\pi} [4\bar{P}_{2,j} - \bar{P}_{3,j} - 3\bar{P}_{1,j}] d\bar{z} \quad (4.53)$$

$$\int_0^1 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\pi+\theta'} d\bar{z} = \int_{j=1}^{j=t+1} \frac{b}{4\pi} [\bar{P}_{i'-2,j} - 4\bar{P}_{i'-1,j} + 3\bar{P}_{i',j}] d\bar{z} \quad (4.54)$$

O valor de θ' é obtido em função da posição nodal " i ", cujo primeiro valor de pressão seja nulo ou negativo, de modo que, para $\theta = \pi + \theta'$, obtém-se, a partir da Equação (3.14):

$$i' = \frac{b(\pi + \theta')}{2\pi} + 1 \quad (4.55)$$

Observando-se, das condições de contorno, que as pressões são nulas para $j = 1$ e $j = t+1$ e aplicando-se a regra de Simpson, as Equações (4.53) e (4.54) são resolvidas e substituídas nas Equações (4.51) e (4.52), como segue:

$$\begin{aligned} \bar{Q}_t = \pi(1 + \varepsilon) - \frac{(1 + \varepsilon)^{n+2}}{6n\bar{\mu}(1 - \varepsilon)^2} \frac{b}{12t} \left\{ 2 \sum_{j=2}^{t/2} [4\bar{P}_{2,2j-1} - \bar{P}_{3,2j-1} - 3\bar{P}_{1,2j-1}] \right. \\ \left. + 4 \sum_{j=2}^{t/2+1} [4\bar{P}_{2,2j-1} - \bar{P}_{3,2j-1} - 3\bar{P}_{1,2j-1}] \right\} \quad (4.56) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{rec} = \frac{\pi}{t+1} \sum_{j=1}^{t+1} [1 + \varepsilon \cos(\pi + \theta')]_j \\ + \frac{[1 + \varepsilon \cos(\pi + \theta')]^{n+2}}{6n\bar{\mu}(1 - \varepsilon)^2} \frac{b}{12t} \left\{ 2 \sum_{j=2}^{t/2} [\bar{P}_{i'-2,2j-1} - 4\bar{P}_{i'-1,2j-1} + 3\bar{P}_{i',2j-1}] \right. \\ \left. + 4 \sum_{j=2}^{t/2+1} [\bar{P}_{i'-2,2j-2} - 4\bar{P}_{i'-1,2j-2} + 3\bar{P}_{i',2j-2}] \right\} \quad (4.57) \end{aligned}$$

É interessante observar na Tabela 6.6, que as posições $(\pi + \theta')_j$ que definem o início das pressões nulas (valores em branco) seguem uma distribuição aproximadamente parabólica (veja também a Figura 3.3).

4.8 ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA DO ÓLEO LUBRIFICANTE E TEMPERATURA MÉDIA DO FILME

A elevação de temperatura, ΔT , do óleo lubrificante é calculada com base no trabalho clássico de Raimondi e Boyd (1958) admitindo-se que todo o calor gerado no mancal pelo atrito viscoso do fluido é totalmente transferido para o óleo lubrificante e é então retirado por este através da vazão lateral, Q_L . Admitindo-se que não há nenhum desalinhamento entre o munhão e o mancal, a vazão lateral fica decomposta em duas parcelas iguais nas extremidades do mancal, conforme mostrado na Figura 4.2.

A elevação de temperatura, ΔT , da película de lubrificante, desde a posição ($\theta = -\phi$) até a posição ($\theta = 2\pi - \phi$), é calculada em função do trabalho realizado sobre o mesmo, com base em um equilíbrio entre a perda de potência por atrito adicionada da energia introduzida pelo óleo na posição ($\theta = -\phi$) e as energias retiradas pelo lubrificante através da vazão lateral, Q_L , e da vazão de recirculação, Q_{rec} . Isto é fazendo-se um balanço de energia no mancal, da seguinte forma:

$$\Delta Pot + Q_t \rho C_p T_{mist} = Q_{rec} \rho C_p T_{rec} + Q_L \rho C_p T_L \quad (4.58)$$

sendo:

ΔPot é a perda de potência por atrito fluido no mancal;

ρ é a massa específica do óleo lubrificante;

C_p é o calor específico do óleo lubrificante;

T_{mist} é a temperatura resultante da mistura do óleo de suprimento com o óleo de recirculação;

T_s é a temperatura do óleo de suprimento, na posição ($\theta = -\phi$);

T_{rec} é a temperatura do óleo de recirculação, na saída da cunha de óleo;

Q_{rec} é a vazão de recirculação, na saída da cunha de óleo;

Q_L é a vazão lateral ou axial de óleo;

Q_t é a vazão total de óleo lubrificante, na entrada da cunha de óleo.

No presente trabalho, a temperatura do óleo do suprimento foi fixada como $T_s = 35^\circ\text{C}$. Em alguns casos, foram usadas também as temperaturas $T_s = 45^\circ\text{C}$ e $T_s = 55^\circ\text{C}$, a fim de analisar o efeito das mesmas nos parâmetros de desempenho do mancal.

Considerando-se que a temperatura, T_L , do óleo lubrificante que sai pela lateral do mancal é igual à temperatura média do filme de óleo, T_m , e ainda que a elevação de temperatura é dada por ($\Delta T = T_{rec} - T_{mist}$), pode-se escrever, com base na Figura 4.2:

$$T_L = T_m = T_{mist} + \lambda \Delta T = T_{mist} + \lambda (T_{rec} - T_{mist}), \quad (4.59)$$

onde:

λ é uma constante empírica de ajuste para determinar uma temperatura média básica a partir da qual se obtém a viscosidade média do filme de óleo no mancal.

Substituindo-se as Equações (4.45) e (4.59) na Equação (4.58), tem-se:

$$\Delta Pot + Q_t \rho C_p T_{mist} = (Q_t - Q_L) \rho C_p T_{rec} + Q_L \rho C_p [T_{mist} + \lambda (T_{rec} - T_{mist})] \quad (4.60a)$$

ou,

$$\Delta Pot + Q_t \rho C_p T_{mist} = Q_t \rho C_p T_{rec} - Q_L \rho C_p T_{rec} + Q_L \rho C_p T_{mist} + Q_L \rho C_p \lambda (T_{rec} - T_{mist}) \quad (4.60b)$$

ou,

$$\Delta Pot + Q_t \rho C_p T_{mist} = Q_t \rho C_p T_{rec} - Q_L \rho C_p T_{rec} (1 - \lambda) + Q_L \rho C_p T_{mist} (1 - \lambda), \quad (4.60c)$$

logo, agrupando-se convenientemente, resulta,

$$\Delta Pot + Q_t \rho C_p T_{mist} = Q_t \rho C_p T_{rec} - Q_L \rho C_p (1 - \lambda) (T_{rec} - T_{mist}). \quad (4.60d)$$

Finalmente, isolando-se a perda de potência, pode-se escrever:

$$\Delta Pot = Q_t \rho C_p \Delta T - Q_L \rho C_p (1 - \lambda) \Delta T, \quad (4.61)$$

ou,

$$\Delta Pot = \rho C_p \Delta T [Q_t - Q_L (1 - \lambda)]. \quad (4.62)$$

Dessa forma, a elevação de temperatura do filme de óleo no mancal pode ser obtida:

$$\Delta T = \frac{\Delta Pot}{\rho C_p Q_t \left[1 - (1 - \lambda) \frac{Q_L}{Q_t} \right]} \quad (4.63)$$

Por outro lado, sendo $P = \frac{F}{LD}$ a pressão específica do mancal, a perda de potência é dada por:

$$\Delta P_{ot} = U F a = 2\pi R N f F = 2\pi R N f (P L 2R) \quad (4.64)$$

ou,

$$\Delta P_{ot} = 4\pi f N R^2 P L = 4\pi f \left(\frac{R}{c}\right) c N R P L. \quad (4.65)$$

Substituindo-se a Equação (4.65) na Equação (4.63) e definindo-se a elevação de temperatura adimensional tem-se:

$$\overline{\Delta T} = \frac{\rho C_p \Delta T}{P} = \frac{4\pi f \left(\frac{R}{c}\right) c N R L}{Q_t \left[1 - \frac{Q_L}{Q_t}(1-\lambda)\right]} \quad (4.66)$$

A Equação (4.66) pode ser manipulada convenientemente e expressa em função de vazões adimensionais, da seguinte forma:

$$\overline{\Delta T} = \frac{\rho C_p \Delta T}{P} = \frac{4\pi f \left(\frac{R}{c}\right)}{\frac{Q_t}{R c N L} \left[1 - \frac{Q_L}{Q_t}(1-\lambda)\right]} = \frac{4\pi f \left(\frac{R}{c}\right)}{\bar{Q}_t \left[1 - \frac{\bar{Q}_L}{\bar{Q}_t}(1-\lambda)\right]} \quad (4.67)$$

No presente trabalho adotou-se $\lambda = 0,5$, como no trabalho clássico de Raimondi e Boyd (1958), de modo que a Equação 4.67 pode ser reescrita como:

$$\overline{\Delta T} = \frac{\rho C_p \Delta T}{P} = \frac{4\pi f \left(\frac{R}{c}\right)}{\bar{Q}_t \left[1 - 0,5 \frac{\bar{Q}_L}{\bar{Q}_t}\right]} \quad (4.68)$$

A temperatura média T_m do filme de óleo no mancal, operando em regime, pode ser obtida através de um processo iterativo, descrito no Apêndice B, e resumido pelas seguintes equações:

$$T_m^{(\gamma+1)} = T_{mist}^{(\gamma+1)} + 0,5 \Delta T^{(\gamma)} \quad (4.69)$$

$$T_{rec}^{(\gamma)} = T_{mist}^{(\gamma)} + \Delta T^{(\gamma)} \quad (4.70)$$

$$T_{mist}^{(\gamma+1)} = \frac{Q_{rec} T_{rec}^{(\gamma)} + Q_L T_s}{Q_t} \quad (4.71)$$

sendo:

$T_m^{(\gamma+1)}$ é a temperatura média na iteração $\gamma + 1$;

$\Delta T^{(\gamma)}$ é a elevação de temperatura na iteração γ ; e

$T_{mist}^{(\gamma+1)}$ é a temperatura de mistura na iteração $\gamma + 1$.

O processo iterativo consiste em arbitrar inicialmente valores para as temperaturas T_m e T_{mist} , as viscosidades correspondentes e calcular então os parâmetros de comportamento, sucessivamente, até obtenção do equilíbrio térmico, conforme mostrado no Apêndice B.

4.9 PRESSÃO MÁXIMA ADIMENSIONAL E POSIÇÃO ANGULAR CORRESPONDENTE.

Uma vez determinada a distribuição de pressão adimensional nos pontos nodais do domínio computacional, é possível obter a pressão hidrodinâmica máxima, \bar{p}_{max} , ao longo da superfície do mancal. Para o caso de um mancal perfeitamente alinhado, \bar{p}_{max} estará localizada na seção transversal média do mancal. As posições angulares, θ_{max} e θ_{pmax} correspondentes podem ser vistas na Figura 3.2. A relação entre esses ângulos e o ângulo de atitude ϕ , é dada por:

$$\theta_{pmax} = \phi + \theta_{max} - \pi, \quad (4.72)$$

onde:

θ_{max} , é a posição angular de \bar{p}_{max} em relação à linha de centros OO' (Figura 3.2);

θ_{pmax} , é a posição angular de \bar{p}_{max} em relação à linha de ação da carga aplicada, F .

Capítulo 5

ESTUDO PRELIMINAR SOBRE MANCAIS RADIAIS HIDRODINÂMICOS DE DOIS LÓBULOS

5.1 INTRODUÇÃO

O mancal de dois lóbulos, também conhecido como mancal limão, ou mancal elíptico, é constituído basicamente por um mancal cilíndrico bipartido, sendo que uma pequena parcela de material é removida nas junções das duas partes (lóbulos), resultando na chamada “pré-carga”, a , do mancal, como pode ser visto na Figura 5.1. A título de ilustração, tanto a pré-carga como a folga radial, c , do mancal cilíndrico (folga de referência do mancal limão) estão exageradas na figura. Portanto, o mancal limão é constituído por dois lóbulos de quase 180° . Geralmente, na literatura, são consideradas também duas ranhuras de 15° em cada um dos lóbulos, resultando em uma ranhura com um ângulo total de 30° em cada junção, de modo que o mancal limão ficaria constituído por dois lóbulos de 150° , como por exemplo, em Pinkus (1956), Singh e Gupta (1982) e, mais recentemente, Faria e Correa (2011).

Pinkus (1956) aplicou o método de diferenças finitas para solução da equação de Reynolds, após desenvolver equações geométricas básicas para mancais limão. Considerou cada lóbulo abrangendo um arco de 150° , devido à colocação de duas ranhuras de 30° nas duas junções dos lóbulos para alimentação de óleo lubrificante. Outros pesquisadores adotaram a mesma geometria, isto é, dois arcos de 150° , tais como Singh e Gupta (1982), que aplicaram o método de diferenças finitas para solução do problema. Mais recentemente, Faria e Correia (2011) aplicaram o método de elementos finitos para determinação de parâmetros

estáticos e dinâmicos de funcionamento de um mancal limão, também constituído basicamente por dois lóbulos de 150° . Foi utilizado um mancal com diâmetro nominal de 100 mm e relações entre largura e diâmetro L/D iguais a 0,25; 0,50; 0,75; e 1,0.

O mancal cilíndrico apresenta geometria mais simples e, conseqüentemente, menor custo de fabricação. No entanto, para o caso de eixos operando em maiores velocidades, há uma tendência de aparecer instabilidade dinâmica. Nesse caso, mancais de geometria não circular, como por exemplo, o mancal de dois lóbulos, torna-se mais favorável.

Conforme mostrado na Figura 5.1, para o caso de carga muito leve e/ou velocidade de rotação muito elevada, o munhão de um mancal cilíndrico tende a ocupar uma posição concêntrica com a bucha, de modo que não ocorre a distribuição de pressão hidrodinâmica mostrada na Figura 3.2, uma vez que não existe a cunha de óleo. Como consequência o eixo tende a apresentar instabilidade dinâmica, sendo que o centro do munhão passa a descrever movimentos “orbitais” em torno da posição O' mostrado na Figura 1.2.

Por outro lado, para condições simultâneas de carga leve (ou reduzida) e velocidade elevada, a utilização do mancal de dois lóbulos resulta em duas cunhas de óleo diametralmente opostas, como pode ser visto na Figura 5.1. Conseqüentemente ocorrem duas distribuições de pressão opostas no filme de óleo, aumentando consideravelmente a “rigidez” ou estabilidade dinâmica do eixo.

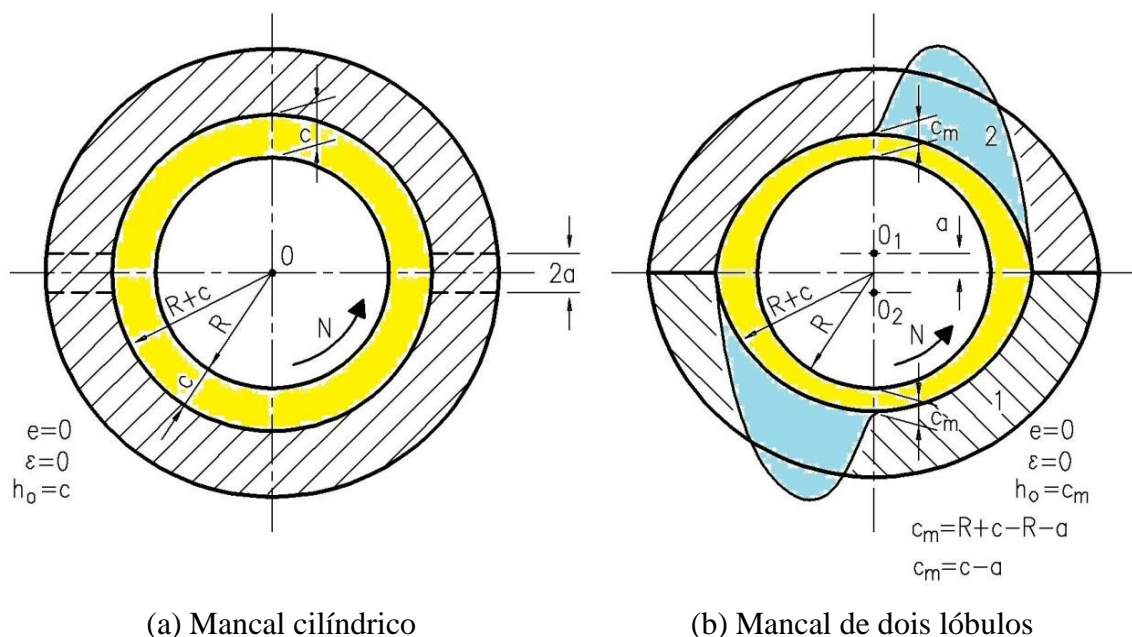


Figura 5.1 Comparação entre mancal cilíndrico e mancal de dois lóbulos

5.2 MODELO FÍSICO

Em condições normais de operação, o munhão ocupa uma posição excêntrica em relação ao mancal, conforme mostrado na Figura 5.2, de modo que resultam duas “cunhas de óleo”, uma essencialmente no lóbulo inferior (lóbulo 1), abrangendo a região angular:

$$\theta = 0^\circ \text{ até } 180^\circ - \beta.$$

E outra no lóbulo superior (lóbulo 2), abrangendo a região angular:

$$\theta = 180^\circ + (90^\circ - \phi) \text{ até } 180^\circ + (90^\circ - \phi) - \alpha.$$

Conseqüentemente ocorre uma distribuição de pressão no lóbulo inferior e outra no lóbulo superior. Isso resulta em uma maior estabilidade dinâmica do mancal, mas aparentemente, uma menor capacidade de carga. No entanto, a existência da “pré-carga” resulta, indiretamente, em uma redução da folga radial inicial, e, conseqüentemente, um possível aumento da capacidade de carga, para o caso de um mancal cilíndrico. Convém ressaltar que, em termos adimensionais, a tendência é inversa, isto é, a capacidade de carga adimensional decresce com a redução da folga radial.

Outros parâmetros geométricos de um mancal limão, tais como, “pré-carga”, a , excentricidades ε_1 e ε_2 , ângulos β e α , etc, podem também ser visualizados na Figura 5.2, onde pode ser observado que cada vetor pressão pode ser decomposto em uma componente, $p \cos \theta$, paralela à linha de centros, e uma componente perpendicular a essa linha, $p \sin \theta$. O somatório do produto das componentes $p \cos \theta$ pelas correspondentes áreas elementares $R d\theta dz$ representa a componente de carga na direção paralela à linha de centros.

De maneira semelhante, o somatório do produto $p \sin \theta R d\theta dz$ representa a componente de carga na direção perpendicular à linha de centros. Tradicionalmente e de maneira não muito apropriada, essas componentes têm sido referidas como componentes radiais e tangenciais, respectivamente.

Dos triângulos ΔABO e ΔACO tem-se:

$$e_1 = \sqrt{e^2 + a^2 - 2ea \cos(180 - \phi)}; \quad e_2 = \sqrt{e^2 + a^2 - 2ea \cos \phi} \quad (5.1)$$

$$\beta = \arccos \frac{e^2 + e_1^2 - a^2}{2 e e_1}; \quad \alpha = \arccos \frac{e^2 + e_2^2 - a^2}{2 e e_2} \quad (5.2)$$

Dos triângulos ΔABP e ΔACQ pode-se escrever:

$$(R+c)^2 = e_1^2 + (R+h_1)^2 - 2e_1(R+h_1) \cos(\theta + \beta); \quad (5.3)$$

$$(R+c)^2 = e_2^2 + (R+h_2)^2 - 2e_2(R+h_2) \cos(\theta - \alpha); \quad (5.4)$$

$$h_1^2 + [2R - 2e_1 \cos(\theta + \beta)]h_1 + [e_1^2 - c^2 - 2R(e_1 \cos(\theta + \beta) + c)] = 0 \quad (5.5)$$

$$h_2^2 + [2R - 2e_2 \cos(\theta - \alpha)]h_2 + [e_2^2 - c^2 - 2R(e_2 \cos(\theta - \alpha) + c)] = 0 \quad (5.6)$$

Resolvendo-se as equações do segundo grau, em h_1 e h_2 , Equações (5.3), as soluções das mesmas resultaram em equações extensas, de difícil manipulação. Desmembrando-as convenientemente, removendo-se algumas parcelas de valores desprezíveis e dividindo-se os parâmetros pela folga radial, c , obtêm-se finalmente as equações das espessuras adimensionais H_1 e H_2 , do filme de óleo no lóbulo inferior e no lóbulo superior, respectivamente:

$$H_1 = 1 + \varepsilon_1 \cos(\theta + \beta); \quad H_2 = 1 + \varepsilon_2 \cos(\theta - \alpha) \quad (5.7)$$

A Figura 5.3 mostra a variação da espessura adimensional do filme de óleo, H_1 e H_2 , obtida pelas Equações (5.7), para um ângulo de atitude $\phi = 63^\circ$ e uma excentricidade adimensional $\varepsilon = 0,44$ e pré-carga $a = 0,5$. A aplicação das soluções exatas, Equações (5.3), resulta em diferenças apenas nas quartas casas decimais, totalmente desprezíveis.

Para construção da Figura 5.3, no programa computacional, foram definidos o limite angular inicial para o lóbulo 1, $LIE_1 = (90^\circ - \phi)$, no caso 27° , o limite comum na junção dos dois lóbulos, $LCE_1E_2 = 180^\circ + LIE_1$, no caso 207° e o limite final do lóbulo dois, $LSE_2 = LCE_1E_2 + 180^\circ$, no caso 387° , ou seja, $360^\circ + 27^\circ$, onde $\phi = 63^\circ$ é o ângulo de atitude.

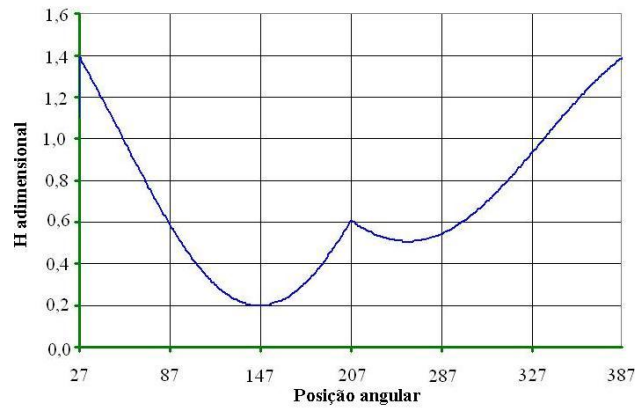


Figura 5.3 Variação das espessuras adimensionais de filme de óleo nos dois lóbulos

5.3.2 Apresentação das Equações para o Mancal Limão

As equações usadas para o mancal limão descrita aqui estão em conformidade com Castro Lima, A. E., et al. (2011) apresentado no VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM-2012; que são:

- Número de Sommerfeld

$$S = \frac{\mu N}{P} \left(\frac{R}{c} \right)^2 = \frac{mNLd}{F} \left(\frac{U}{c} \right)^{n-1} \left(\frac{R}{c} \right)^2 \quad (5.8)$$

- Capacidade de carga adimensional

$$\bar{F} = \sqrt{\bar{F}_r^2 + \bar{F}_t^2} = F \frac{c^{n+1}}{U^n m_s L R^2} \quad (5.9)$$

- Família de pressões discretizadas

$$\bar{P}_{i,j} = A_i \bar{P}_{i+1,j} + B_i \bar{P}_{i-1,j} + 2 \left(\frac{R}{L} \right) \frac{\Delta \theta^2}{\text{Den2}} (\bar{P}_{i,j+1} + \bar{P}_{i,j-1}) + C_i, \quad (5.10)$$

sendo A_i , B_i , C_i e Den2 para o primeiro lóbulo, ε_1 , dados por:

$$A_i = \left\{ 2 - \frac{(n+2) \varepsilon_1 \sin[(i-1)\Delta\theta + \beta]}{1 + \varepsilon_1 \cos[(i-1)\Delta\theta + \beta]} \Delta\theta \right\} \frac{\Delta \bar{Z}^2}{\text{Den2}}; \quad (5.10a)$$

$$B_i = \left\{ 2 + \frac{(n+2) \varepsilon_1 \sin[(i-1)\Delta\theta + \beta]}{1 + \varepsilon_1 \cos[(i-1)\Delta\theta + \beta]} \Delta\theta \right\} \frac{\Delta\bar{Z}^2}{\text{Den2}}; \quad (5.10b)$$

$$C_i = \frac{12 n \bar{m} \varepsilon_1 \sin[(i-1)\Delta\theta + \beta]}{\{1 + \varepsilon_1 \cos[(i-1)\Delta\theta + \beta]\}^{n+2}} \frac{\Delta\theta^2 \Delta\bar{Z}^2}{\text{Den2}}; \quad (5.10c)$$

$$\text{Den2} = 4 \left\{ \Delta\bar{Z}^2 + n \left(\frac{R}{L} \right)^2 \Delta\theta^2 \right\}. \quad (5.10d)$$

Definindo-se b e t como os números de divisões na malha de diferenças finitas, a posição circunferencial e a posição axial de cada ponto nodal são dadas por:

$$\theta = (i-1)\Delta\theta = (i-1) \frac{2\pi}{b}; \quad \bar{z} = (j-1)\Delta\bar{z} = \frac{(j-1)}{t} \quad (5.10e)$$

Para o caso do lóbulo dois, ε_2 , nos coeficientes dados pelas Equações (5.10), deve-se substituir ε_1 por ε_2 e nos termos entre colchetes “ $+\beta$ ” por “ $-\alpha$ ”.

Para solução da Equação (5.10) foi empregado o método iterativo de Gauss-Seidel, juntamente com o esquema de sobre-relaxação sucessiva (SOR), de maneira semelhante ao descrito no Capítulo 3.

Uma vez determinada a distribuição de pressão nos dois lóbulos, os parâmetros de comportamento (parâmetros resultantes) do mancal são obtidos pela aplicação do método de integração de Simpson.

Capítulo 6

RESULTADOS

6.1 DADOS DOS MANCAIS RADIAIS HIDRODINÂMICOS

Os parâmetros de desempenho do mancal, obtidos por simulação computacional, estão apresentados a seguir na forma de tabelas e gráficos para diferentes excentricidades ε , relações entre largura e diâmetro L/D (0,25; 0,5; 1,0; 1,25; e 1,50), bem como para três valores dos seguintes dados de entrada: temperaturas do óleo de suprimento T_m , rotações do munhão N , folgas radiais c e índices de característica reológica n .

Para a simulação computacional foram considerados os seguintes parâmetros físicos do mancal radial hidrodinâmico:

Diâmetro do eixo: $d = 100$ mm;

Folga radial do mancal: $c = 0,05$ mm, 0,10 mm e 0,15 mm

Comprimento axial da bucha: $L = 25$ mm, 50 mm e 100 mm

Velocidade de rotação do eixo: $N = 1500$ rpm, 2100 rpm e 2700 rpm

Excentricidade específica: ε variando de 0,1 a 0,9 com incremento de 0,1

Massa específica do óleo lubrificante: $\rho = 881,6$ kg / m³

Calor específico do óleo lubrificante: $c_p = 1.840$ J / kg°C

Temperatura de referência (óleo de suprimento): $T_s = 35$ °C, 45 °C e 55 °C

Viscosidade absoluta à temperatura de referência de 35 °C: $m_s = 43$ mPa.sⁿ

Viscosidade absoluta à temperatura de 40°C: $m_{40} = 35,08$ mPa.sⁿ

Viscosidade absoluta à temperatura de 100°C: $m_{100} = 6,57 \text{ mPa.s}^n$

Índice de característica reológica do lubrificante: $n = 0,8; 1,0 \text{ e } 1,1$.

6.2 DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO

Conforme sequência descrita no Capítulo 3, inicialmente foi calculada a distribuição de pressão no filme de óleo do mancal, para várias condições de operação.

6.2.1 Análise Comparativa da Distribuição de Pressões

Para facilitar a comparação entre os valores de pressão disponíveis na literatura e os obtidos no presente trabalho, foi utilizada a seguinte maneira de expressar a pressão adimensional, \bar{P} , em função da pressão dimensional, P :

$$\bar{P} = \frac{P}{2\pi N m_s \left(\frac{U}{c}\right)^{n-1} \left(\frac{R}{c}\right)^2} \quad (6.1)$$

Inicialmente, foi calculada uma distribuição de pressões para um mancal com os dados utilizados por Kasai et al. (2012), como segue:

Diâmetro do eixo: $d = 80 \text{ mm}$;

Folga radial do mancal: $c = 0,086 \text{ mm}$

Comprimento axial da bucha: $L = 80 \text{ mm}$

Velocidade de rotação do eixo: $N = 500 \text{ rpm}$

Excentricidade específica: $\mathcal{E} = 0,87$

Densidade do óleo lubrificante: $\rho = 809 \text{ kg / m}^3$

Temperatura de referência (óleo de suprimento): $T_s = 60 \text{ }^\circ\text{C}$

Viscosidade absoluta à temperatura de referência de 60°C: $m_s = 11,71 \text{ mPa.s}$

Viscosidade absoluta à temperatura de 40°C: $m_{40} = 22,425 \text{ mPa.s}$

Viscosidade absoluta à temperatura de 80°C: $m_{100} = 7,013 \text{ mPa.s}$

Os valores calculados de pressão adimensional de acordo com a sequência indicada no Capítulo 3, mas utilizando-se a Equação 6.1, estão mostrados na Tabela 6.1 e nas Figuras 6.1 e 6.2. Os valores dimensionais correspondentes estão em boa concordância com os valores obtidos experimentalmente por Kasai et al. (2012). Por exemplo, multiplicando-se o valor de

pressão adimensional máxima $\bar{P}_{max} = 18,661$ mostrado na Tabela 6.1 e na Figura 6.2, pelo denominador da Equação 6.1, obtêm-se o valor $P_{max} \cong 3,867$ MPa, muito próximo do valor experimental correspondente obtido por Kasai et al. (2012), $P_{max} \cong 3,8$ MPa.

As Figuras 6.1 a 6.12 mostram distribuição adimensional de pressões \bar{P} nos planos axial e circunferencial referentes às Tabelas 6.1 a 6.6.

Tabela 6.1. Distribuição de pressão adimensional \bar{P} com os dados de Kasai et al.(2012) $N=500$ rpm, $\varepsilon=0,87$; $n=1$; $L/D=0,8$; $c=0,086$ mm; malha (361x57) nós

	1	5	8	11	14	17	20	23	26	29	32	35	38	41	44	47	50	53	57	
1																				
5		0,004	0,006	0,009	0,010	0,012	0,013	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,013	0,012	0,010	0,009	0,006	0,004		
25		0,026	0,042	0,056	0,068	0,077	0,084	0,090	0,093	0,094	0,093	0,090	0,085	0,078	0,068	0,056	0,042	0,026		
35		0,040	0,065	0,087	0,105	0,119	0,131	0,139	0,143	0,145	0,143	0,139	0,131	0,120	0,105	0,087	0,065	0,040		
45		0,058	0,095	0,126	0,153	0,174	0,190	0,202	0,209	0,211	0,209	0,202	0,191	0,175	0,154	0,127	0,096	0,058		
65		0,118	0,192	0,255	0,308	0,350	0,382	0,405	0,419	0,424	0,420	0,406	0,384	0,352	0,309	0,257	0,193	0,118		
75		0,168	0,274	0,364	0,439	0,498	0,544	0,576	0,595	0,602	0,596	0,577	0,545	0,500	0,441	0,366	0,276	0,168		
85		0,244	0,397	0,526	0,632	0,717	0,782	0,827	0,854	0,864	0,855	0,829	0,784	0,720	0,635	0,529	0,399	0,244		
115		0,848	1,359	1,778	2,113	2,374	2,570	2,706	2,786	2,813	2,787	2,709	2,574	2,379	2,118	1,783	1,364	0,851		
125		1,350	2,146	2,786	3,291	3,679	3,967	4,164	4,280	4,319	4,282	4,168	3,972	3,685	3,297	2,792	2,151	1,353		
145		3,574	5,543	7,047	8,183	9,028	9,634	10,042	10,277	10,355	10,280	10,047	9,641	9,036	8,192	7,055	5,550	3,579		
165		7,033	10,623	13,237	15,141	16,515	17,481	18,120	18,484	18,604	18,487	18,126	17,489	16,525	15,151	13,247	10,631	7,039		
170		6,770	10,234	12,767	14,620	15,960	16,904	17,529	17,886	18,003	17,889	17,534	16,911	15,969	14,629	12,777	10,242	6,775		
175		5,384	8,247	10,389	11,982	13,147	13,974	14,525	14,840	14,943	14,842	14,529	13,981	13,155	11,990	10,397	8,253	5,388		
188		0,173	0,549	0,955	1,322	1,623	1,854	2,014	2,108	2,139	2,109	2,016	1,856	1,626	1,324	0,958	0,552	0,176		
189		0,049	0,282	0,576	0,858	1,096	1,282	1,412	1,488	1,513	1,489	1,413	1,284	1,098	0,860	0,579	0,285	0,051		
190			0,101	0,291	0,493	0,671	0,815	0,916	0,975	0,995	0,976	0,917	0,816	0,672	0,494	0,293	0,104			
191			0,006	0,101	0,229	0,350	0,454	0,528	0,571	0,585	0,571	0,528	0,455	0,351	0,230	0,103	0,010			
192				0,004	0,065	0,133	0,200	0,247	0,275	0,284	0,275	0,248	0,200	0,134	0,066	0,006				
193						0,017	0,050	0,073	0,086	0,091	0,086	0,073	0,050	0,018						
194																				
195																				
196																				
197																				
225																				
245																				
360																				
361																				

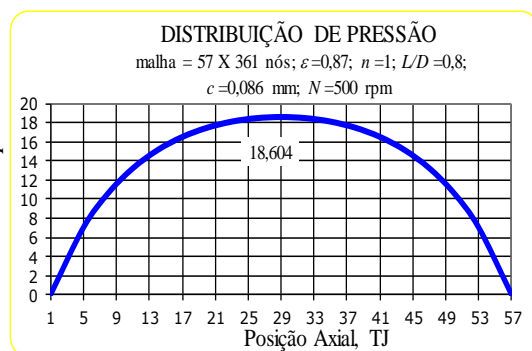


Figura 6.1. Pressão adimensional \bar{P} , direção axial.

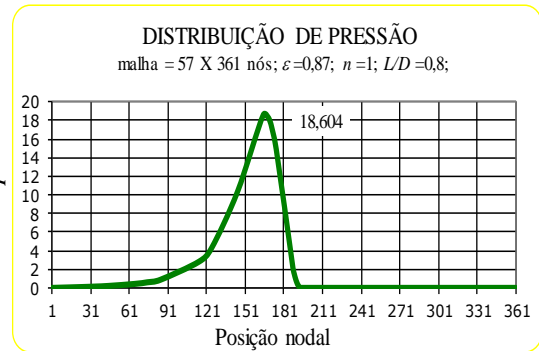


Figura 6.2. Pressão adimensional \bar{P} , direção circunferencial.

Observação: As Tabelas 6.1 a 6.2 mostram apenas as pressões calculadas em alguns pontos nodais, convenientemente escolhidos, de modo a mostrar principalmente a distribuição de pressões na região correspondente às posições angulares $\pi + \theta'$, destacando-se também a região de pressão máxima. Os valores de pressão nula foram deixados em branco, de maneira

a destacar o perfil praticamente parabólico na região de separação entre as pressões positivas e nulas, confirmando a condição de contorno de Reynolds, estabelecida inicialmente na Figura 3.3.

Uma segunda comparação da distribuição de pressão obtida no presente trabalho foi realizada com os resultados de Gertzos et al. (2008), que utilizaram a condição de contorno de meio-Sommerfeld e, como a maioria dos autores, expressaram a pressão adimensional da seguinte maneira, para um fluido newtoniano ($n = 1$):

$$\bar{P} = \frac{P}{2\pi N m_g \left(\frac{R}{c}\right)^2} \quad (6.2)$$

sendo m_g a viscosidade absoluta do óleo lubrificante, sem referência de temperatura.

Considerando-se a Equação 6.1 adaptada para um fluido newtoniano ($n = 1$), tem-se:

$$\bar{P} = \frac{P}{2\pi N m_s \left(\frac{R}{c}\right)^2} \quad (6.3)$$

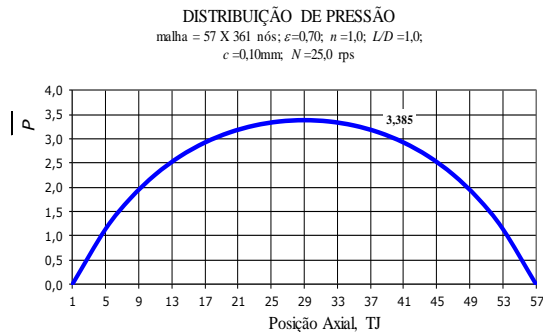
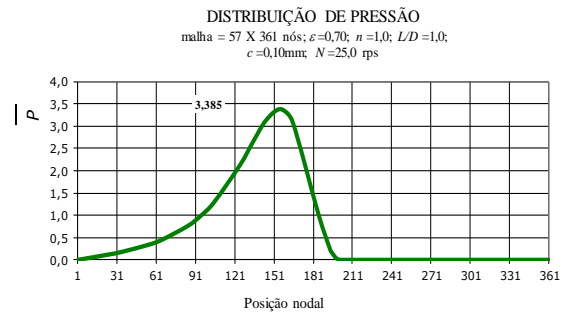
sendo m_s a viscosidade absoluta do óleo lubrificante, à temperatura de suprimento ao mancal. Analisando-se as Equações 6.2 e 6.3 pode-se concluir que os valores de pressão adimensional obtidos na presente dissertação devem ser divididos pela viscosidade adimensional \bar{m} , a fim de comparar com os valores obtidos por outros pesquisadores. Por exemplo, dividindo-se o valor $\bar{P}_{\max} = 3,385$ mostrado na Tabela 6.2, pelo valor $\bar{m} = 0,633$ apresentado na Tabela 6.15, obtém-se o valor $\bar{P}_{\max,0} = 5,374$, também mostrado na Tabela 6.15. Comparando-se esse valor de pressão adimensional com o valor $\bar{P}_{\max} = 4,880$, obtido por Gertzos et al. (2008), pode-se concluir que as pressões adimensionais obtidas na presente dissertação são cerca de 10% maiores. Isto era de se esperar, uma vez que, conforme mostrado no Apêndice C, as pressões calculadas mediante utilização da condição de contorno de Reynolds resultam na faixa de 10% a 11% maiores que os valores obtidos pela aplicação da condição de contorno de meio-Sommerfeld.

Outros dados que podem ser verificados da Tabela 6.2:

$$\theta_{\max} = 156^\circ; \theta' = 201 - 180 = 21^\circ; \bar{P}_{\max} = 3,385.$$

Tabela 6.2. Distribuição de pressão \bar{P} com os dados de Gertzos et al.(2008)
 $N=1500$ rpm; $\varepsilon=0,70$; $n=1,0$; $L/D=1,0$; $c=0,1$ mm; malha (361x57) nós

	1	5	8	11	14	17	20	23	26	29	32	35	38	41	44	47	50	53	57	
1																				
5		0,005	0,008	0,011	0,014	0,016	0,017	0,018	0,019	0,019	0,019	0,018	0,017	0,016	0,014	0,011	0,008	0,005		
25		0,032	0,053	0,071	0,087	0,099	0,109	0,115	0,120	0,121	0,120	0,116	0,109	0,099	0,087	0,072	0,053	0,032		
35		0,049	0,080	0,107	0,130	0,148	0,162	0,173	0,179	0,181	0,179	0,173	0,163	0,148	0,130	0,107	0,080	0,049		
55		0,092	0,151	0,201	0,243	0,278	0,304	0,322	0,334	0,337	0,334	0,323	0,304	0,278	0,244	0,202	0,151	0,092		
65		0,123	0,201	0,267	0,322	0,367	0,401	0,425	0,440	0,445	0,440	0,426	0,401	0,367	0,323	0,267	0,201	0,123		
85		0,215	0,349	0,462	0,555	0,629	0,686	0,726	0,750	0,758	0,750	0,726	0,687	0,630	0,556	0,463	0,350	0,215		
95		0,285	0,461	0,608	0,728	0,823	0,896	0,946	0,976	0,986	0,976	0,947	0,896	0,824	0,729	0,609	0,462	0,285		
105		0,379	0,610	0,801	0,955	1,076	1,168	1,232	1,270	1,282	1,270	1,232	1,169	1,077	0,956	0,801	0,611	0,379		
125		0,663	1,052	1,366	1,614	1,806	1,949	2,047	2,105	2,124	2,105	2,048	1,949	1,807	1,615	1,367	1,053	0,663		
135		0,851	1,341	1,729	2,033	2,266	2,438	2,556	2,624	2,647	2,625	2,556	2,439	2,267	2,034	1,730	1,342	0,852		
145		1,035	1,620	2,076	2,430	2,699	2,896	3,031	3,109	3,135	3,109	3,031	2,897	2,700	2,431	2,078	1,621	1,036		
156		1,138	1,770	2,260	2,638	2,923	3,132	3,275	3,357	3,385	3,358	3,275	3,133	2,924	2,639	2,261	1,771	1,138		
165		1,038	1,618	2,070	2,420	2,687	2,882	3,015	3,093	3,119	3,093	3,016	2,883	2,687	2,421	2,071	1,619	1,038		
185		0,227	0,408	0,573	0,714	0,828	0,915	0,977	1,013	1,025	1,013	0,977	0,916	0,828	0,714	0,573	0,409	0,227		
194		0,003	0,029	0,070	0,112	0,152	0,184	0,208	0,223	0,228	0,223	0,208	0,184	0,152	0,113	0,070	0,030	0,003		
195			0,014	0,043	0,076	0,108	0,136	0,156	0,168	0,173	0,168	0,156	0,136	0,109	0,077	0,043	0,014			
198				0,001	0,010	0,022	0,035	0,045	0,051	0,053	0,051	0,045	0,035	0,022	0,010	0,001				
199					0,002	0,008	0,016	0,022	0,027	0,029	0,027	0,023	0,016	0,008	0,002					
200						0,000	0,004	0,008	0,011	0,012	0,011	0,008	0,004	0,001						
201								0,000	0,002	0,002	0,002	0,000								
202																				
205																				
345																				
350																				
355																				
360																				
361																				

Figura 6.3. Pressão adimensional \bar{P} , direção axial.Figura 6.4. Pressão adimensional \bar{P} , direção circunferencial.

Ao contrário do procedimento utilizado para obter os dados das Tabelas 6.1 e 6.2, para o caso das Tabelas 6.3 a 6.6, os valores de pressões foram obtidos com base na Equação 3.6, sendo que essas tabelas mostram apenas as pressões calculadas em alguns pontos nodais, convenientemente escolhidos, de modo a mostrar principalmente a distribuição de pressões na região correspondente às posições angulares $\pi + \theta'$, destacando-se também a região de pressão máxima.

A Tabela 6.3, mostra pressões adimensionais para óleo pseudoplástico com uma relação $L/D = 0,50$ e excentricidade específica $\varepsilon = 0,7$. Pode-se notar que a pressão adimensional máxima obtida é $\bar{P}_{max} = 0,1741$; $\theta_{max} = 155^\circ$; $\theta' = 196 - 180 = 16^\circ$.

Tabela 6.3. Distribuição de pressão adimensional, \bar{P}

$N=1500$ rpm; $\varepsilon=0,70$; $n=0,8$; $L/D=0,5$; $c=0,1$ mm; malha (361x57) nós

	1	5	8	11	14	17	20	23	26	29	32	35	38	41	44	47	50	53	57	
1																				
5		0,0002	0,0003	0,0004	0,0005	0,0006	0,0007	0,0007	0,0007	0,0008	0,0007	0,0007	0,0007	0,0006	0,0005	0,0004	0,0003	0,0002		
15		0,0007	0,0012	0,0016	0,0019	0,0022	0,0024	0,0026	0,0027	0,0027	0,0027	0,0026	0,0024	0,0022	0,0019	0,0016	0,0012	0,0007		
25		0,0013	0,0021	0,0028	0,0034	0,0039	0,0043	0,0046	0,0047	0,0048	0,0048	0,0046	0,0043	0,0039	0,0034	0,0028	0,0021	0,0013		
35		0,0019	0,0032	0,0042	0,0052	0,0059	0,0065	0,0069	0,0072	0,0073	0,0072	0,0069	0,0065	0,0059	0,0052	0,0043	0,0032	0,0019		
45		0,0027	0,0045	0,0060	0,0073	0,0084	0,0092	0,0098	0,0101	0,0102	0,0101	0,0098	0,0092	0,0084	0,0073	0,0060	0,0045	0,0027		
55		0,0037	0,0061	0,0082	0,0100	0,0114	0,0126	0,0134	0,0138	0,0140	0,0139	0,0134	0,0126	0,0114	0,0100	0,0082	0,0061	0,0037		
65		0,0050	0,0083	0,0111	0,0135	0,0154	0,0169	0,0180	0,0187	0,0189	0,0187	0,0180	0,0169	0,0154	0,0135	0,0111	0,0083	0,0050		
75		0,0068	0,0111	0,0149	0,0181	0,0207	0,0227	0,0242	0,0250	0,0253	0,0250	0,0242	0,0227	0,0207	0,0181	0,0149	0,0111	0,0068		
85		0,0091	0,0150	0,0200	0,0243	0,0278	0,0305	0,0324	0,0335	0,0339	0,0335	0,0324	0,0305	0,0278	0,0243	0,0200	0,0150	0,0091		
95		0,0123	0,0202	0,0270	0,0327	0,0373	0,0409	0,0434	0,0450	0,0455	0,0450	0,0434	0,0409	0,0373	0,0327	0,0270	0,0202	0,0123		
105		0,0166	0,0273	0,0363	0,0439	0,0501	0,0548	0,0582	0,0602	0,0609	0,0603	0,0582	0,0549	0,0501	0,0440	0,0364	0,0273	0,0166		
155		0,0510	0,0821	0,1079	0,1289	0,1456	0,1582	0,1671	0,1724	0,1741	0,1724	0,1671	0,1583	0,1456	0,1290	0,1080	0,0822	0,0510		
156		0,0510	0,0821	0,1078	0,1288	0,1454	0,1580	0,1669	0,1721	0,1739	0,1721	0,1669	0,1581	0,1455	0,1288	0,1079	0,0821	0,0510		
157		0,0508	0,0818	0,1075	0,1284	0,1450	0,1575	0,1664	0,1716	0,1733	0,1716	0,1664	0,1576	0,1450	0,1285	0,1075	0,0819	0,0509		
190		0,0007	0,0024	0,0045	0,0068	0,0089	0,0107	0,0120	0,0129	0,0132	0,0129	0,0120	0,0107	0,0089	0,0068	0,0046	0,0024	0,0007		
191		0,0002	0,0012	0,0028	0,0045	0,0062	0,0077	0,0088	0,0095	0,0097	0,0095	0,0088	0,0077	0,0062	0,0045	0,0028	0,0012	0,0002		
192			0,0004	0,0014	0,0027	0,0040	0,0051	0,0060	0,0066	0,0068	0,0066	0,0060	0,0051	0,0040	0,0027	0,0014	0,0004			
193				0,0005	0,0013	0,0022	0,0031	0,0037	0,0042	0,0043	0,0042	0,0037	0,0031	0,0022	0,0013	0,0005	0,0000			
194				0,0000	0,0004	0,0010	0,0015	0,0020	0,0023	0,0024	0,0023	0,0020	0,0015	0,0010	0,0004	0,0000				
195						0,0002	0,0005	0,0008	0,0010	0,0011	0,0010	0,0008	0,0005	0,0002						
196								0,0001	0,0002	0,0003	0,0002	0,0001								
197																				
225																				
295																				
335																				
345																				
355																				
361																				

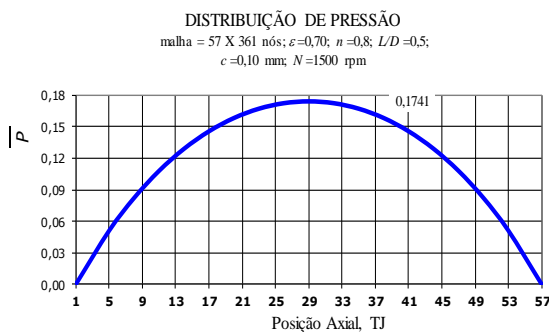


Figura 6.5. Pressão adimensional \bar{P} , direção axial.

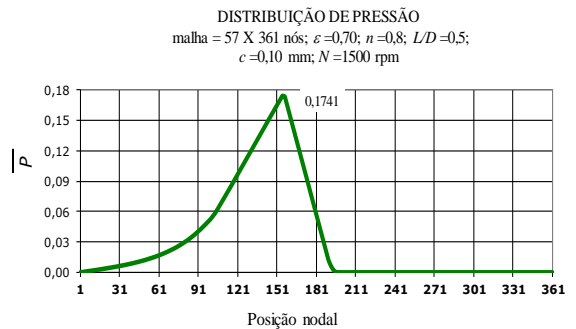


Figura 6.6. Pressão adimensional \bar{P} , direção circunferencial.

Analisando-se a Tabela 6.4, os seguintes valores podem ser observados:

$$\theta' = 195^\circ - 180 = 15^\circ; \bar{P}_{max} = 0,1598; \theta_{max} = 156^\circ.$$

Os valores de θ' e θ_{max} , são inteiros, devido à variação angular com valores inteiros. São mostradas curvas, axial e circunferencial As Figuras 6.7 e 6.8. Para plotagem dos gráficos foram usados apenas alguns pontos da parte reta da distribuição, mas com todos os pontos da distribuição parabólica. Para todas as tabelas nota-se que a pressão cai a 0 (zero) entre 180° a 210° e permanece com esse valor até 360° (parte do filme de óleo divergente entre mancal e munhão).

Tabela 6.4. Distribuição de pressão adimensional, \bar{P}

$N=1500$ rpm; $\varepsilon = 0,70$; $n = 1,0$; $L/D = 0,5$; $c = 0,1$ mm; malha (361x57) nós

	1	5	8	11	14	17	20	23	26	29	32	35	38	41	44	47	50	53	57	
1																				
5		0,0001	0,0002	0,0003	0,0003	0,0004	0,0004	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004	0,0003	0,0003	0,0002	0,0001		
15		0,0005	0,0008	0,0010	0,0012	0,0014	0,0016	0,0017	0,0017	0,0018	0,0017	0,0017	0,0016	0,0014	0,0012	0,0010	0,0008	0,0005		
25		0,0008	0,0014	0,0018	0,0022	0,0026	0,0028	0,0030	0,0031	0,0032	0,0031	0,0030	0,0028	0,0026	0,0022	0,0018	0,0014	0,0008		
35		0,0013	0,0021	0,0028	0,0034	0,0039	0,0043	0,0046	0,0048	0,0048	0,0048	0,0046	0,0043	0,0039	0,0034	0,0028	0,0021	0,0013		
45		0,0018	0,0030	0,0040	0,0049	0,0056	0,0061	0,0065	0,0068	0,0069	0,0068	0,0066	0,0062	0,0056	0,0049	0,0040	0,0030	0,0018		
55		0,0025	0,0042	0,0056	0,0068	0,0078	0,0085	0,0091	0,0094	0,0095	0,0094	0,0091	0,0085	0,0078	0,0068	0,0056	0,0042	0,0025		
65		0,0035	0,0057	0,0077	0,0093	0,0107	0,0117	0,0125	0,0129	0,0131	0,0129	0,0125	0,0117	0,0107	0,0093	0,0077	0,0057	0,0035		
75		0,0048	0,0079	0,0105	0,0128	0,0146	0,0161	0,0171	0,0177	0,0179	0,0177	0,0171	0,0161	0,0146	0,0128	0,0105	0,0079	0,0048		
85		0,0066	0,0108	0,0145	0,0176	0,0201	0,0221	0,0235	0,0243	0,0246	0,0243	0,0235	0,0221	0,0201	0,0176	0,0145	0,0108	0,0066		
95		0,0091	0,0150	0,0201	0,0243	0,0278	0,0305	0,0324	0,0336	0,0339	0,0336	0,0324	0,0305	0,0278	0,0243	0,0201	0,0150	0,0091		
105		0,0127	0,0209	0,0279	0,0338	0,0385	0,0422	0,0449	0,0464	0,0469	0,0464	0,0449	0,0422	0,0386	0,0338	0,0279	0,0209	0,0127		
155		0,0464	0,0748	0,0985	0,1179	0,1333	0,1449	0,1532	0,1580	0,1597	0,1580	0,1532	0,1450	0,1333	0,1179	0,0986	0,0749	0,0464		
156		0,0465	0,0750	0,0987	0,1180	0,1334	0,1451	0,1533	0,1582	0,1598	0,1582	0,1534	0,1452	0,1335	0,1181	0,0987	0,0750	0,0465		
157		0,0465	0,0749	0,0986	0,1179	0,1333	0,1450	0,1532	0,1581	0,1597	0,1581	0,1532	0,1450	0,1334	0,1180	0,0986	0,0750	0,0465		
190		0,0002	0,0013	0,0028	0,0044	0,0060	0,0073	0,0084	0,0090	0,0092	0,0090	0,0084	0,0073	0,0060	0,0044	0,0028	0,0013	0,0002		
191			0,0004	0,0014	0,0026	0,0037	0,0048	0,0056	0,0061	0,0063	0,0061	0,0056	0,0048	0,0037	0,0026	0,0014	0,0004			
192				0,0005	0,0012	0,0020	0,0028	0,0034	0,0037	0,0039	0,0037	0,0034	0,0028	0,0020	0,0012	0,0005	0,0000			
193					0,0003	0,0008	0,0013	0,0017	0,0019	0,0020	0,0019	0,0017	0,0013	0,0008	0,0003	0,0000				
194						0,0001	0,0004	0,0006	0,0007	0,0008	0,0007	0,0006	0,0004	0,0001						
195									0,0001	0,0001	0,0001									
196																				
215																				
225																				
295																				
335																				
345																				
355																				
361																				

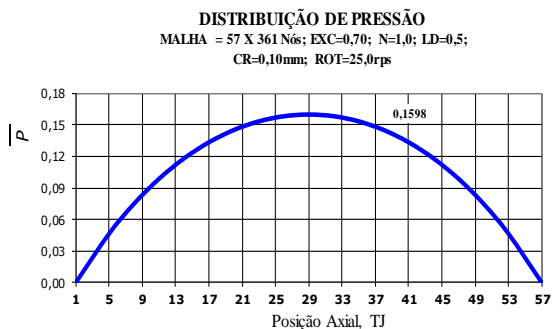


Figura 6.7. Pressão adimensional \bar{P} , direção axial.

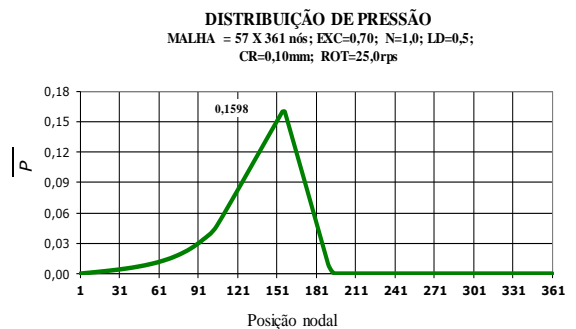


Figura 6.8. Pressão adimensional \bar{P} , direção circunferencial.

Pode-se observar na Tabela 6.5 um lubrificante dilatante; e ainda:

Na Tabela 6.5 para fluido pseudoplástico, $n = 0,8$, e $L/D = 1$ resultou $\bar{P}_{max} = 0,336$, praticamente o dobro do valor obtido para a relação $L/D = 0,50$.

$$\theta' = 193^\circ - 180 = 13^\circ; \bar{P}_{max} = 0,121; \theta_{max} = 157^\circ.$$

Tabela 6.5. Distribuição de pressão adimensional, \bar{P}

$N=1500$ rpm; $\varepsilon = 0,70$; $n = 1,1$; $L/D = 0,5$; $c = 0,1$ mm; malha (361x57) nós

	1	5	8	11	14	17	20	23	26	29	32	35	38	41	44	47	50	53	57	
1																				
5		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15		0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
25		0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
45		0,001	0,002	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001
55		0,002	0,003	0,004	0,004	0,005	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,005	0,004	0,004	0,003	0,003	0,002	0,002
65		0,002	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,008	0,009	0,009	0,009	0,008	0,008	0,007	0,006	0,005	0,004	0,004	0,002	0,002
75		0,003	0,005	0,007	0,009	0,010	0,011	0,011	0,012	0,012	0,012	0,011	0,011	0,010	0,009	0,007	0,005	0,005	0,003	0,003
85		0,004	0,007	0,010	0,012	0,014	0,015	0,016	0,016	0,017	0,016	0,016	0,015	0,014	0,012	0,010	0,007	0,004	0,004	0,004
95		0,006	0,010	0,014	0,017	0,019	0,021	0,022	0,023	0,023	0,023	0,022	0,022	0,021	0,019	0,017	0,014	0,010	0,006	0,006
105		0,009	0,015	0,019	0,023	0,027	0,029	0,031	0,032	0,033	0,032	0,031	0,029	0,027	0,023	0,019	0,015	0,009	0,009	0,009
125		0,018	0,029	0,038	0,046	0,052	0,057	0,061	0,063	0,063	0,063	0,061	0,057	0,052	0,046	0,038	0,029	0,018	0,018	0,018
135		0,024	0,039	0,052	0,062	0,071	0,077	0,082	0,084	0,085	0,084	0,082	0,077	0,071	0,062	0,052	0,039	0,024	0,024	0,024
145		0,031	0,050	0,066	0,079	0,090	0,098	0,103	0,107	0,108	0,107	0,103	0,098	0,090	0,079	0,066	0,050	0,031	0,031	0,031
157		0,035	0,057	0,075	0,090	0,101	0,110	0,116	0,120	0,121	0,120	0,116	0,110	0,101	0,090	0,075	0,057	0,035	0,035	0,035
165		0,032	0,052	0,068	0,082	0,093	0,101	0,107	0,110	0,111	0,110	0,107	0,101	0,093	0,082	0,068	0,052	0,032	0,032	0,032
175		0,020	0,032	0,043	0,052	0,059	0,065	0,069	0,071	0,072	0,071	0,069	0,065	0,059	0,052	0,043	0,032	0,020	0,020	0,020
189		0,000	0,002	0,003	0,004	0,006	0,007	0,008	0,008	0,009	0,008	0,008	0,007	0,006	0,004	0,003	0,002	0,000	0,000	0,000
190		0,000	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,005	0,004	0,003	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000
191			0,000	0,001	0,001	0,002	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
192				0,000	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
193					0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
194							0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
195																				
255																				
345																				
355																				
360																				
361																				

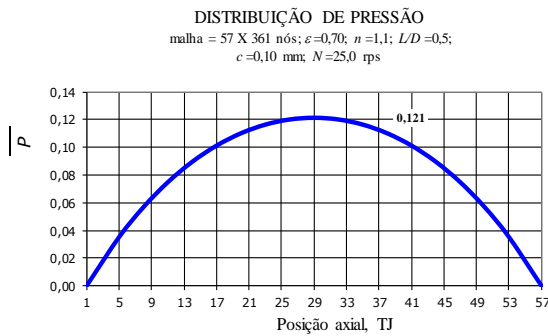


Figura 6.9. Pressão adimensional \bar{P} , direção axial.

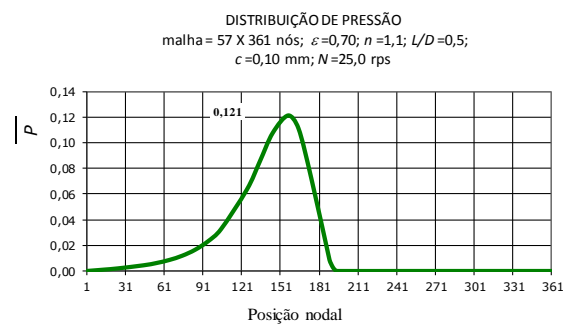


Figura 6.10. Pressão adimensional \bar{P} , direção circunferencial.

Na Tabela 6.6 para o caso de um fluido pseudoplástico com $n = 0,8$, e $L/D = 1$ resultou $\bar{P}_{max} = 0,336$. Outros valores também podem ser vistos: $\theta' = 201^\circ - 180^\circ = 21^\circ$; $\theta_{max} = 154^\circ$.

Tabela 6.6. Distribuição de pressão adimensional, \bar{P}

$N = 1500$ rpm; $\varepsilon = 0,70$; $n = 0,8$; $L/D = 1,0$; $c = 0,1$ mm; malha (361x57) nós

	1	5	8	11	14	17	20	23	26	29	32	35	38	41	44	47	50	53	57
1																			
5		0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	
15		0,002	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,008	0,007	0,006	0,005	0,004	0,002	
25		0,004	0,007	0,009	0,011	0,013	0,014	0,015	0,016	0,016	0,016	0,015	0,014	0,013	0,011	0,009	0,007	0,004	
35		0,006	0,011	0,014	0,017	0,019	0,021	0,022	0,023	0,023	0,023	0,022	0,021	0,019	0,017	0,014	0,011	0,006	
45		0,009	0,015	0,019	0,023	0,027	0,029	0,031	0,032	0,032	0,032	0,031	0,029	0,027	0,023	0,019	0,015	0,009	
55		0,012	0,019	0,026	0,031	0,035	0,039	0,041	0,042	0,043	0,042	0,041	0,039	0,035	0,031	0,026	0,020	0,012	
65		0,016	0,025	0,034	0,041	0,046	0,050	0,053	0,055	0,056	0,055	0,053	0,050	0,046	0,041	0,034	0,026	0,016	
75		0,020	0,033	0,044	0,052	0,059	0,065	0,068	0,071	0,071	0,071	0,069	0,065	0,060	0,053	0,044	0,033	0,020	
85		0,026	0,043	0,056	0,067	0,076	0,083	0,088	0,090	0,091	0,090	0,088	0,083	0,076	0,068	0,056	0,043	0,026	
95		0,034	0,055	0,073	0,086	0,097	0,106	0,112	0,115	0,116	0,115	0,112	0,106	0,098	0,087	0,073	0,055	0,034	
120		0,065	0,103	0,134	0,158	0,176	0,190	0,200	0,205	0,207	0,205	0,200	0,190	0,177	0,158	0,134	0,103	0,065	
130		0,082	0,129	0,167	0,196	0,218	0,234	0,245	0,252	0,254	0,252	0,245	0,234	0,218	0,196	0,167	0,129	0,082	
154		0,115	0,178	0,227	0,264	0,292	0,312	0,326	0,334	0,336	0,334	0,326	0,312	0,292	0,264	0,227	0,178	0,115	
160		0,112	0,174	0,221	0,257	0,284	0,304	0,317	0,325	0,328	0,325	0,318	0,304	0,284	0,257	0,221	0,174	0,112	
195		0,000	0,003	0,007	0,011	0,015	0,018	0,020	0,022	0,022	0,022	0,020	0,018	0,015	0,011	0,007	0,003	0,000	
197			0,000	0,002	0,005	0,007	0,010	0,011	0,012	0,013	0,012	0,011	0,010	0,007	0,005	0,002	0,000		
199				0,000	0,001	0,003	0,004	0,005	0,006	0,006	0,006	0,005	0,004	0,003	0,001	0,000			
200					0,000	0,001	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002	0,001	0,000				
201						0,000	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,000					
202							0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000						
203																			
215																			
225																			
355																			
360																			
361																			

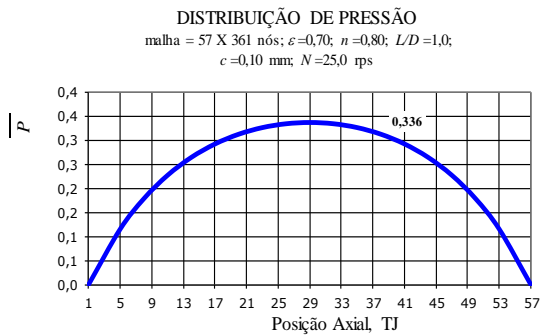


Figura 6.11. Pressão adimensional \bar{P} , direção axial.

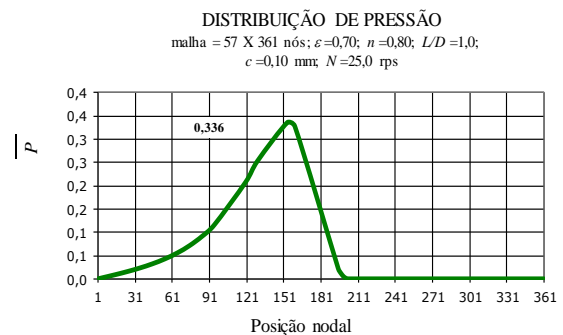


Figura 6.12. Pressão adimensional \bar{P} , direção circunferencial.

Comparando-se as Tabelas 6.3, 6.4 e 6.5, ou seja, fluido pseudoplástico, newtoniano e dilatante, respectivamente, nota-se um aumento de θ_{max} , enquanto que os valores de θ' e \bar{P} diminuem.

O Apêndice D mostra uma distribuição de pressão adimensional completa, para uma malha com 57 x 361 nós, $N = 1500$ rpm; $\varepsilon = 0,70$; $n = 1,0$; $L/D = 1,0$; $c = 0,1$ mm. Devido à simetria, estão mostrados 29 pontos na direção axial (j).

6.3 PARÂMETROS DE DESEMPENHO DO MANCAL

6.3.1 Análise Comparativa dos Parâmetros de Desempenho

A Tabela 6.7 mostra os parâmetros de desempenho do mancal obtidos na presente dissertação, bem como os valores do trabalho clássico de Raimondi e Boyd (1958), Frêne (1982) e, mais recentemente, o trabalho de Gertzos (2008). Foram utilizadas uma excentricidade específica $\varepsilon = 0,7$, relação $L/D = 1$, velocidade de rotação $N = 1500$ rpm, folga radial $c = 0,1$ mm, temperatura de suprimento $T_s = 35^\circ\text{C}$, índice de característica reológica do óleo $n = 1$, com uma malha 361 x 57 nós (nos sentidos circunferencial e axial, respectivamente).

Tabela 6.7 Comparação dos parâmetros de desempenho com outros autores

Parâmetros de desempenho	Presente trabalho	Raimondi e Boyd (1958)	Frêne (1982)	Gertzos (2008)
S	0,08	0,08	0,0776	0,09
\bar{F}	0,165			
ϕ	42,16°	45,00°	44,00°	48,00°
$\bar{P}_{máx.o}$	5,374			4,880
$\theta_{p\max.}$	17,16°	19,00°		21,00°
θ'	21,00°	20,00°		
$f(R/c)$	2,348	2,37	1,99	2,50
\bar{Q}_t	4,605	4,48		4,50
\bar{Q}_L	3,530	3,404	3,405	
Q_L / Q_t	0,766	0,76		0,74
$P / P_{\max.}$	0,36	0,37		0,35
\bar{m}	0,732			

Pode-se observar boa concordância entre os valores da presente dissertação e dos outros pesquisadores, principalmente do trabalho de Raimondi e Boyd (1958). Provavelmente, os valores obtidos nesta dissertação são mais precisos em função da utilização da malha mais refinada em relação à dos outros pesquisadores.

As Tabelas 6.8 a 6.20 mostram os valores dos parâmetros adimensionais e dimensionais calculados correspondentes deduzidos no Capítulo 4, tais como número de Sommerfeld,

capacidade de carga, vazões de óleo, etc, em função da excentricidade específica ε . Foi utilizada uma malha de 361 x 57 nós, de tal forma que resulta em variação angular igual a um grau. Para cada valor de ε , fixado como dado de entrada no programa computacional, resulta uma capacidade de carga correspondente. Evidentemente, na prática, ocorre exatamente o contrário, isto é, para certa carga aplicada o munhão irá ocupar uma posição excêntrica resultante, de modo que quanto maior a carga aplicada ao mancal, maior será excentricidade operacional correspondente. Essas tabelas são origem das figuras subsequentes.

As Tabelas 6.8 a 6.20 estão assim distribuídas:

Tabela	L/D	n	N rpm	c mm	T_s °C
6.8	0,25	0,8	1500	0,10	35
6.9		1,0			
6.10		1,1			
6.11	0,50	0,8	1500	0,10	35
6.12		1,0			
6.13		1,1			
6.14	1,0	0,8	1500	0,10	35
6.15		1,0			
6.16		1,1			
6.17	1,0	1,0	1500	0,10	45
6.18	1,0	1,0	1500	0,10	55
6.19	1,0	1,0	1500	0,05	35
6.20	1,0	1,0	1500	0,15	35

As Figuras 6.1 a 6.37 apresentam os componentes calculados para variação do índice de característica reológica, n , ou seja, usando-se fluido pseudoplástico, newtoniano e dilatante. As Figuras 6.38 a 6.45 foram confeccionadas com variação das folgas radiais, c , enquanto que as Figuras 6.46 a 6.49 fazem-se comparações entre pressões, capacidades de carga, forças de atrito e viscosidades, fixando-se $c = 0,1$, $L/D = 1$, $n = 1$. Nas Figuras 6.50 a 6.53 são mostrados componentes calculados para variação da rotação, N , com $c = 0,1$, $L/D = 1$, $n = 1$ e $T_s = 35^\circ\text{C}$. Nas Figuras 6.54 a 6.56 são mostradas distribuição de pressão no sentido circunferencial com variação da relação L/D para os três índices n . E, finalmente, a Figura 6.57 mostra a distribuição de pressões no sentido axial para um fluido newtoniano.

Tabela 6.8 – Parâmetros de desempenho: $L/D = 0,25$, $n = 0,8$
 $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$ (temperatura de suprimento)

ε	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Parâmetros adimensionais									
h_0 / c	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
S	16,50	7,91	4,72	3,05	1,96	1,23	0,70	0,34	0,11
\bar{m}	0,770	0,865	0,902	0,923	0,934	0,938	0,947	0,944	0,938
\bar{F}	0,012	0,022	0,030	0,035	0,038	0,039	0,038	0,035	0,027
\bar{F}_0	0,019	0,040	0,067	0,104	0,162	0,259	0,452	0,929	2,873
$\bar{P}_{\max.}$	0,012	0,022	0,032	0,040	0,049	0,056	0,063	0,069	0,070
$\bar{P}_{\max.0}$	0,019	0,041	0,073	0,122	0,208	0,371	0,739	1,816	7,454
$P / P_{\max.}$	0,52	0,50	0,46	0,43	0,39	0,35	0,31	0,26	0,19
ϕ	82,87	76,247	69,59	62,85	56,007	48,93	41,48	33,30	23,49
$\theta_{\max.}$	105,00	117,00	127,00	136,00	142,00	149,00	154,00	160,00	167,00
$\theta_{p\max.}$	7,87	13,247	16,59	18,85	18,01	17,93	15,48	13,30	10,49
θ'	11,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	9,00	8,00
$\bar{F}a = \overline{\Delta Pot}$	4,85	5,516	5,87	6,19	6,54	6,97	7,66	8,71	11,01
$f(R/c)$	326,87	158,631	96,48	64,19	43,09	28,63	17,91	9,92	4,09
\bar{Q}_t	3,448	3,754	4,060	4,37	4,67	4,98	5,28	5,59	5,89
\bar{Q}_l	0,61	1,231	1,85	2,462	3,076	3,691	4,305	4,929	5,555
\bar{Q}_{rec}	2,83	2,523	2,21	1,90	1,59	1,28	0,98	0,66	0,34
Q_l / Q_t	0,18	0,328	0,45	0,56	0,66	0,74	0,81	0,88	0,94
$\overline{\Delta T}$	1307,9	635,159	386,5	257,3	172,8	114,9	71,9	39,9	16,5
Parâmetros dimensionais									
F [kN]	0,003	0,008	0,013	0,021	0,034	0,054	0,095	0,194	0,597
$P_{\max.}$ [MPa]	0,003	0,006	0,012	0,020	0,034	0,062	0,124	0,304	1,240
P [MPa]	0,001	0,003	0,005	0,009	0,013	0,022	0,038	0,078	0,239
Fa [N]	2,152	2,445	2,601	2,744	2,898	3,090	3,396	3,858	4,882
ΔPot [kW]	0,017	0,019	0,020	0,022	0,023	0,024	0,027	0,030	0,038
Q_L [ml/min]	0,115	0,231	0,346	0,462	0,577	0,692	0,807	0,924	1,041
ΔT [°C]	1,061	1,207	1,285	1,356	1,433	1,529	1,681	1,913	2,425
T_m [°C]	41,478	38,530	37,497	36,923	36,633	36,521	36,299	36,378	36,524
m [mPa.s ⁿ]	33,110	37,194	38,783	39,706	40,183	40,369	40,742	40,608	40,364
μ [mPa.s]	3,475	3,903	4,070	4,167	4,217	4,237	4,276	4,262	4,236
T_{mist} [°C]	40,764	37,781	36,715	36,138	35,806	35,596	35,398	35,281	35,201
T_{rec} [°C]	42,014	39,139	38,146	37,608	37,359	37,306	37,151	37,377	38,468

Tabela 6.9 – Parâmetros de desempenho – $L/D = 0,25$, $n = 1,0$
 $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm $T_s = 35^\circ\text{C}$ (temperatura de suprimento)

ε	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Parâmetros adimensionais									
h_0 / c	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
S	16,628	7,72	4,54	2,92	1,81	1,09	0,59	0,27	0,08
\bar{m}	0,399	0,513	0,572	0,618	0,666	0,686	0,689	0,679	0,644
\bar{F}	0,006	0,014	0,020	0,024	0,029	0,032	0,033	0,033	0,027
\bar{F}_0	0,019	0,041	0,070	0,109	0,176	0,292	0,538	1,196	4,220
$\bar{P}_{\max.}$	0,006	0,014	0,022	0,029	0,039	0,048	0,058	0,068	0,076
$\bar{P}_{\max,0}$	0,019	0,042	0,077	0,131	0,234	0,437	0,928	2,488	11,802
$P / P_{\max.}$	0,52	0,49	0,46	0,42	0,38	0,33	0,29	0,24	0,18
ϕ	82,465	75,359	68,269	61,133	54,021	46,768	39,274	31,178	21,632
$\theta_{\max.}$	106,00	119,00	129,00	137,00	144,00	150,00	156,00	161,00	167,00
$\theta_{p\max.}$	8,465	14,359	17,269	18,133	18,021	16,768	15,274	12,178	8,632
θ'	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	8,00	7,00
$\bar{F}a = \overline{\Delta Pot}$	2,522	3,295	3,771	4,249	4,852	5,435	6,148	7,282	9,727
$f(R/c)$	329,929	155,563	94,077	63,000	41,484	27,104	16,573	8,960	3,582
\bar{Q}_t	3,449	3,757	4,065	4,372	4,679	4,987	5,294	5,602	5,912
\bar{Q}_l	0,618	1,236	1,854	2,472	3,089	3,706	4,323	4,949	5,577
\bar{Q}_{rec}	2,831	2,521	2,211	1,901	1,590	1,281	0,971	0,653	0,335
Q_l / Q_t	0,179	0,329	0,456	0,565	0,660	0,743	0,817	0,883	0,935
$\overline{\Delta T}$	1320,233	622,757	376,789	252,402	166,290	108,689	66,488	36,004	14,409
Parâmetros dimensionais									
F [kN]	0,016	0,045	0,085	0,142	0,247	0,423	0,783	1,716	5,735
$P_{\max.}$ [MPa]	0,013	0,036	0,074	0,137	0,263	0,507	1,081	2,855	12,831
P [MPa]	0,006	0,018	0,034	0,057	0,099	0,169	0,313	0,686	2,294
Fa [N]	10,650	13,914	15,924	17,943	20,493	22,951	25,962	30,754	41,079
ΔPot [kW]	0,084	0,109	0,125	0,141	0,161	0,180	0,204	0,242	0,323
Q_L [ml/min]	0,116	0,232	0,348	0,463	0,579	0,695	0,811	0,928	1,046
ΔT [°C]	5,254	6,868	7,863	8,863	10,128	11,348	12,842	15,236	20,376
T_m [°C]	60,636	52,735	49,589	47,377	45,334	44,501	44,383	44,779	46,254
m [mPa.s ⁿ]	17,175	22,087	24,589	26,586	28,630	29,526	29,655	29,222	27,684
μ [mPa.s]	17,175	22,087	24,589	26,586	28,630	29,526	29,655	29,222	27,684
T_{mist} [°C]	58,182	49,230	45,820	43,073	40,279	38,937	37,887	37,013	36,224
T_{rec} [°C]	63,243	56,207	54,893	53,572	50,531	50,334	50,748	52,272	56,586

Tabela 6.10 – Parâmetros de desempenho – $L/D = 0,25$, $n = 1,1$
 $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$ (temperatura de suprimento)

ε	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Parâmetros adimensionais									
h_0 / c	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
S	16,38	7,571	4,516	2,794	1,737	1,054	0,543	0,237	0,062
\bar{m}	0,229	0,320	0,379	0,419	0,450	0,464	0,470	0,455	0,402
\bar{F}	0,004	0,009	0,013	0,017	0,021	0,022	0,025	0,024	0,021
\bar{F}_0	0,019	0,042	0,070	0,114	0,183	0,302	0,586	1,343	5,155
$\bar{P}_{\max.}$	0,004	0,009	0,014	0,021	0,028	0,034	0,044	0,052	0,060
$\bar{P}_{\max.0}$	0,019	0,043	0,078	0,139	0,248	0,462	1,036	2,876	14,894
$P / P_{\max.}$	0,51	0,49	0,45	0,41	0,37	0,33	0,28	0,23	0,17
ϕ	82,253	74,919	67,597	60,341	53,079	45,689	38,247	30,182	20,864
$\theta_{\max.}$	106,00	120,00	130,00	138,00	145,00	151,00	156,00	162,00	168,00
$\theta_{p\max.}$	8,253	14,919	17,597	18,341	18,079	16,689	14,247	12,182	8,864
θ'	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	8,00	8,00	8,00	7,00
$\bar{F}a = \overline{\Delta Pot}$	1,448	2,061	2,517	2,923	3,356	3,805	4,421	5,296	6,982
$f(R/c)$	325,302	153,118	94,279	61,170	40,690	27,152	16,069	8,674	3,373
\bar{Q}_t	3,450	3,758	4,066	4,374	4,682	4,992	5,298	5,607	5,916
\bar{Q}_l	0,619	1,237	1,855	2,473	3,091	3,717	4,334	4,954	5,580
\bar{Q}_{rec}	2,831	2,521	2,211	1,901	1,591	1,275	0,964	0,654	0,336
Q_l / Q_t	0,179	0,329	0,456	0,565	0,660	0,745	0,818	0,883	0,943
$\overline{\Delta T}$	1301,59	612,85	377,45	244,987	163,019	108,899	64,491	34,820	13,558
Parâmetros dimensionais									
F [kN]	0,029	0,088	0,174	0,311	0,538	0,914	1,793	3,980	13,492
$P_{\max.}$ [MPa]	0,023	0,072	0,154	0,303	0,582	1,119	2,538	6,820	31,187
P [MPa]	0,012	0,035	0,070	0,125	0,215	0,365	0,717	1,592	5,397
Fa [N]	18,87	26,87	32,81	38,101	43,743	49,608	57,637	69,040	91,012
ΔPot [kW]	0,148	0,211	0,258	0,299	0,344	0,390	0,453	0,542	0,715
Q_L [ml/min]	0,116	0,232	0,348	0,464	0,580	0,697	0,813	0,929	1,046
ΔT [°C]	9,311	13,260	16,196	18,814	21,607	24,531	28,521	34,820	45,108
T_m [°C]	81,285	68,252	62,393	59,032	56,786	55,823	55,440	56,455	60,447
m [mPa.s ⁿ]	0,010	13,775	16,294	18,040	19,355	19,961	20,209	19,560	17,274
μ [mPa.s]	30,415	42,520	50,295	55,685	59,746	61,614	62,380	60,378	53,321
T_{mist} [°C]	76,786	61,731	54,271	49,496	46,103	43,424	41,335	39,506	37,716
T_{rec} [°C]	85,915	74,845	70,441	68,357	67,679	67,990	69,822	73,653	82,841

Tabela 6.11 – Parâmetros de desempenho – $L/D = 0,50$; $n = 0,8$
 $N = 1500$ rpm; $c = 0,1$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$ (temperatura de suprimento)

ε	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Parâmetros adimensionais									
h_0 / c	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
S	4,49	2,12	1,29	0,85	0,57	0,37	0,23	0,12	0,05
\bar{m}	0,759	0,855	0,894	0,917	0,928	0,933	0,942	0,938	0,932
\bar{F}	0,044	0,082	0,108	0,124	0,130	0,128	0,119	0,099	0,062
\bar{F}_0	0,071	0,150	0,247	0,376	0,560	0,857	1,405	2,638	6,663
$\bar{P}_{\max.}$	0,041	0,081	0,111	0,136	0,154	0,167	0,174	0,169	0,138
$\bar{P}_{\max.0}$	0,067	0,147	0,254	0,413	0,664	1,117	2,057	4,514	14,806
$P / P_{\max.}$	0,53	0,51	0,49	0,46	0,42	0,38	0,34	0,29	0,22
ϕ	81,981	75,863	69,682	63,417	56,932	50,203	43,105	35,309	25,434
$\theta_{\max.}$	104,00	115,00	125,00	134,00	141,00	148,00	154,00	160,00	167,00
$\theta_{p\max.}$	5,981	10,863	14,682	17,417	17,932	18,203	17,105	15,309	12,434
θ'	20,00	20,00	19,00	19,00	18,00	17,00	16,00	14,00	11,00
$\bar{F}a = \overline{\Delta Pot}$	4,787	5,467	5,843	6,191	6,572	7,049	7,823	8,993	11,563
$f(R/c)$	89,034	42,488	26,490	17,943	12,633	8,819	5,908	3,634	1,862
\bar{Q}_t	3,426	3,707	3,987	4,264	4,543	4,820	5,095	5,368	5,689
\bar{Q}_l	0,579	1,156	1,737	2,310	2,894	3,480	4,066	4,665	5,323
\bar{Q}_{rec}	2,846	2,552	2,250	1,954	1,648	1,340	1,029	0,703	0,366
\bar{Q}_l / \bar{Q}_t	0,169	0,312	0,436	0,542	0,637	0,722	0,798	0,869	0,936
$\overline{\Delta T}$	356,752	170,609	106,730	72,516	51,286	35,984	24,246	15,042	7,728
Parâmetros dimensionais									
F [kN]	0,024	0,057	0,098	0,153	0,231	0,354	0,587	1,097	2,752
$P_{\max.}$ [MPa]	0,009	0,022	0,040	0,067	0,109	0,185	0,344	0,751	2,447
P [MPa]	0,005	0,011	0,020	0,031	0,046	0,071	0,117	0,219	0,550
Fa [N]	4,244	4,846	5,179	5,488	5,825	6,249	6,935	7,972	10,250
ΔPot [kW]	0,033	0,038	0,041	0,043	0,046	0,049	0,054	0,063	0,081
Q_L [ml/min]	0,217	0,433	0,651	0,866	1,085	1,305	1,525	1,749	1,996
ΔT [°C]	1,048	1,200	1,286	1,367	1,458	1,572	1,754	2,034	2,623
T_m [°C]	41,849	38,795	37,696	37,090	36,780	36,669	36,421	36,527	36,685
m [mPa.s ⁿ]	32,639	36,800	38,470	39,434	39,940	40,122	40,536	40,358	40,096
μ [mPa.s]	3,425	3,862	4,037	4,139	4,192	4,211	4,254	4,236	4,208
T_{mist} [°C]	41,131	38,029	36,889	36,275	35,915	35,689	35,467	35,340	35,244
T_{rec} [°C]	42,378	39,401	38,347	37,782	37,521	37,479	37,313	37,594	38,785

Tabela 6.12 – Parâmetros de desempenho – $L/D = 0,50$; $n = 1,0$
 $N = 1500$ rpm; $c = 0,1$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$ (temperatura de suprimento)

ε	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Parâmetros adimensionais									
h_0 / c	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
S	4,37	2,06	1,24	0,80	0,51	0,32	0,19	0,09	0,03
\bar{m}	0,390	0,505	0,573	0,608	0,653	0,674	0,675	0,663	0,619
\bar{F}	0,023	0,050	0,072	0,087	0,102	0,106	0,103	0,090	0,063
\bar{F}_0	0,073	0,154	0,256	0,398	0,622	0,986	1,702	3,389	10,106
$\bar{P}_{\max.}$	0,022	0,050	0,076	0,099	0,125	0,145	0,160	0,165	0,150
$\bar{P}_{\max,0}$	0,070	0,153	0,269	0,451	0,767	1,348	2,638	6,226	24,261
$P / P_{\max.}$	0,52	0,50	0,48	0,44	0,41	0,37	0,32	0,27	0,21
ϕ	81,765	75,110	68,406	61,671	54,941	47,918	40,648	32,583	23,367
$\theta_{\max.}$	105,00	117,00	127,00	136,00	143,00	149,00	155,00	161,00	167,00
$\theta_{p\max.}$	6,765	12,110	15,406	17,671	17,941	16,918	15,648	13,583	10,367
θ'	18,00	18,00	17,00	17,00	17,00	16,00	15,00	13,00	11,00
$\bar{F}a = \overline{\Delta Pot}$	2,461	3,245	3,792	4,210	4,823	5,439	6,204	7,431	10,031
$f(R/c)$	86,648	41,657	25,890	17,390	11,868	8,188	5,396	3,305	1,605
\bar{Q}_t	3,431	3,719	4,007	4,292	4,573	4,858	5,141	5,439	5,720
\bar{Q}_l	0,588	1,175	1,766	2,351	2,933	3,527	4,122	4,745	5,352
\bar{Q}_{rec}	2,843	2,544	2,240	1,940	1,641	1,331	1,019	0,694	0,368
Q_l / Q_t	0,171	0,316	0,441	0,548	0,641	0,726	0,802	0,872	0,936
$\overline{\Delta T}$	347,099	167,141	104,162	70,128	48,005	33,251	22,015	13,546	6,626
Parâmetros dimensionais									
F [kN]	0,120	0,329	0,619	1,022	1,716	2,805	4,856	9,494	26,398
$P_{\max.}$ [MPa]	0,046	0,131	0,260	0,463	0,847	1,534	3,010	6,977	25,349
P [MPa]	0,024	0,066	0,124	0,204	0,343	0,561	0,971	1,899	5,280
Fa [N]	20,788	27,406	32,029	35,563	40,740	45,943	6,204	62,766	84,726
ΔPot [kW]	0,163	0,215	0,252	0,279	0,320	0,361	0,412	0,493	0,665
Q_L [ml/min]	0,221	0,441	0,662	0,882	1,100	1,323	1,546	1,780	2,007
ΔT [°C]	5,134	6,779	7,944	8,841	10,158	11,501	13,180	15,857	21,564
T_m [°C]	61,455	53,245	49,538	47,837	45,839	45,003	44,936	45,423	47,355
m [mPa.s ⁿ]	16,756	21,715	24,633	53,973	28,105	28,982	29,053	28,537	26,606
μ [mPa.s]	16,756	21,715	24,633	53,973	28,105	28,982	29,053	28,537	26,606
T_{mist} [°C]	59,032	49,820	45,401	43,578	40,759	39,361	38,263	37,322	36,483
T_{rec} [°C]	64,006	56,664	53,602	53,973	51,054	50,918	51,466	53,208	58,056

Tabela 6.13 – Parâmetros de desempenho – $L/D = 0,50$; $n = 1,1$
 $N = 1500$ rpm; $c = 0,1$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$ (temperatura de suprimento)

ε	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Parâmetros adimensionais									
h_0 / c	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
S	4,310	2,022	1,206	0,77	0,494	0,304	0,171	0,081	0,026
\bar{m}	0,224	0,313	0,371	0,410	0,439	0,452	0,456	0,438	0,385
\bar{F}	0,013	0,032	0,048	0,061	0,071	0,076	0,077	0,069	0,047
\bar{F}_0	0,074	0,157	0,264	0,411	0,645	1,047	1,867	3,917	12,073
$\bar{P}_{\max.}$	0,013	0,032	0,051	0,070	0,089	0,106	0,122	0,130	0,116
$\bar{P}_{\max.0}$	0,071	0,157	0,281	0,472	0,811	1,465	2,970	7,399	30,236
$P / P_{\max.}$	0,52	0,50	0,47	0,44	0,40	0,36	0,31	0,26	0,20
ϕ	81,624	74,722	67,809	60,837	53,876	46,772	39,503	31,631	22,105
$\theta_{\max.}$	105,00	118,00	128,00	137,00	144,00	150,00	156,00	161,00	168,00
$\theta_{p\max.}$	6,624	12,722	15,809	17,837	17,876	16,772	15,503	12,631	10,105
θ'	18,00	17,00	17,00	16,00	16,00	15,00	14,00	13,00	10,00
$\bar{F}a = \overline{\Delta Pot}$	1,416	2,021	2,477	2,882	3,317	3,784	15,503	5,357	7,203
$f(R/c)$	85,619	40,963	25,271	17,097	11,714	7,997	5,203	3,122	1,548
\bar{Q}_t	3,433	3,723	4,012	4,301	4,588	4,875	5,159	5,447	5,771
\bar{Q}_l	0,590	1,183	1,771	2,368	2,955	3,554	4,151	4,753	5,413
\bar{Q}_{rec}	2,843	2,541	2,241	1,934	1,633	1,322	1,009	0,694	0,358
Q_l / Q_t	0,172	0,318	0,441	0,550	0,644	0,729	0,805	0,873	0,938
$\overline{\Delta T}$	342,855	164,345	101,569	68,915	47,326	32,432	21,201	12,776	6,350
Parâmetros dimensionais									
F [kN]	0,216	0,643	1,278	2,198	3,692	6,168	11,091	22,370	60,640
$P_{\max.}$ [MPa]	0,083	0,257	0,543	1,010	1,858	3,453	7,059	16,904	60,748
P [MPa]	0,043	0,129	0,256	0,440	0,738	1,234	2,218	4,474	12,128
Fa [N]	36,905	52,702	64,586	75,147	86,490	98,653	115,40	139,68	187,80
ΔPot [kW]	0,290	0,414	0,507	0,590	0,679	0,775	0,906	1,097	1,475
Q_L [ml/min]	0,221	0,443	0,664	0,888	1,108	1,333	1,557	1,782	2,030
ΔT [°C]	9,110	13,035	16,003	18,673	21,542	24,665	28,990	35,238	47,478
T_m [°C]	82,254	69,025	63,070	59,730	57,552	56,637	56,382	57,628	61,819
m [mPa.s ⁿ]	9,629	13,484	15,971	17,656	18,892	19,447	19,606	18,847	16,574
μ [mPa.s]	29,724	41,624	49,299	54,501	58,316	60,029	60,521	58,177	51,162
T_{mist} [°C]	77,879	62,637	54,928	50,283	46,886	44,185	42,036	40,144	38,186
T_{rec} [°C]	86,780	75,500	70,681	68,995	68,400	68,882	70,991	75,358	86,375

Tabela 6.14 – Parâmetros de desempenho – $L/D = 1$, $n = 0,8$.
 $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$ (temperatura de suprimento)

ε	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Parâmetros adimensionais									
h_0 / c	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
S	1,44	0,69	0,43	0,29	0,21	0,14	0,10	0,06	0,03
\bar{m}	0,726	0,831	0,876	0,900	0,916	0,922	0,925	0,930	0,922
\bar{F}	0,130	0,245	0,316	0,356	0,351	0,327	0,271	0,196	0,098
\bar{F}_0	0,221	0,461	0,737	1,097	1,533	2,214	3,256	5,263	10,578
$\bar{P}_{\max.}$	0,120	0,229	0,305	0,358	0,376	0,377	0,345	0,288	0,184
$\bar{P}_{\max.0}$	0,203	0,431	0,711	1,106	1,640	2,552	4,148	7,726	19,976
$P / P_{\max.}$	0,54	0,53	0,52	0,50	0,47	0,43	0,39	0,34	0,26
ϕ	79,30	74,258	69,146	63,942	58,406	52,697	46,168	38,480	27,504
$\theta_{\max.}$	104,00	114,00	124,00	132,00	140,00	147,00	153,00	159,00	166,00
$\theta_{p\max.}$	3,30	8,258	13,146	15,942	18,406	19,697	19,168	17,480	13,504
θ'	36,00	34,00	32,00	31,00	28,00	26,00	23,00	19,00	13,00
$\bar{F}a = \overline{\Delta Pot}$	4,59	5,334	5,775	6,183	6,648	7,232	8,057	9,460	12,126
$f(R/c)$	28,53	13,908	8,942	6,260	4,735	3,541	2,676	1,932	1,243
\bar{Q}_t	3,36	3,566	3,757	3,924	4,102	4,239	4,411	4,629	5,240
\bar{Q}_l	0,47	0,945	1,415	1,858	2,347	2,790	3,291	3,862	4,853
\bar{Q}_{rec}	2,89	2,621	2,342	2,066	1,755	1,449	1,119	0,767	0,388
Q_l / Q_t	0,141	0,265	0,377	0,474	0,572	0,658	0,746	0,834	0,926
$\overline{\Delta T}$	114,75	56,500	36,846	26,267	20,316	15,647	12,163	8,996	5,550
Parâmetros dimensionais									
F [kN]	0,143	0,340	0,572	0,876	1,245	1,810	2,669	4,341	8,648
$P_{\max.}$ [MPa]	0,026	0,064	0,110	0,177	0,266	0,417	0,680	1,274	3,266
P [MPa]	0,014	0,034	0,057	0,088	0,124	0,181	0,267	0,434	0,865
Fa [N]	8,133	9,456	10,238	10,962	11,786	12,821	14,285	16,772	21,497
ΔPot [kW]	0,064	0,074	0,080	0,086	0,093	0,101	0,112	0,132	0,169
Q_l [ml/min]	0,355	0,709	1,061	1,394	1,760	2,093	2,469	2,896	3,639
ΔT [°C]	1,01	1,184	1,300	1,418	1,559	1,746	2,001	2,407	2,959
T_m [°C]	42,99	39,515	38,213	37,531	37,115	36,943	36,876	36,729	36,943
m [mPa.s ⁿ]	31,244	35,757	37,672	38,730	39,394	39,672	39,781	40,023	39,673
μ [mPa.s]	3,279	3,753	3,954	4,065	4,134	4,164	4,175	4,200	4,164
T_{mist} [°C]	42,30	38,758	37,412	36,709	36,242	35,967	35,736	35,488	35,318
T_{rec} [°C]	43,50	40,113	38,869	38,246	37,902	37,828	37,901	37,946	39,305

Tabela 6.15 – Parâmetros de desempenho – $L/D = 1$, $n = 1$
 $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm $T_s = 35^\circ\text{C}$ (temperatura de suprimento)

ε	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Parâmetros adimensionais									
h_0 / c	0,9	0,2	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
S	1,360	0,64	0,390	0,270	0,180	0,120	0,080	0,050	0,020
\bar{m}	0,362	0,477	0,537	0,583	0,614	0,632	0,633	0,630	0,588
\bar{F}	0,069	0,152	0,213	0,250	0,265	0,259	0,226	0,171	0,095
\bar{F}_0	0,234	0,498	0,810	1,192	1,728	2,563	3,972	6,790	16,141
$\bar{P}_{\max.}$	0,064	0,144	0,210	0,260	0,295	0,314	0,306	0,271	0,194
$\bar{P}_{\max,0}$	0,217	0,472	0,796	1,238	1,922	3,104	5,374	10,755	33,072
$P / P_{\max.}$	0,54	0,53	0,51	0,48	0,45	0,41	0,37	0,32	0,24
ϕ	79,533	73,886	68,250	62,448	56,426	50,164	43,285	35,049	25,089
$\theta_{\max.}$	104,00	116,00	126,00	134,00	142,00	148,00	155,00	161,00	167,00
$\theta_{p\max.}$	3,533	9,886	14,250	16,448	18,426	18,164	18,285	16,049	12,089
θ'	33,00	32,00	30,00	28,00	26,00	24,00	21,00	16,00	12,00
$\bar{F}a = \overline{\Delta Pot}$	2,292	3,081	3,599	4,120	4,679	5,339	6,173	7,583	10,282
$f(R/c)$	26,980	12,971	8,274	5,926	4,407	3,295	2,455	1,772	1,084
\bar{Q}_t	3,375	3,594	3,801	4,004	4,198	4,378	4,576	4,898	5,306
\bar{Q}_l	0,497	0,985	1,475	1,971	2,467	2,957	3,486	4,160	4,930
\bar{Q}_{rec}	2,878	2,609	2,326	2,033	1,731	1,421	1,090	0,739	0,376
Q_l / Q_t	0,147	0,274	0,388	0,492	0,588	0,675	0,762	0,849	0,929
$\overline{\Delta T}$	108,431	52,548	33,940	24,674	18,680	14,281	10,891	7,900	4,795
Parâmetros dimensionais									
F [kN]	0,718	2,006	3,674	5,872	8,969	13,686	21,236	36,146	80,124
$P_{\max.}$ [MPa]	0,133	0,380	0,723	1,219	1,995	3,315	5,746	11,451	32,835
P [MPa]	0,072	0,201	0,367	0,587	0,897	1,369	2,124	3,615	8,012
Fa [N]	38,700	52,040	60,790	69,600	79,043	90,196	104,274	128,096	173,689
ΔPot [kW]	0,304	0,409	0,477	0,547	0,621	0,708	0,819	1,003	1,364
Q_l [ml/min]	0,373	0,739	1,106	1,478	1,851	2,218	2,614	3,120	3,697
ΔT [°C]	4,797	6,499	7,686	8,932	10,328	12,048	14,257	17,603	23,682
T_m [°C]	63,900	54,980	51,397	49,023	47,539	46,741	46,710	46,831	48,794
m [mPa.s ⁿ]	15,587	20,512	23,107	25,080	26,432	27,200	27,231	27,111	25,282
μ [mPa.s]	15,587	20,512	23,107	25,080	26,432	27,200	27,231	27,111	25,282
T_{mist} [°C]	61,677	51,752	47,428	44,443	42,356	40,827	39,469	38,124	36,808
T_{rec} [°C]	66,282	58,074	55,308	53,600	52,843	46,851	53,761	55,711	60,506

Tabela 6.16 – Parâmetros de desempenho – $L/D = 1$, $n = 1,1$
 $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$ (temperatura de suprimento)

ε	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Parâmetros adimensionais									
h_0 / c	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
S	1,32	0,63	0,38	0,25	0,17	0,11	0,07	0,04	0,016
\bar{m}	0,206	0,289	0,343	0,380	0,402	0,414	0,414	0,395	0,352
\bar{F}	0,040	0,094	0,140	0,172	0,185	0,185	0,165	0,126	0,070
\bar{F}_0	0,241	0,507	0,834	1,255	1,842	2,791	4,422	7,986	19,936
$\bar{P}_{\max.}$	0,037	0,089	0,139	0,181	0,209	0,229	0,229	0,205	0,149
$\bar{P}_{\max,0}$	0,224	0,483	0,828	1,320	2,085	3,453	6,140	12,991	42,306
$P / P_{\max.}$	0,54	0,53	0,50	0,48	0,44	0,40	0,36	0,31	0,24
ϕ	79,548	73,673	67,752	61,746	55,526	49,168	42,160	34,275	24,158
$\theta_{\max.}$	104,00	116,00	126,00	135,00	143,00	149,00	155,00	161,00	168,00
$\theta_{p\max.}$	3,548	9,673	13,752	16,746	18,526	18,168	17,160	15,275	12,158
θ'	32,000	30,00	29,00	27,00	25,00	23,00	20,00	17,00	12,00
$\bar{F}a = \overline{\Delta Pot}$	1,307	1,876	2,315	2,730	3,140	3,645	4,303	5,250	7,215
$f(R/c)$	26,255	12,777	8,103	5,721	4,244	3,154	2,348	1,664	1,028
\bar{Q}_t	3,380	3,608	3,822	4,026	4,227	4,404	4,605	4,836	5,286
\bar{Q}_l	0,505	1,010	1,504	2,004	2,508	2,996	3,530	4,097	4,909
\bar{Q}_{rec}	2,875	2,598	2,318	2,022	1,719	1,408	1,076	0,740	0,377
Q_l / Q_t	0,149	0,280	0,393	0,498	0,593	0,680	0,766	0,847	0,929
$\overline{\Delta T}$	105,478	51,750	33,168	23,771	17,941	13,638	10,388	7,501	4,561
Parâmetros dimensionais									
F [kN]	1,297	3,828	7,449	12,442	19,292	30,133	47,781	82,247	183,028
$P_{\max.}$ [MPa]	0,241	0,729	1,480	2,618	4,367	7,455	13,268	26,758	77,680
P [MPa]	0,130	0,383	0,745	1,244	1,929	3,013	4,778	8,225	18,303
Fa [N]	68,128	97,832	120,721	142,355	163,750	190,050	224,365	273,766	376,234
ΔPot [kW]	0,535	0,768	0,948	1,118	1,286	1,493	1,762	2,150	2,955
Q_l [ml/min]	0,379	0,758	1,128	1,503	1,881	2,247	2,647	3,072	3,682
ΔT [°C]	8,436	12,213	15,232	18,232	21,337	25,334	30,597	38,032	51,462
T_m [°C]	85,771	71,991	65,834	62,262	60,436	59,443	59,416	60,992	64,888
m [mPa.s ⁿ]	8,876	12,448	14,743	16,357	17,280	17,812	17,827	16,991	15,147
μ [mPa.s]	27,398	38,425	45,508	50,490	53,339	54,983	55,029	52,449	46,757
T_{mist} [°C]	81,752	66,003	58,285	53,310	49,649	46,886	44,309	42,055	38,958
T_{rec} [°C]	89,962	78,062	73,391	71,451	71,030	72,190	74,859	81,113	90,443

Tabela 6.17 – Parâmetros de desempenho – $L/D = 1$, $n = 1$
 $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm $T_s = 45^\circ\text{C}$ (temperatura de suprimento)

ε	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Parâmetros adimensionais									
h_0 / c	0,9	0,2	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
S	1,358	0,639	0,393	0,267	0,184	0,124	0,080	0,047	0,020
\bar{m}	0,459	0,582	0,649	0,689	0,715	0,728	0,732	0,728	0,688
\bar{F}	0,087	0,186	0,258	0,296	0,309	0,298	0,262	0,198	0,111
\bar{F}_0	0,234	0,498	0,810	1,192	1,728	2,563	3,972	6,790	16,141
$\bar{P}_{\max.}$	0,081	0,176	0,253	0,307	0,343	0,361	0,354	0,313	0,228
$\bar{P}_{\max,0}$	0,217	0,472	0,796	1,238	1,922	3,104	5,374	10,755	33,072
$P / P_{\max.}$	0,54	0,53	0,51	0,48	0,45	0,41	0,37	0,32	0,24
ϕ	79,533	73,886	68,250	62,448	56,426	50,164	43,285	35,049	25,089
$\theta_{\max.}$	104,00	116,00	126,00	134,00	142,00	148,00	155,00	161,00	167,00
$\theta_{p\max.}$	3,533	9,886	14,249	16,448	18,426	18,164	18,285	16,049	12,089
θ'	33,00	32,00	30,00	28,00	26,00	24,00	21,00	17,00	12,00
$\bar{F}a = \overline{\Delta Pot}$	2,906	3,761	4,349	4,870	5,441	6,146	7,138	8,754	12,034
$f(R/c)$	26,980	12,971	8,274	5,926	4,407	3,295	2,455	1,772	1,084
\bar{Q}_t	3,375	3,594	3,801	4,004	4,198	4,378	4,576	4,898	5,306
\bar{Q}_l	0,497	0,985	1,475	1,971	2,467	2,957	3,486	4,160	4,930
\bar{Q}_{rec}	2,878	2,609	2,326	2,033	1,731	1,421	1,090	0,739	0,376
Q_l / Q_t	0,147	0,274	0,388	0,492	0,588	0,675	0,762	0,849	0,929
$\overline{\Delta T}$	108,431	52,548	33,940	24,674	18,680	14,281	10,891	7,900	4,795
Parâmetros dimensionais									
F [kN]	0,613	1,650	2,992	4,677	7,027	10,614	16,546	28,116	63,188
$P_{\max.}$ [MPa]	0,113	0,312	0,589	0,971	1,563	2,571	4,477	8,907	25,895
P [MPa]	0,061	0,165	0,299	0,468	0,703	1,061	1,655	2,812	6,319
Fa [N]	33,075	42,814	49,505	55,433	61,934	69,951	81,245	99,639	136,976
ΔPot [kW]	0,260	0,336	0,389	0,435	0,486	0,549	0,638	0,783	1,076
Q_l [ml/min]	0,373	0,739	1,106	1,478	1,851	2,218	2,614	3,120	3,697
ΔT [°C]	4,097	5,346	6,260	7,114	8,092	9,344	11,108	13,693	18,676
T_m [°C]	69,492	61,219	57,678	55,801	54,684	54,123	53,947	54,131	55,857
m [mPa.s ⁿ]	13,313	16,875	18,817	19,974	20,711	21,095	21,217	21,088	19,938
μ [mPa.s]	13,313	16,875	18,817	19,974	20,711	21,095	21,217	21,088	19,938
T_{mist} [°C]	67,622	58,701	54,659	52,199	50,672	49,494	48,473	47,429	46,425
T_{rec} [°C]	71,527	63,872	60,784	59,180	58,759	58,844	59,579	61,105	65,112

Tabela 6.18 – Parâmetros de desempenho – $L/D = 1$, $n = 1$
 $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm $T_s = 55^\circ\text{C}$ (temperatura de suprimento)

ε	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Parâmetros adimensionais									
h_0 / c	0,9	0,2	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
S	1,358	0,639	0,393	0,267	0,184	0,124	0,080	0,047	0,020
\bar{m}	0,552	0,673	0,735	0,774	0,797	0,808	0,805	0,798	0,773
\bar{F}	0,105	0,214	0,291	0,332	0,344	0,331	0,288	0,217	0,125
\bar{F}_0	0,234	0,498	0,810	1,192	1,728	2,563	3,972	6,790	16,141
$\bar{P}_{\max.}$	0,097	0,203	0,287	0,345	0,383	0,401	0,389	0,343	0,256
$\bar{P}_{\max.0}$	0,217	0,472	0,796	1,238	1,922	3,104	5,374	10,755	33,072
$P / P_{\max.}$	0,54	0,53	0,51	0,48	0,45	0,41	0,37	0,32	0,24
ϕ	79,533	73,886	68,250	62,448	56,426	50,164	43,285	35,049	25,089
$\theta_{\max.}$	104,00	116,00	126,00	134,00	142,00	148,00	155,00	161,00	167,00
$\theta_{p\max.}$	3,533	9,886	14,250	16,448	18,426	18,164	18,285	16,049	12,089
θ'	33,00	32,00	30,00	28,00	26,00	24,00	21,00	17,00	12,00
$\bar{F}a = \overline{\Delta Pot}$	3,492	4,347	4,921	5,471	6,069	6,821	7,847	9,596	13,520
$f(R/c)$	26,980	12,971	8,274	5,926	4,407	3,295	2,455	1,772	1,084
\bar{Q}_t	3,375	3,594	3,801	4,004	4,198	4,378	4,576	4,898	5,306
\bar{Q}_l	0,497	0,985	1,475	1,971	2,467	2,957	3,486	4,160	4,930
\bar{Q}_{rec}	2,878	2,609	2,326	2,033	1,731	1,421	1,090	0,739	0,376
Q_l / Q_t	0,147	0,274	0,388	0,492	0,588	0,675	0,762	0,849	0,929
$\overline{\Delta T}$	108,430	52,548	33,940	24,674	18,680	14,281	10,891	7,900	4,795
Parâmetros dimensionais									
F [kN]	0,521	1,349	2,394	3,716	5,543	8,331	12,865	21,796	50,206
$P_{\max.}$ [MPa]	0,096	0,255	0,471	0,771	1,233	2,018	3,481	6,905	20,575
P [MPa]	0,052	0,135	0,239	0,372	0,554	0,833	1,277	2,180	5,02
Fa [N]	28,112	34,992	39,612	44,043	48,854	54,907	63,170	77,243	108,834
ΔPot [kW]	0,221	0,275	0,311	0,346	0,384	0,431	0,496	0,607	0,855
Q_L [ml/min]	0,373	0,739	1,106	1,478	1,851	2,218	2,614	3,120	3,697
ΔT [°C]	3,482	4,370	5,009	5,652	6,383	7,334	8,637	10,615	14,839
T_m [°C]	75,666	68,206	65,096	63,285	62,304	61,852	61,977	62,280	63,345
m [mPa.s ⁿ]	11,316	13,792	15,057	15,870	16,337	16,558	16,496	16,348	15,842
μ [mPa.s]	11,316	13,792	15,057	15,870	16,337	16,558	16,496	16,348	15,842
T_{mist} [°C]	74,100	66,164	62,702	60,624	59,311	58,341	57,643	56,875	56,112
T_{rec} [°C]	77,398	70,378	67,586	66,078	65,457	65,293	66,095	67,431	70,689

Tabela 6.19 – Parâmetros de desempenho – $L/D = 1,0$ e $n = 1,0$
 $N = 1500$ rpm, $c = 0,05$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$ (temperatura de suprimento)

ε	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Parâmetros adimensionais									
h_0 / c	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
S	1,358	0,639	0,393	0,267	0,184	0,124	0,080	0,047	0,020
\bar{m}	0,177	0,251	0,313	0,335	0,361	0,372	0,376	0,370	0,337
\bar{F}	0,034	0,080	0,124	0,144	0,156	0,153	0,134	0,101	0,054
\bar{F}_0	0,234	0,498	0,810	1,192	1,728	2,563	3,972	6,790	16,141
$\bar{P}_{\max.}$	0,031	0,076	0,122	0,149	0,174	0,185	0,182	0,159	0,111
$\bar{P}_{\max.0}$	0,217	0,472	0,796	1,238	1,922	3,104	5,374	10,755	33,072
$P / P_{\max.}$	0,54	0,53	0,51	0,48	0,45	0,41	0,37	0,32	0,24
ϕ	79,533	73,886	68,249	62,448	56,426	50,164	43,285	35,049	25,089
$\theta_{\max.}$	104,00	116,00	126,00	134,00	142,00	148,00	155,00	161,00	167,00
$\theta_{p\max.}$	3,533	9,886	14,249	16,448	18,426	18,164	18,285	16,049	12,089
θ'	33,00	32,00	30,00	28,00	26,00	24,00	21,00	17,00	12,00
$\bar{F}a = \overline{\Delta Pot}$	1,119	1,623	2,097	2,371	2,750	3,143	3,664	4,453	5,889
$f(R/c)$	26,980	12,971	8,274	5,926	4,407	3,295	2,455	1,772	1,084
\bar{Q}_t	3,375	3,594	3,801	4,004	4,198	4,378	4,576	4,898	5,306
\bar{Q}_l	0,497	0,985	1,475	1,971	2,467	2,957	3,486	4,160	4,930
\bar{Q}_{rec}	0,497	2,609	2,326	2,033	1,731	1,421	1,090	0,739	0,376
Q_l / Q_t	0,147	0,274	0,388	0,492	0,588	0,675	0,762	0,849	0,929
$\overline{\Delta T}$	108,431	52,548	33,940	24,674	18,680	14,281	10,891	7,900	4,795
Parâmetros dimensionais									
F [kN]	1,402	4,228	8,562	13,514	21,087	32,227	50,416	84,902	183,565
$P_{\max.}$ [MPa]	0,259	0,800	1,684	2,806	4,690	7,806	13,643	26,896	75,225
P [MPa]	0,140	0,423	0,856	1,351	2,109	3,223	5,042	8,490	18,356
Fa [N]	37,819	54,834	70,839	80,090	92,923	106,196	123,780	150,441	198,961
ΔPot [kW]	0,297	0,431	0,556	0,629	0,730	0,834	0,972	1,182	1,563
Q_L [ml/min]	0,186	0,369	0,553	0,739	0,925	1,109	1,307	1,560	1,849
ΔT [°C]	9,370	13,695	17,914	20,556	24,283	28,371	33,848	41,348	54,256
T_m [°C]	92,791	77,497	69,082	66,590	64,011	62,981	62,666	63,178	66,466
m [mPa.s ⁿ]	7,612	10,807	13,463	14,430	15,537	16,012	16,162	15,920	14,480
μ [mPa.s]	7,612	10,807	13,463	14,430	15,537	16,012	16,162	15,920	14,480
T_{mist} [°C]	88,260	70,792	60,305	56,164	52,005	48,657	45,597	42,350	39,141
T_{rec} [°C]	97,454	84,300	76,349	76,685	76,247	77,071	79,483	83,729	93,419

Tabela 6.20 – Parâmetros de desempenho – $L/D = 1,0$ e $n = 1,0$
 $N = 1500$ rpm, $c = 0,15$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$ (temperatura de suprimento)

ε	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Parâmetros adimensionais									
h_0 / c	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
S	1,358	0,639	0,393	0,267	0,184	0,124	0,080	0,047	0,020
\bar{m}	0,508	0,619	0,686	0,727	0,756	0,767	0,760	0,772	0,735
\bar{F}	0,096	0,197	0,272	0,312	0,327	0,314	0,272	0,210	0,119
\bar{F}_0	0,234	0,498	0,810	1,192	1,728	2,563	3,972	6,790	16,141
$\bar{P}_{\max.}$	0,089	0,187	0,268	0,324	0,363	0,381	0,368	0,332	0,243
$\bar{P}_{\max.0}$	0,217	0,472	0,796	1,238	1,922	3,104	5,374	10,755	33,072
$P / P_{\max.}$	0,54	0,53	0,51	0,48	0,45	0,41	0,37	0,32	0,24
ϕ	79,533	73,886	68,250	62,448	56,426	50,164	43,285	35,049	25,089
$\theta_{\max.}$	104,00	116,00	126,00	134,00	142,00	148,00	155,00	161,00	167,00
$\theta_{p\max.}$	3,533	9,886	14,250	16,448	18,426	18,164	18,285	16,049	12,089
θ'	33,00	32,00	30,00	28,00	26,00	24,00	21,00	17,00	12,00
$\bar{F}a = \overline{\Delta Pot}$	3,211	3,997	4,597	5,134	5,755	6,477	7,413	9,285	12,863
$f(R/c)$	26,980	12,971	8,274	5,926	4,407	3,295	2,455	1,772	1,084
\bar{Q}_t	3,375	3,594	3,801	4,004	4,198	4,378	4,576	4,898	5,306
\bar{Q}_l	0,497	0,985	1,475	1,971	2,467	2,957	3,486	4,160	4,930
\bar{Q}_{rec}	2,878	2,609	2,326	2,033	1,731	1,421	1,090	0,739	0,376
Q_l / Q_t	0,147	0,274	0,388	0,492	0,588	0,675	0,762	0,849	0,929
$\overline{\Delta T}$	108,431	52,548	33,940	24,674	18,680	14,281	10,891	7,900	4,795
Parâmetros dimensionais									
F [kN]	0,447	1,157	2,086	3,252	4,903	7,379	11,335	19,671	44,550
$P_{\max.}$ [MPa]	0,083	0,219	0,410	0,675	1,090	1,787	3,067	6,232	18,257
P [MPa]	0,045	0,116	0,209	0,325	0,490	0,738	1,133	1,967	4,455
Fa [N]	36,163	45,011	51,766	57,821	64,813	72,944	83,486	104,570	144,859
ΔPot [kW]	0,284	0,354	0,407	0,454	0,509	0,573	0,656	0,821	1,138
Q_L [ml/min]	0,559	1,108	1,659	2,217	2,776	3,327	3,921	4,679	5,546
ΔT [°C]	2,986	3,747	4,364	4,947	5,646	6,496	7,610	9,580	13,168
T_m [°C]	53,080	47,349	44,510	42,986	41,953	41,568	41,799	41,410	42,671
m [mPa.s ⁿ]	21,835	26,612	29,515	31,253	32,510	32,996	32,703	33,198	31,629
μ [mPa.s]	21,835	26,612	29,515	31,253	32,510	32,996	32,703	33,198	31,629
T_{mist} [°C]	51,665	45,336	42,170	40,330	39,041	38,211	37,989	36,704	36,005
T_{rec} [°C]	54,542	49,237	46,716	45,498	44,802	44,890	47,547	46,296	49,181

A Figura 6.13 mostra que o número de Sommerfeld decresce com o aumento da excentricidade, para qualquer relação L/D . Para menores relações L/D resultam maiores valores de S . Foi observado também que o número de Sommerfeld diminui com o aumento do índice de característica reológica n . Tipicamente, das Tabelas 6.14, 6.15 e 6.16, para $\varepsilon=0,5$, tem-se $S =0,21$, $S =0,18$ e $S =0,17$ para $n=0,8$, $n=1,0$ e $n=1,1$, respectivamente. Para comprovar, os parâmetros de desempenho do mancal foram calculados para o índice $n =0,5$, obtendo-se $S =0,278$.

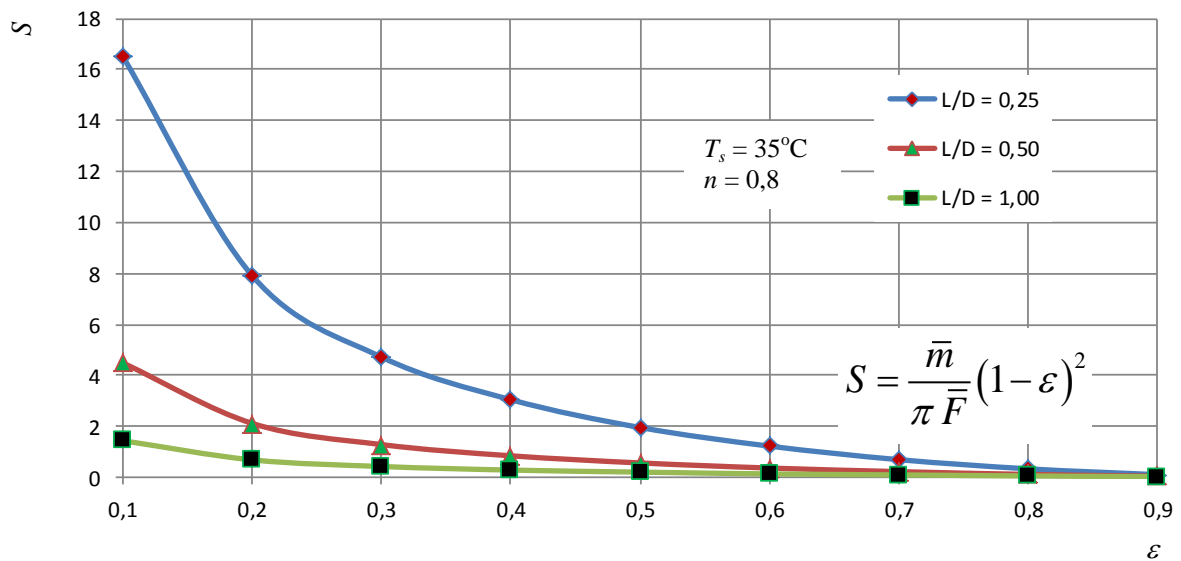


Figura 6.13 Número de Sommerfeld, S , versus ε
 $n =0,8$, $N =1500$ rpm, $c =0,1$ mm, $T_s =35^\circ\text{C}$

As Figuras 6.14, 6.15 e 6.16 mostram que a temperatura média, T_m , para variação de L/D (0,25; 0,50 e 1,00) diminui com o aumento de ε , passa por um mínimo e sobe novamente. Pode-se verificar também que T_m é menor para menores relações L/D ; embora a diferença entre esses valores seja muito pequena.

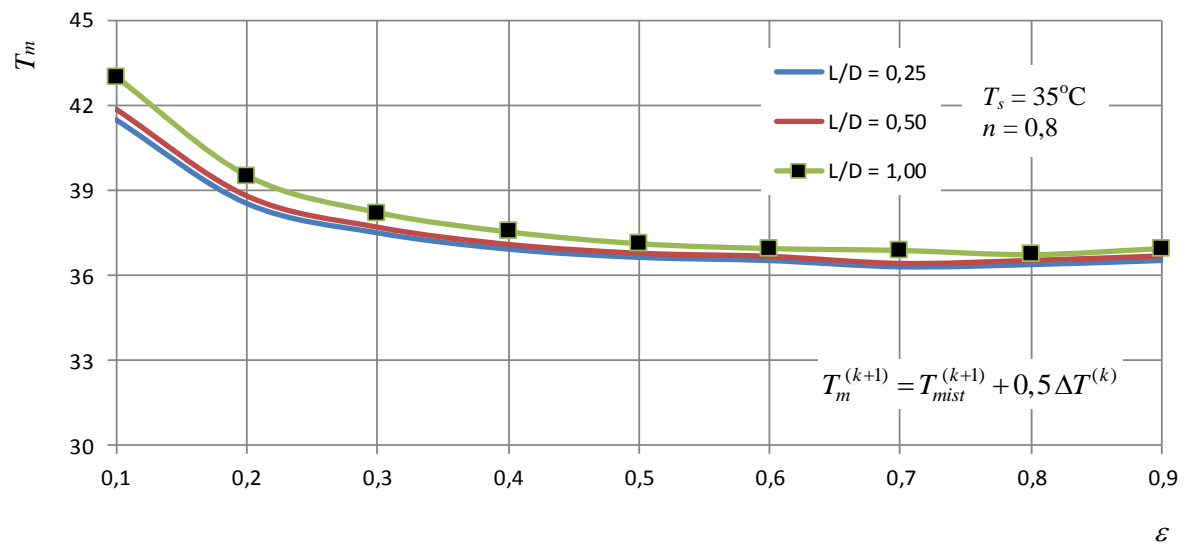


Figura 6.14 Temperatura média, T_m , versus ε
 $n = 0,8$, $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$

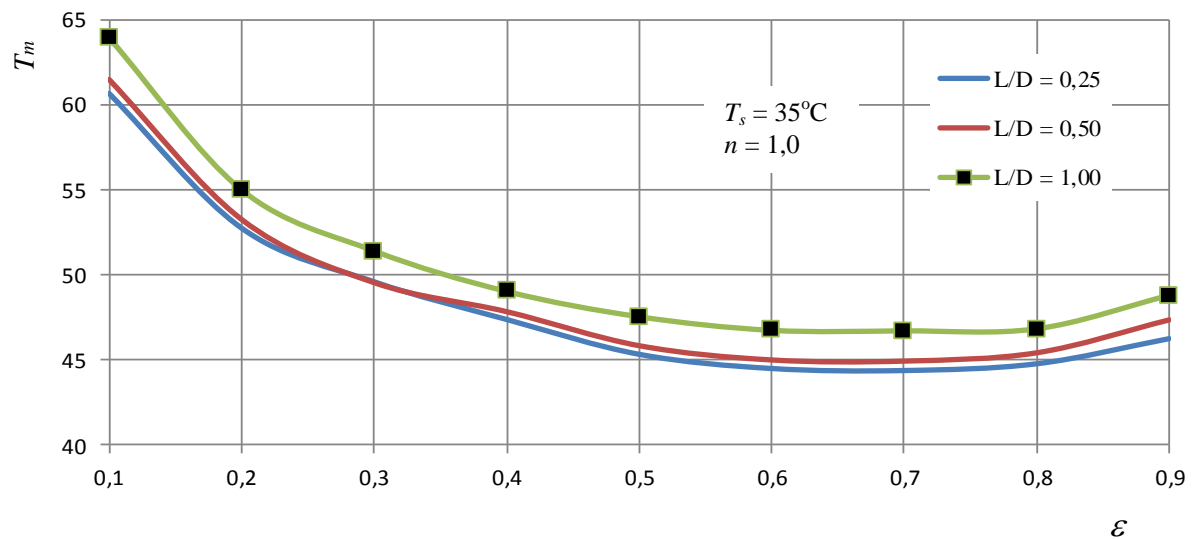


Figura 6.15 Temperatura média, T_m , versus ε
 $n = 1,0$, $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$

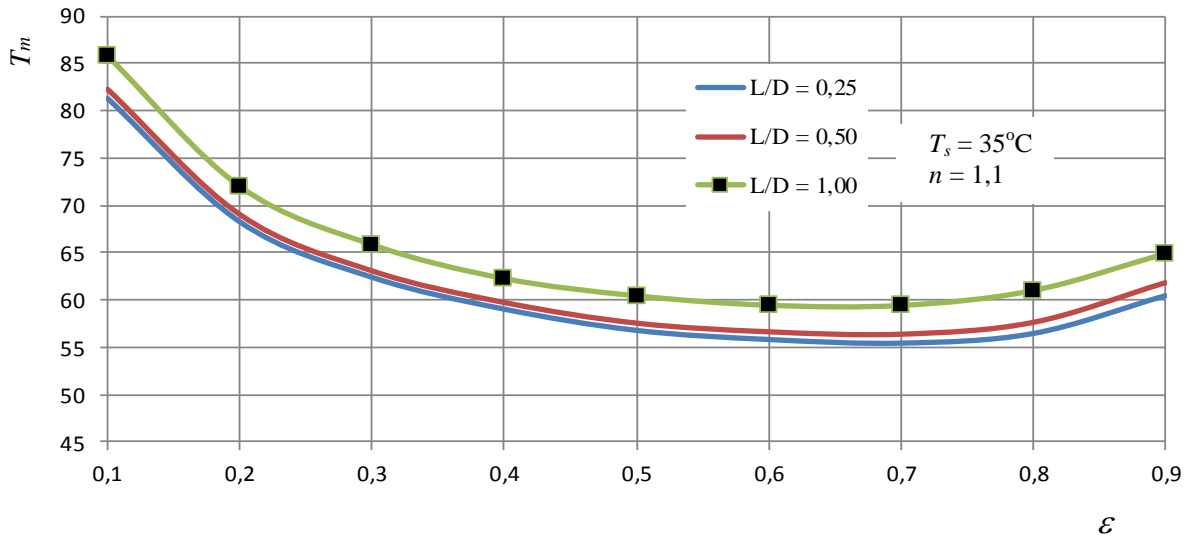


Figura 6.16 Temperatura média, T_m , versus ε
 $n = 1,1$; $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm, $T_s = 35$ °C

A pressão adimensional, \bar{P}_{max} , aumenta com o aumento de ε , passa por um máximo e em seguida decresce como mostram as Figuras 6.17, 6.18 e 6.19, respectivamente para $n = 0,8$, $n = 1,0$ e $n = 1,1$. Pode-se observar que as pressões adimensionais diminuem com o aumento do índice de característica reológica. Para cálculo das pressões foram admitidas uma malha (361 por 57) nós, folga radial $c = 0,1$ mm e rotação $N = 1500$ rpm.

Por outro lado, analisando-se as Figuras 6.20, 6.21 e 6.22, verifica-se que as pressões dimensionais são tanto maiores quanto maior o índice de característica reológica e aumentam continuamente com a excentricidade.

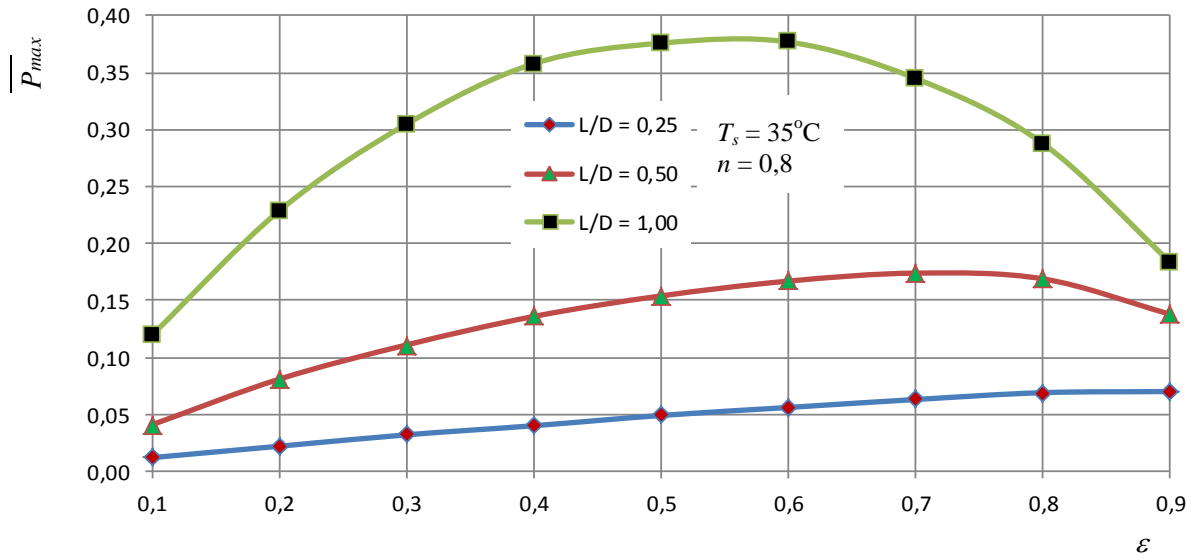


Figura 6.17 Pressão máxima adimensional, \bar{P}_{max} , versus ε

$n = 0,8$, $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$

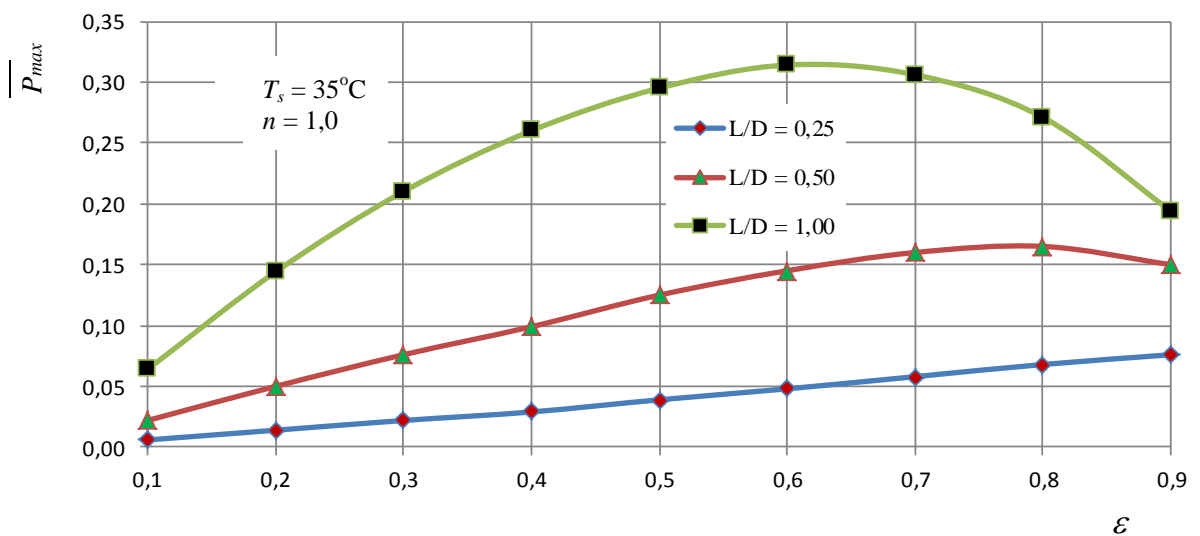


Figura 6.18 Pressão máxima adimensional, \bar{P}_{max} , versus ε

$n = 1,0$; $N = 1500$ rpm; $c = 0,1$ mm; $T_s = 35^\circ\text{C}$

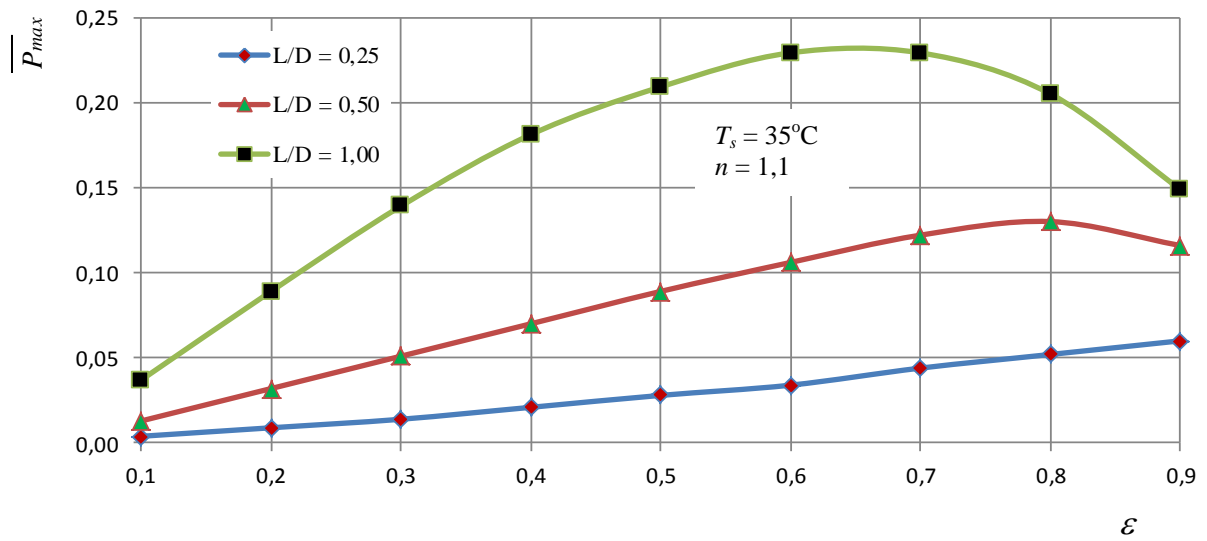


Figura 6.19 Pressão máxima adimensional, \bar{P}_{max} , versus ε

$n = 1,1; N = 1500 \text{ rpm}, c = 0,1 \text{ mm}, T_s = 35^\circ\text{C}$

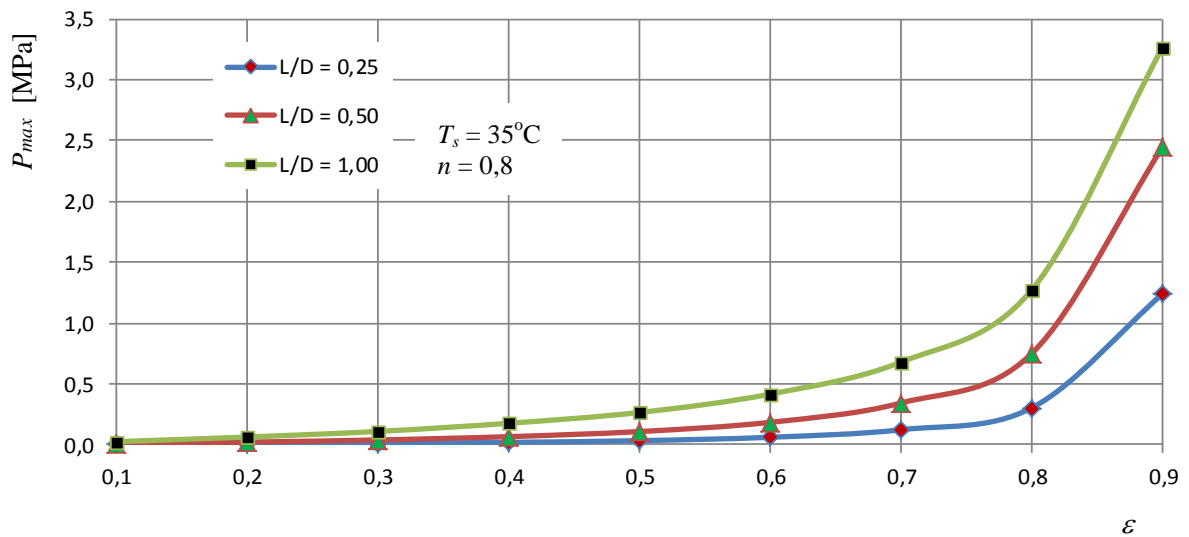


Figura 6.20 Pressão máxima, P_{max} MPa, versus ε

$n = 0,8, N = 1500 \text{ rpm}, c = 0,1 \text{ mm}, T_s = 35^\circ\text{C}$

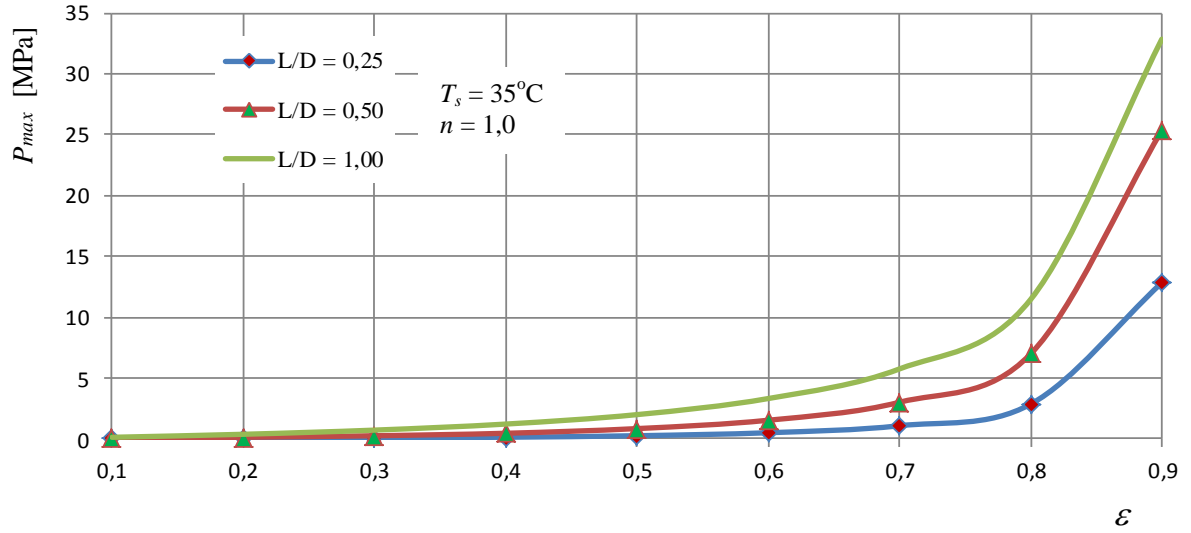


Figura 6.21 Pressão máxima, P_{max} MPa, versus ε
 $n = 1,0$; $N = 1500$ rpm; $c = 0,1$ mm; $T_s = 35^\circ\text{C}$

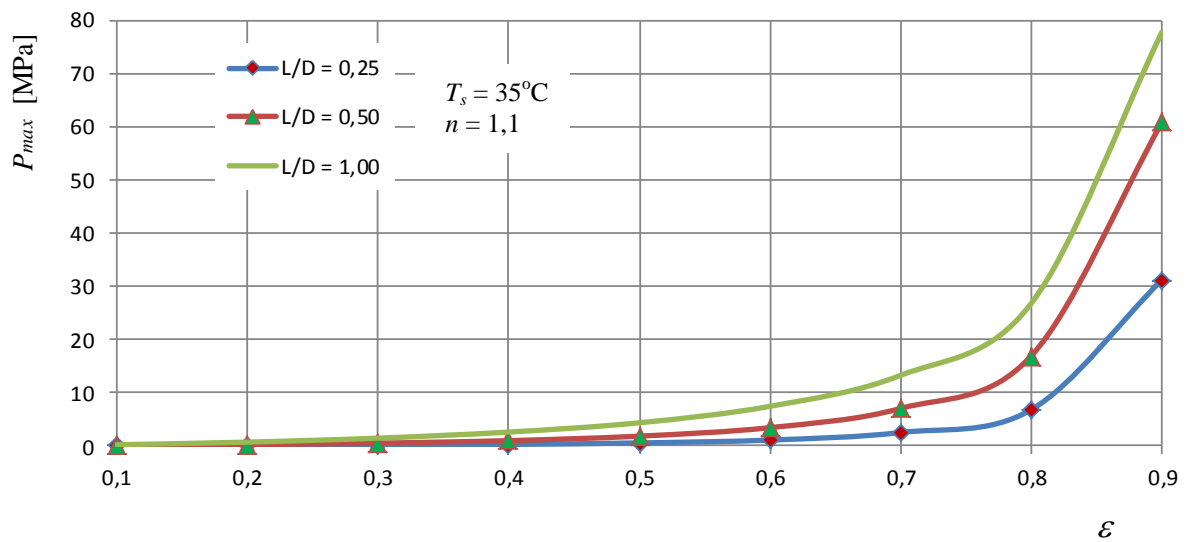


Figura 6.22 Pressão máxima dimensional, P_{max} MPa, versus ε
 $n = 1,1$; $N = 1500$ rpm; $c = 0,1$ mm; $T_s = 35^\circ\text{C}$

A Figura 6.23 mostra para as três relações de L/D e $n=1,0$, que a vazão adimensional de entrada, \bar{Q}_t , aumenta com o aumento da excentricidade. Para os índices de característica reológica $n=0,8$ e $n=1,1$ o comportamento é semelhante e não há muita variação de valores. Os resultados foram obtidos para rotação $N=1500$ rpm, folga radial $c=0,1$ mm e temperatura de suprimento $T_s=35^\circ\text{C}$. Dados mais específicos sobre o comportamento de \bar{Q}_t , bem como da vazão de recirculação, \bar{Q}_{rec} , e da vazão lateral, \bar{Q}_L , podem ser obtidos das Tabelas 6.8 a 6.16.

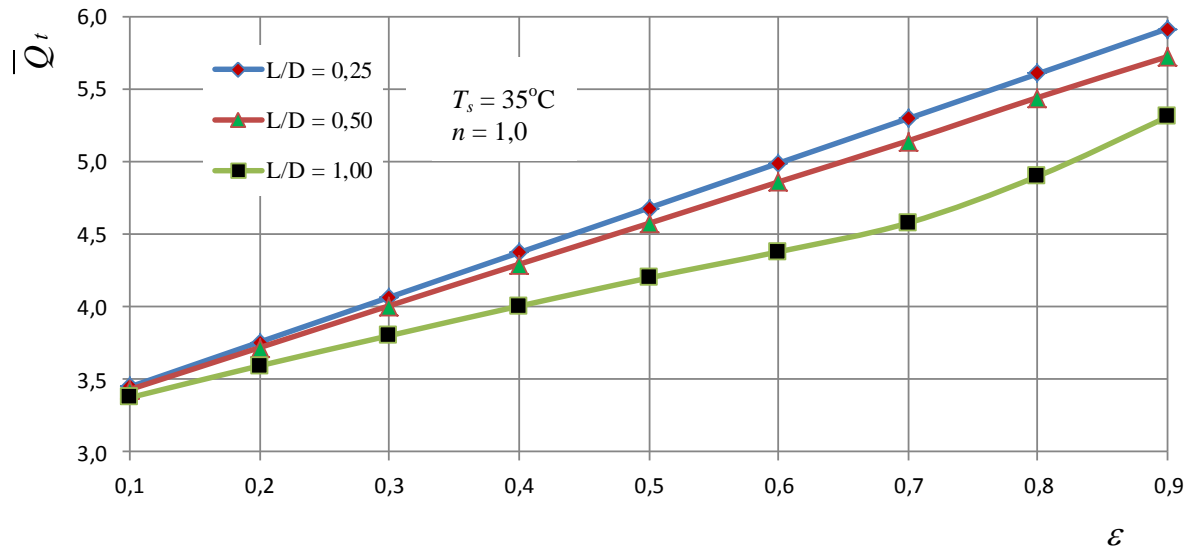


Figura 6.23 Vazão de entrada adimensional, \bar{Q}_t , versus ε
 $n=1,0, N=1500$ rpm, $c=0,1$ mm, $T_s=35^\circ\text{C}$

A Figura 6.24, mostra para as três relações de L/D e $n=0,8$, que a vazão lateral dimensional, Q_L , aumenta com o aumento da excentricidade. Para os índices de característica reológica $n=1,0$ e $n=1,1$ o comportamento é semelhante e não há muita variação de valores. Os resultados foram obtidos para rotação $N=1500$ rpm, folga radial $c=0,1$ mm e temperatura de suprimento $T_s=35^\circ\text{C}$. Nota-se que para $L/D=1$ a vazão é maior. Isso pode ser comprovado através das Tabelas 6.14, 6.15 e 6.16, onde, por exemplo, para a excentricidade $\varepsilon=0,6$ tem-se, $Q_L=2,093$ ml/min., $2,218$ ml/min. e $2,247$ ml/min., respectivamente, para $n=0,8, 1$ e $1,1$.

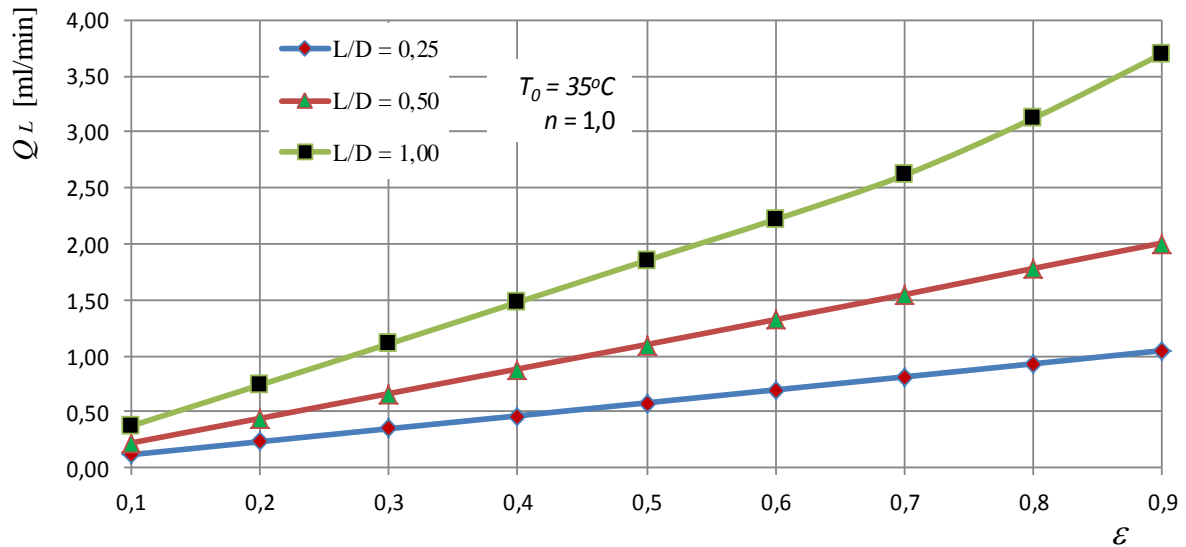


Figura 6.24 Vazão lateral, Q_L [ml/min], versus ε
 $n = 0,8$, $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$

As Figuras 6.25, 6.26 e 6.27 mostram, para as três relações de L/D , que a capacidade de carga adimensional, \bar{F} , aumenta com o aumento da excentricidade adimensional, ε , passa por um máximo, em torno de 0,5 a 0,7, e decresce em seguida. Observa-se também que, como era de se esperar, quanto maior a relação L/D , maior a capacidade de carga do mancal. Além disso, comparando-se essas três figuras, observa-se que a capacidade de carga adimensional é tanto menor quanto maior o índice de característica reológica do lubrificante. Isso pode ser visualizado, com mais exatidão, nas Tabelas 6.14, 6.15 e 6.16, a partir das quais as Figuras 6.25, 6.26 e 6.27 foram plotadas.

As Figuras 6.28, 6.29 e 6.30, obtidas para $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$, mostram que a capacidade de carga dimensional, F , aumenta com a excentricidade, para qualquer relação L/D . Para excentricidades maiores que 0,6 esse aumento é mais significativo. Comparando-se as três figuras observa-se também que F aumenta com o aumento do índice de característica reológica, comportamento inverso ao da capacidade de carga adimensional, \bar{F} . Especificamente, das Tabelas 6.14, 6.15 e 6.16, para a excentricidade $\varepsilon = 0,6$ e $L/D = 1$, obtêm-se $F = 1,81$ kN, $F = 13,69$ kN e $F = 30,13$ kN, respectivamente para $n = 0,8$, $n = 1,0$ e $n = 1,1$.

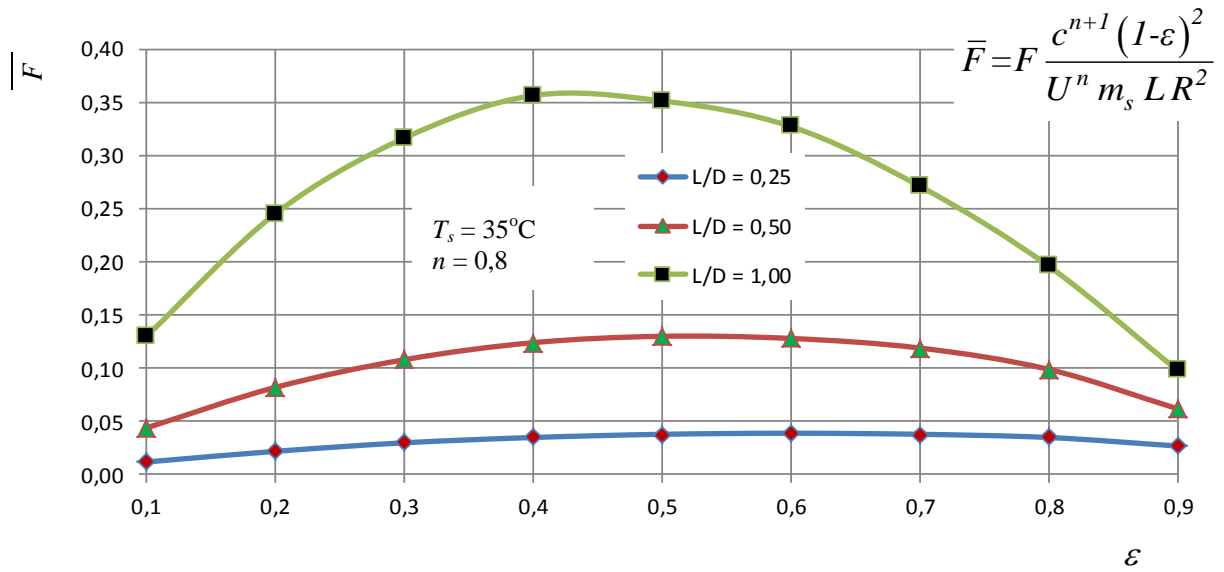


Figura 6.25 Capacidade de carga adimensional, \bar{F} , versus ε
 $n = 0,8$, $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$

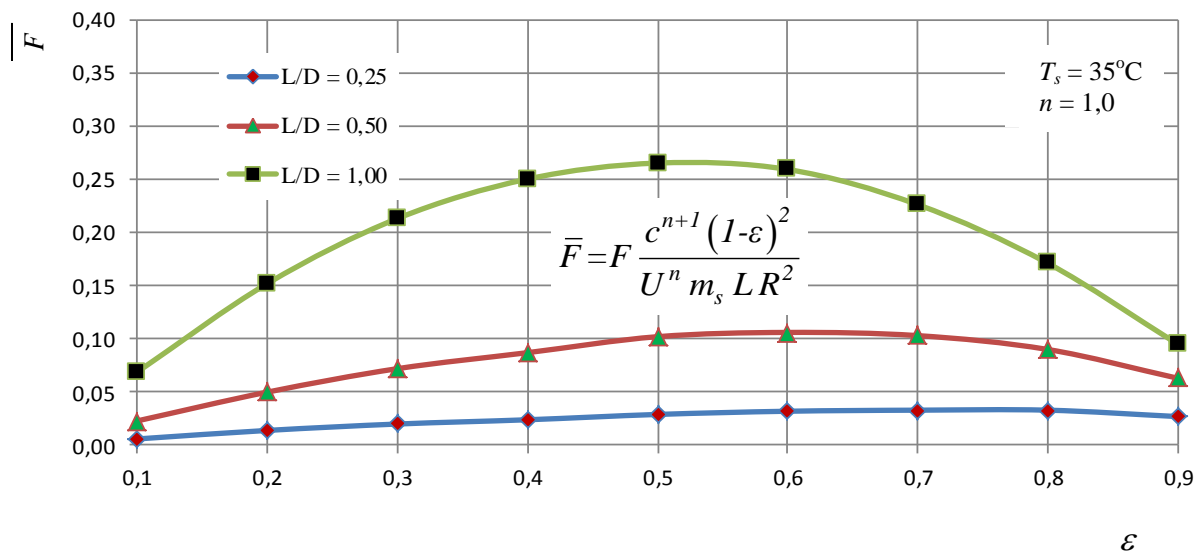


Figura 6.26 Capacidade de carga adimensional, \bar{F} , versus ε
 $n = 1,0$; $N = 1500$ rpm; $c = 0,1$ mm; $T_s = 35^\circ\text{C}$

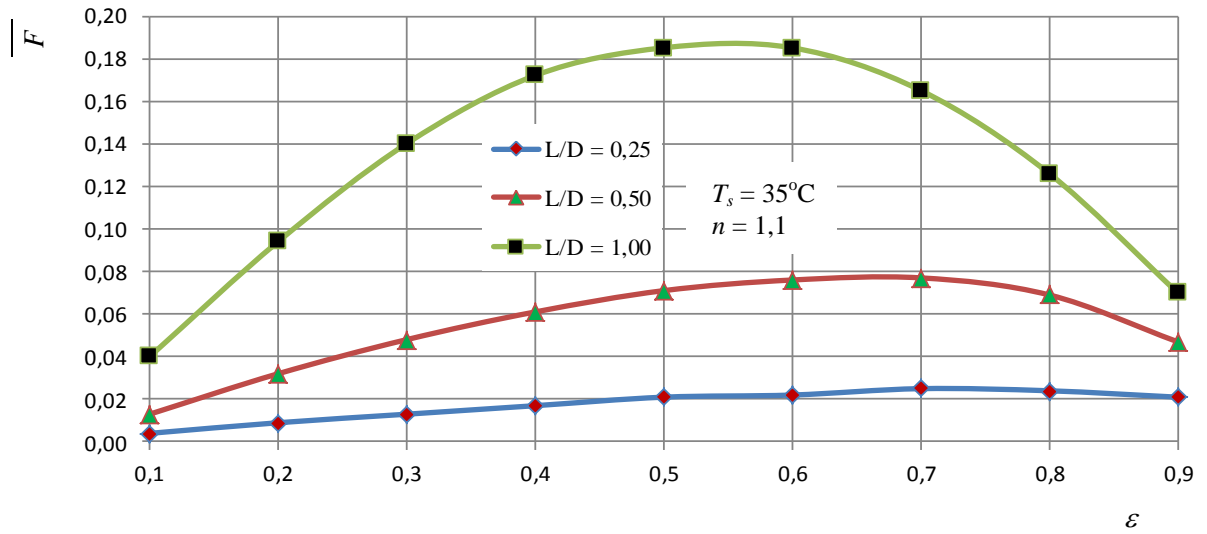


Figura 6.27 Capacidade de carga adimensional, \bar{F} , versus ε
 $n = 1,1$; $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$

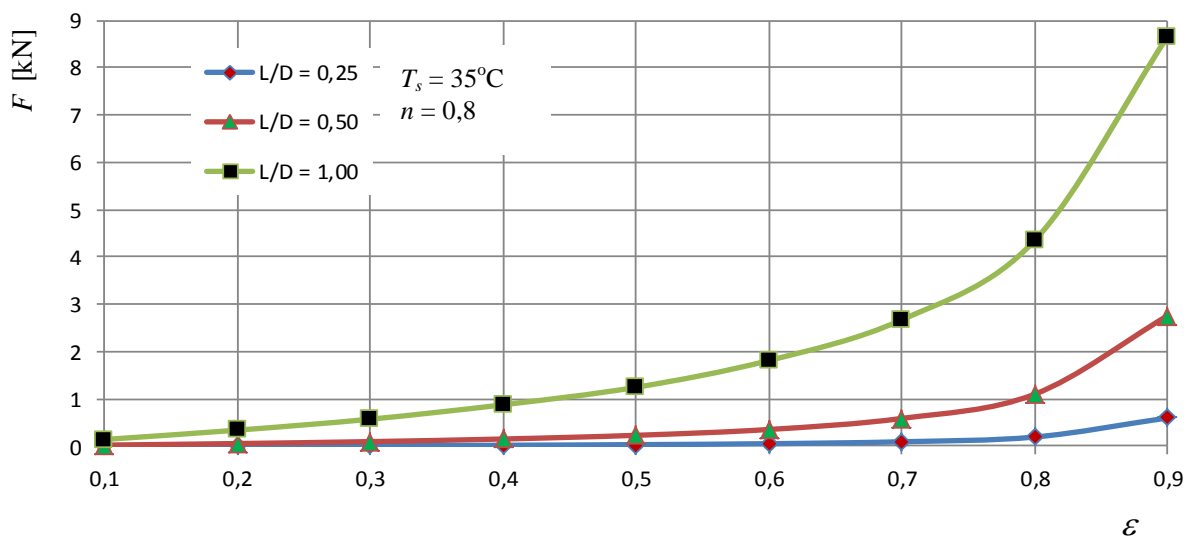


Figura 6.28 Capacidade de carga, F [kN], versus ε
 $n = 0,8$, $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$

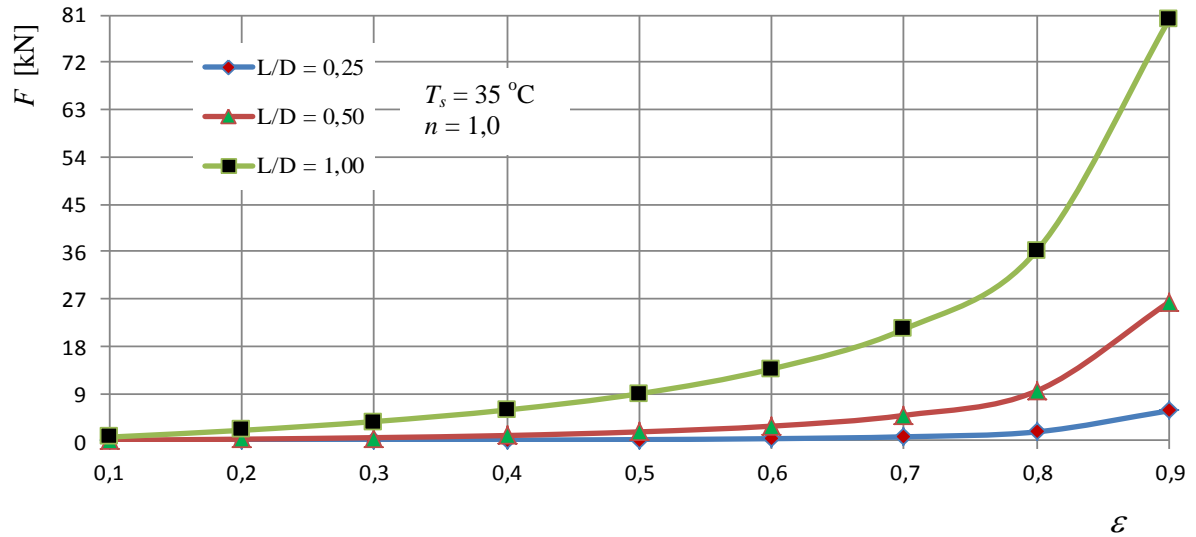


Figura 6.29 Capacidade de carga, F [kN], versus ε
 $n = 1,0$; $N = 1500$ rpm; $c = 0,1$ mm; $T_s = 35^\circ\text{C}$

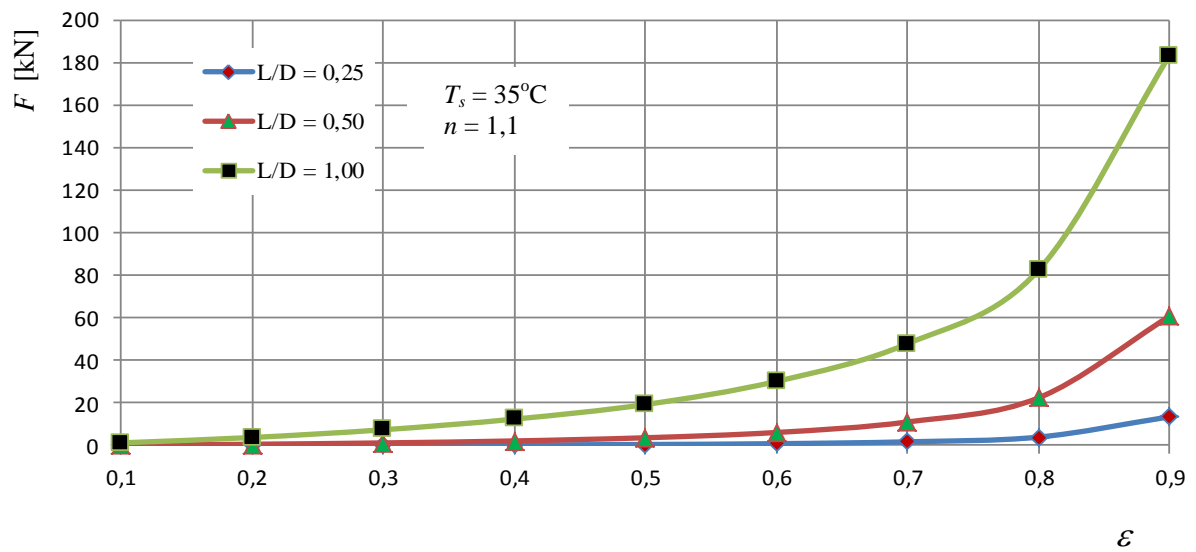


Figura 6.30 Capacidade de carga, F [kN], versus ε
 $n = 1,1$; $N = 1500$ rpm; $c = 0,01$ mm; $T_s = 35^\circ\text{C}$

A Figura 6.31 mostra que o ângulo de atitude, ϕ , diminui com o aumento da excentricidade, para as três relações L/D . Pode-se concluir a partir das Tabelas 6.14, 6.15 e 6.16 para $L/D = 1$, que a variação do índice de característica reológica do lubrificante praticamente não altera o ângulo de atitude.

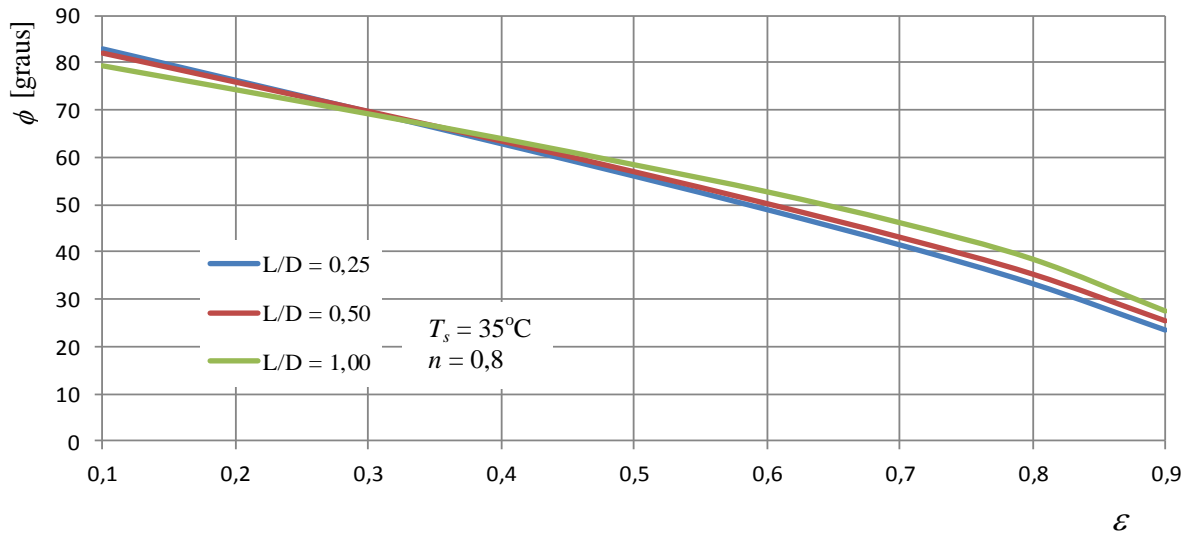


Figura 6.31 Ângulo de atitude, ϕ , versus ε
 $n = 0,8$, $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$

A Figura 6.32 mostra um comportamento sempre crescente da força de atrito adimensional, \bar{F}_a com a excentricidade, ε , para os três tipos de fluido em questão, ou seja, $n=0,8$, $n=1$ e $n=1$. Observa-se que a força de atrito adimensional é tanto menor quanto maior o índice de característica reológica do lubrificante. Isso pode ser visualizado, com mais exatidão, nas Tabelas 6.14, 6.15 e 6.16.

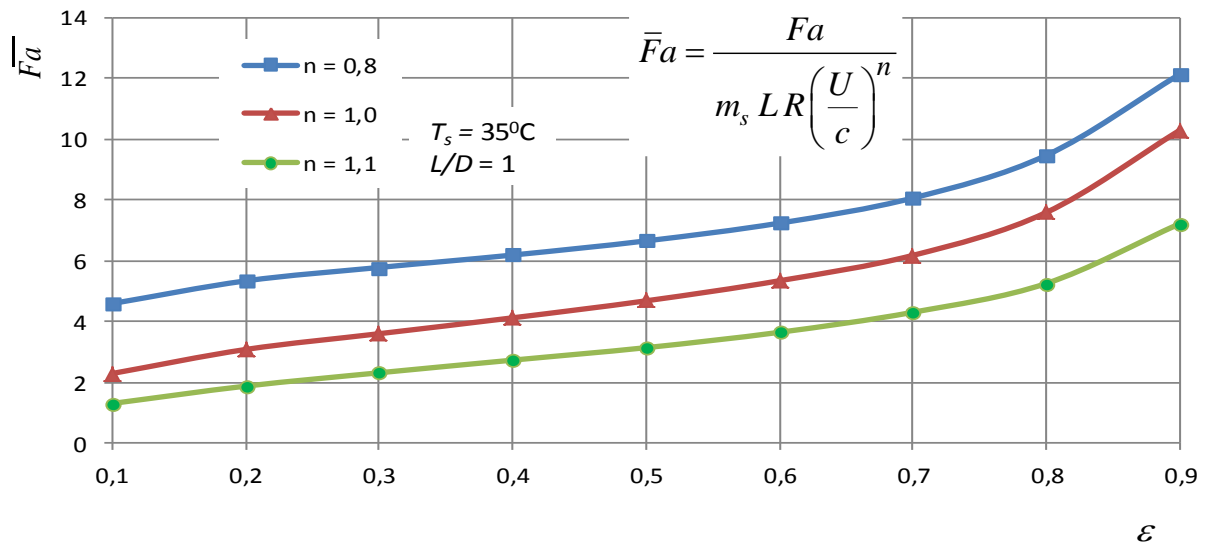


Figura 6.32 Força de atrito adimensional, \bar{F}_a , versus ε

$L/D=1,0$, $N=1500$ rpm, $c=0,1$ mm, $T_s=35^\circ\text{C}$

As Figuras 6.33, 6.34 e 6.35 mostram um comportamento sempre crescente da força de atrito dimensional, F_a , para os três índices de característica reológica, sendo que para $n=1,1$ (fluido dilatante) os valores são bem mais expressivos em relação aos valores para $n=0,8$ (fluido pseudoplástico), ou seja, F_a aumenta com o aumento do índice de característica reológica, comportamento inverso ao da força de atrito adimensional, \bar{F}_a .

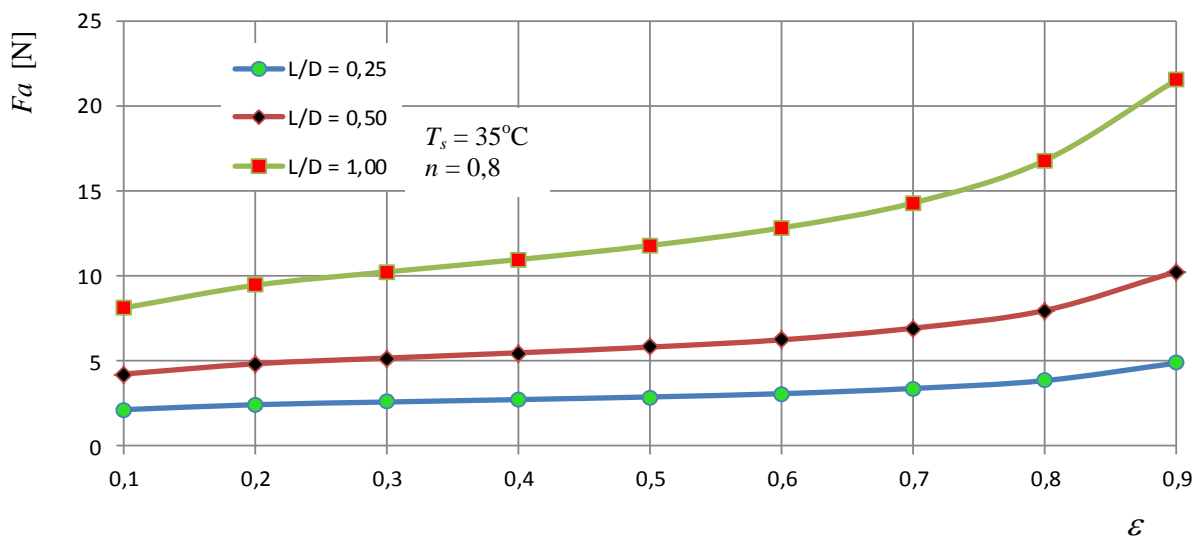


Figura 6.33 Força de atrito, F_a [N], versus ε

$n=0,8$, $N=1500$ rpm, $c=0,1$ mm, $T_s=35^\circ\text{C}$

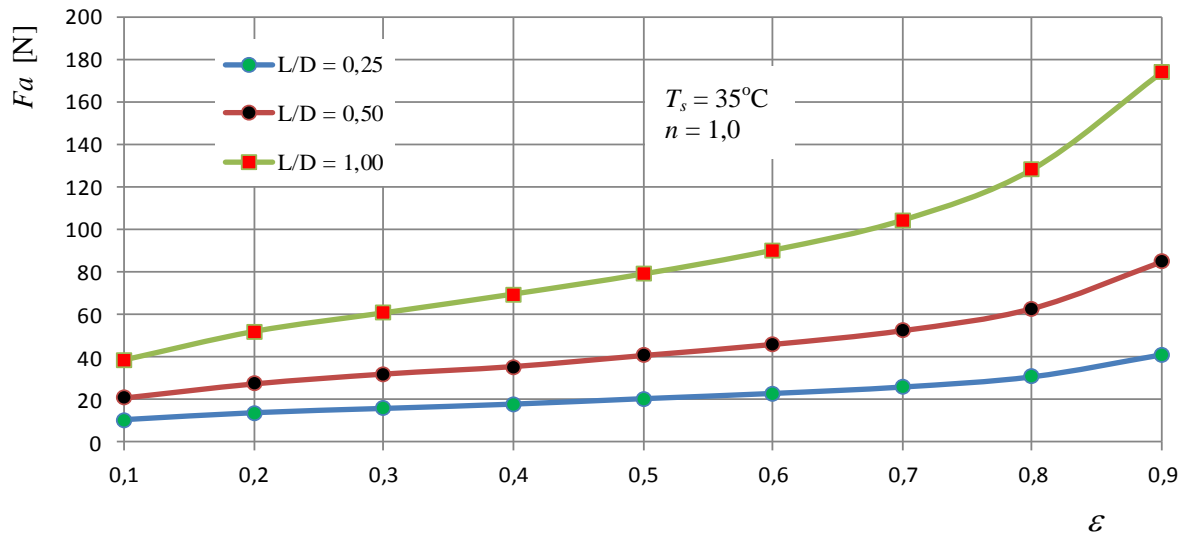


Figura 6.34 Força de atrito, F_a [N], versus ε
 $n=1,0$; $N=1500$ rpm; $c=0,1$ mm; $T_s=35^\circ\text{C}$

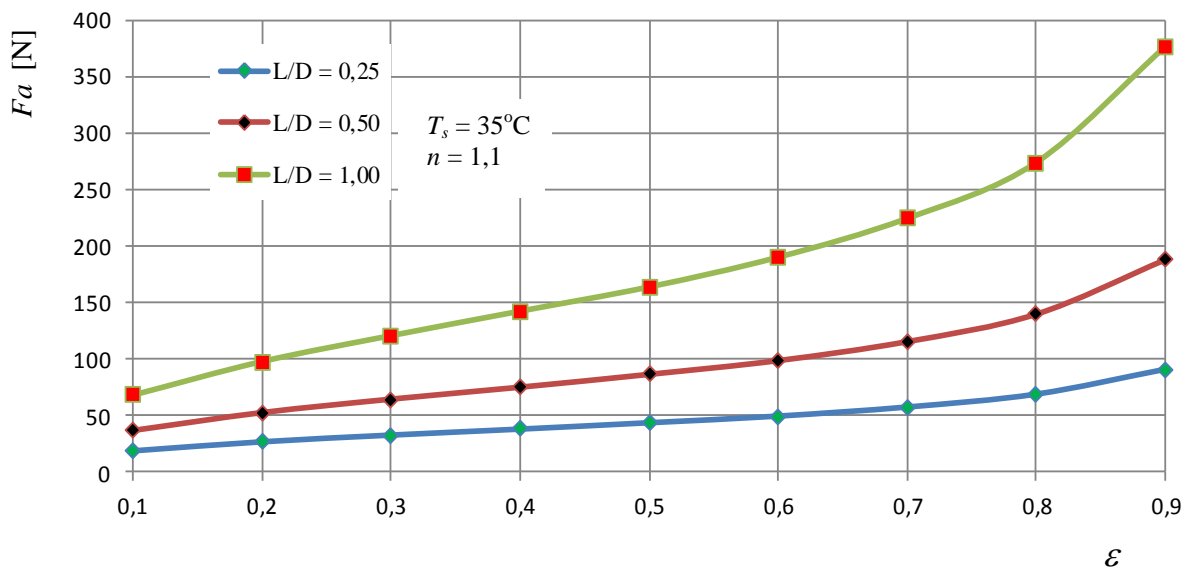


Figura 6.35 Força de atrito, F_a [N], versus ε
 $n=1,1$; $N=1500$ rpm; $c=0,1$ mm; $T_s=35^\circ\text{C}$

A Figura 6.36 mostra a variação das vazões adimensionais $\bar{Q}_t, \bar{Q}_L, \bar{Q}_{rec}$ com a excentricidade ε , para $N=1500$ rpm, folga radial $c=0,1$ mm, $T_s=35^\circ\text{C}$ e $n=1$. Pode-se observar que \bar{Q}_t e \bar{Q}_L aumentam com ε , enquanto que \bar{Q}_{rec} decresce. Observou-se que essas vazões são cerca de 2,3% menores para $n=0,8$ e de 0,7% maiores para $n=1,1$.

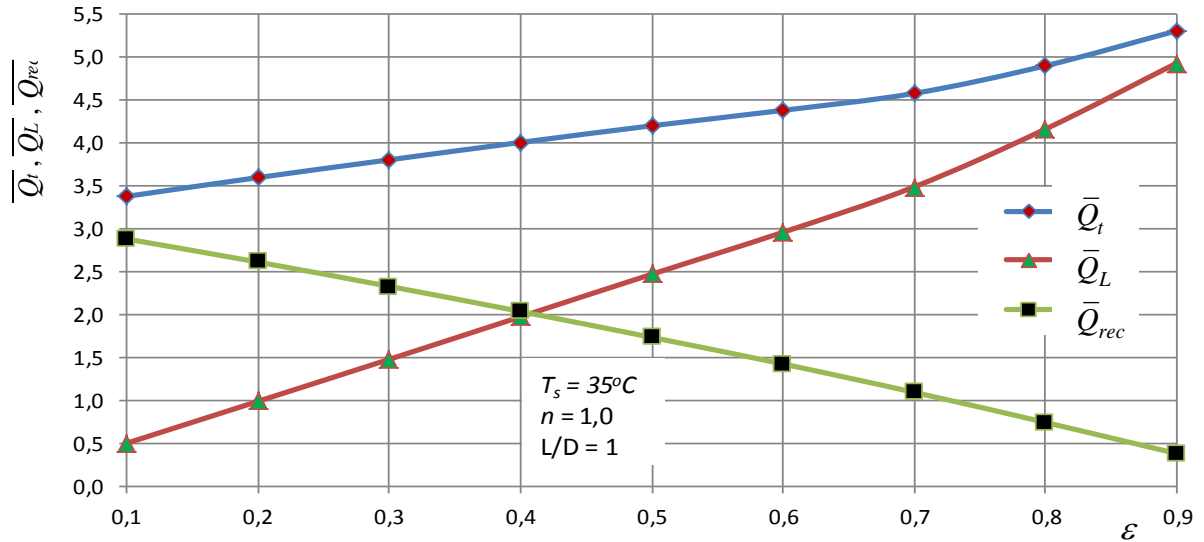


Figura 6.36 Vazões adimensionais, $\bar{Q}_t, \bar{Q}_L, \bar{Q}_{rec}$, versus ε
para $L/D = 1,0$, $c = 0,1$ mm e $n = 1$.

A Figura 6.37, para $N = 1500$ rpm, $c = 0,1$ mm, $T_s = 35^\circ\text{C}$ e $L/D = 1$, mostra uma comparação da perda de potência dimensional para fluidos com índice de característica reológica $n = 0,8$, $n = 1$ e $n = 1,1$. Nota-se que a perda de potência é sempre crescente com ε e tanto maior quanto maior o índice de característica reológica do lubrificante.

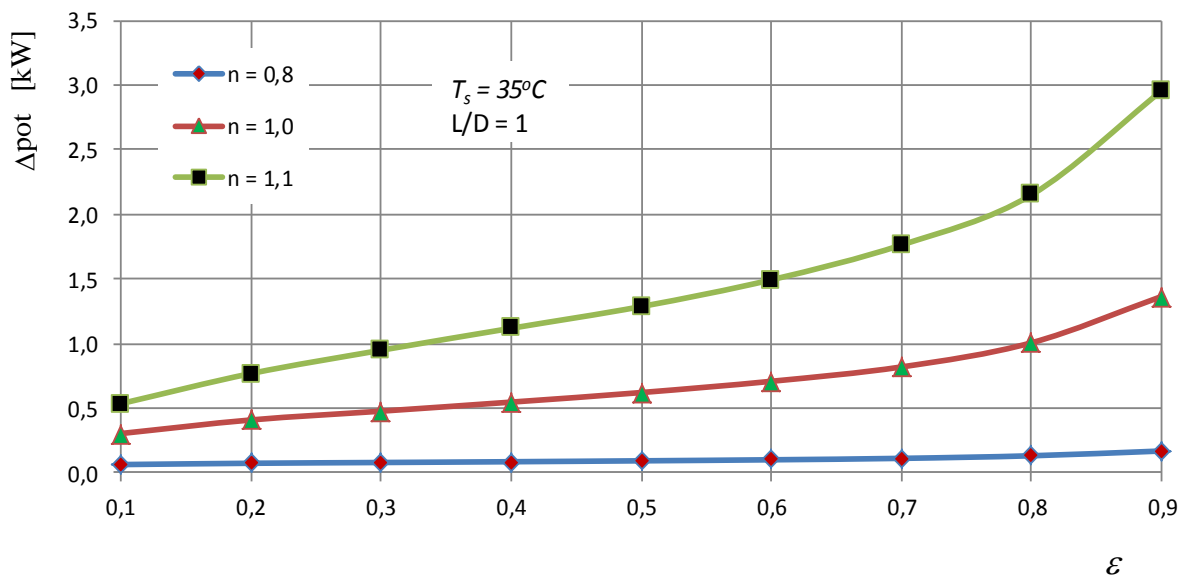


Figura 6.37 Perda de potência, ΔPot [kW], versus ε
 $N = 1500$ rpm; $c = 0,1$ mm; $T_s = 35^\circ\text{C}$

A Figura 6.38 mostra, para três folgas radiais, $c = 0,05$ mm, $0,10$ mm e $0,15$ mm, que a capacidade de carga adimensional, \bar{F} , aumenta com o aumento da excentricidade adimensional, ε , passa por um máximo em torno de $0,5$, e decresce em seguida. Observa-se também que quanto maior a folga radial c , maior a capacidade de carga adimensional do mancal.

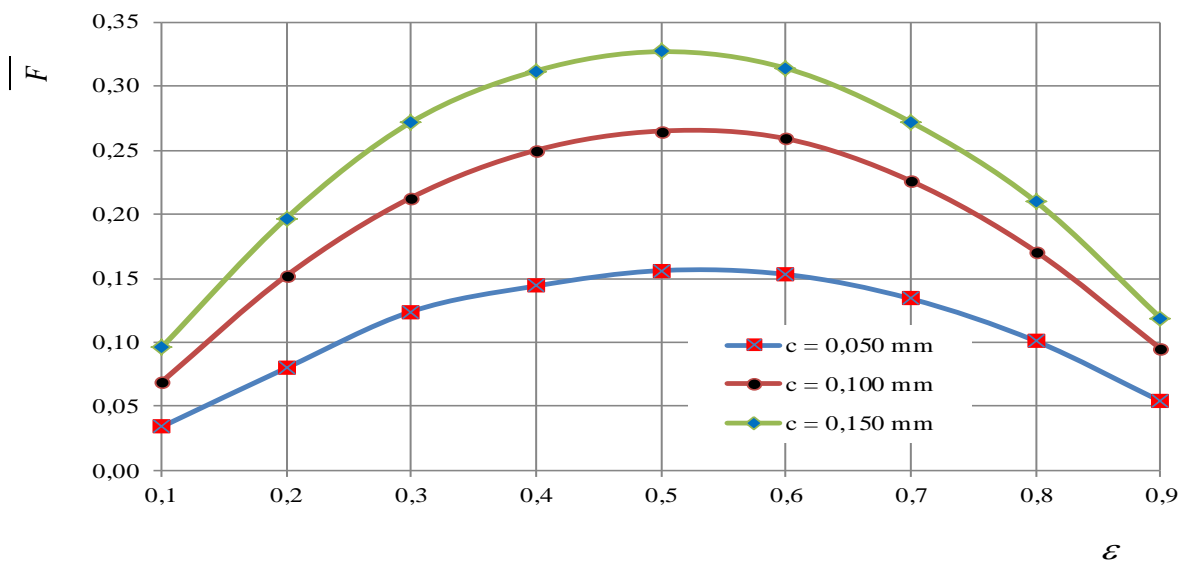


Figura 6.38 Capacidade de carga adimensional, \bar{F} , versus ε
 $N = 1500$ rpm; $L/D = 1,0$; $n = 1,0$; $T_s = 35$ °C

A Figura 6.39, obtidas para $N = 1500$ rpm, $L/D = 0,1$ mm, $T_s = 35$ °C, mostra que a capacidade de carga dimensional, F , é sempre crescente com a excentricidade. Para excentricidades maiores que $0,6$ os aumentos de F , são mais significativos. Observa-se também que quanto maior a folga radial, menor a capacidade de carga dimensional, comportamento oposto ao da capacidade de carga adimensional \bar{F} .

De maneira semelhante, as Figuras 6.40 e 6.41 mostram a variação da pressão adimensional, \bar{P}_{max} , e dimensional, P_{max} , respectivamente, para as três folgas acima. Como era de se esperar, os comportamentos são semelhantes aos das capacidades de carga.

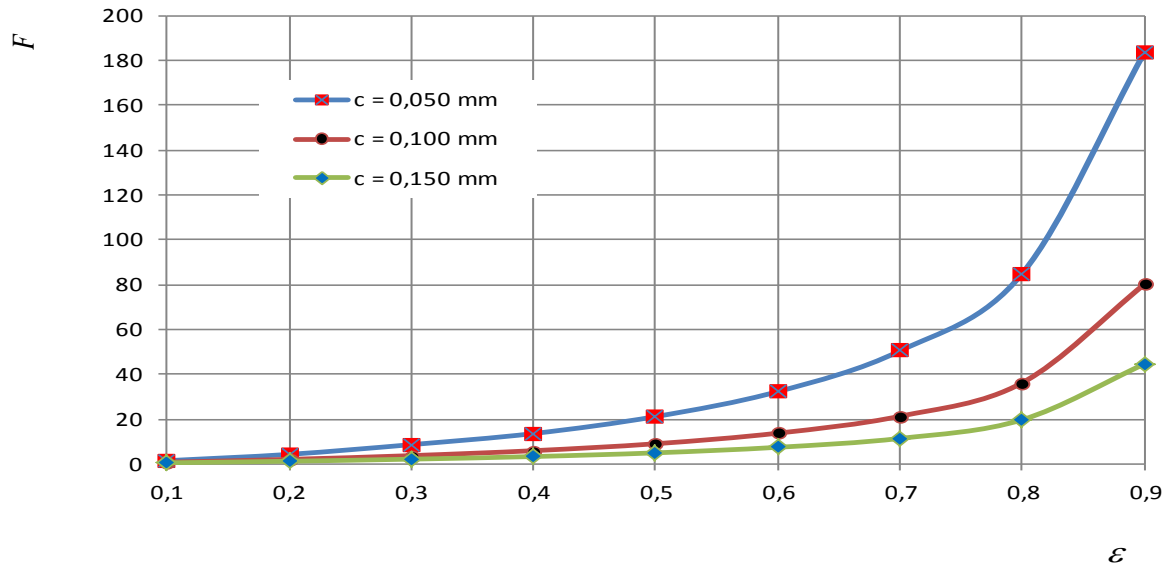


Figura 6.39 Capacidade de carga, F [kN], versus ε
 $N = 1500$ rpm; $L/D = 1,0$; $n = 1,0$; $T_s = 35$ °C

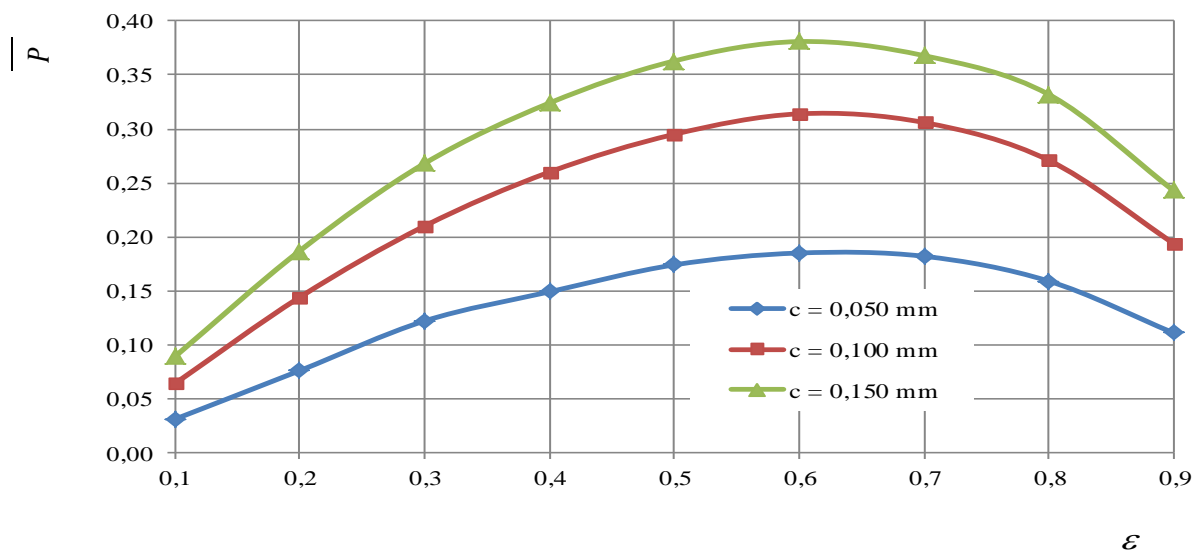


Figura 6.40 Pressão máxima adimensional, \bar{P}_{max} , versus ε
 $N = 1500$ rpm; $L/D = 1,0$; $n = 1,0$; $T_s = 35$ °C

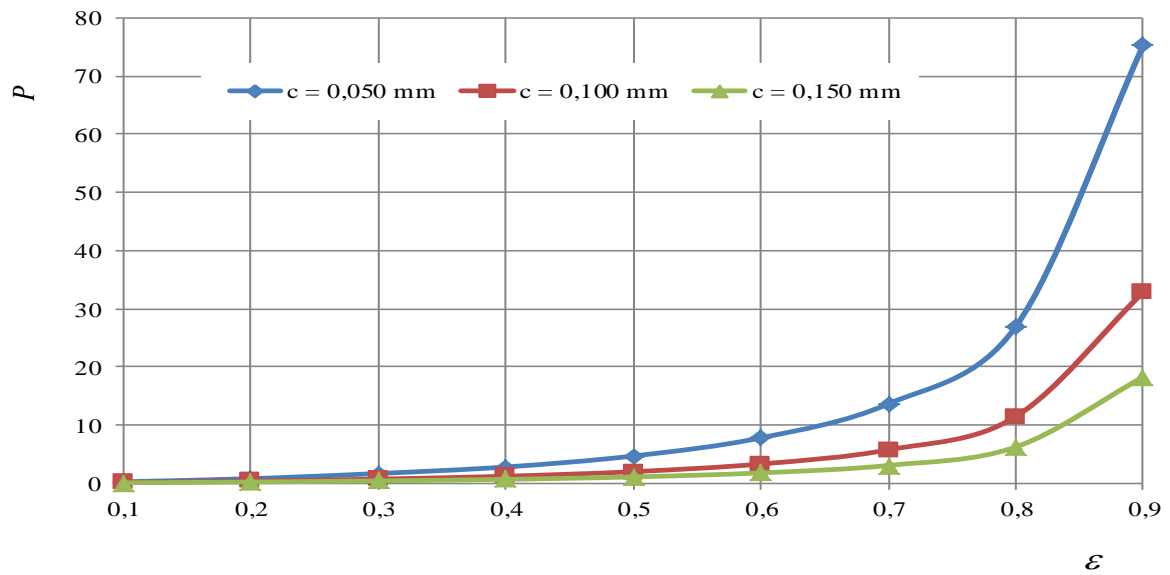


Figura 6.41 Pressão máxima, P [MPa], versus ε
 $N=1500$ rpm; $L/D=1,0$; $n=1,0$; $T_s=35$ °C

Ainda para as três folgas radiais, $c=0,05$ mm, $0,1$ mm e $0,15$ mm, as Figuras 6.42 e 6.43, mostram as forças de atrito adimensional, $\bar{F}a$, e dimensional Fa , respectivamente. Observa-se que $\bar{F}a$ é tanto maior quanto maior a folga. Por outro lado, Fa aumenta com a redução da folga radial, o que poderia levar à falsa conclusão de que seria mais conveniente construir o mancal com maior folga. Isso será discutido no Item 6.3.2.

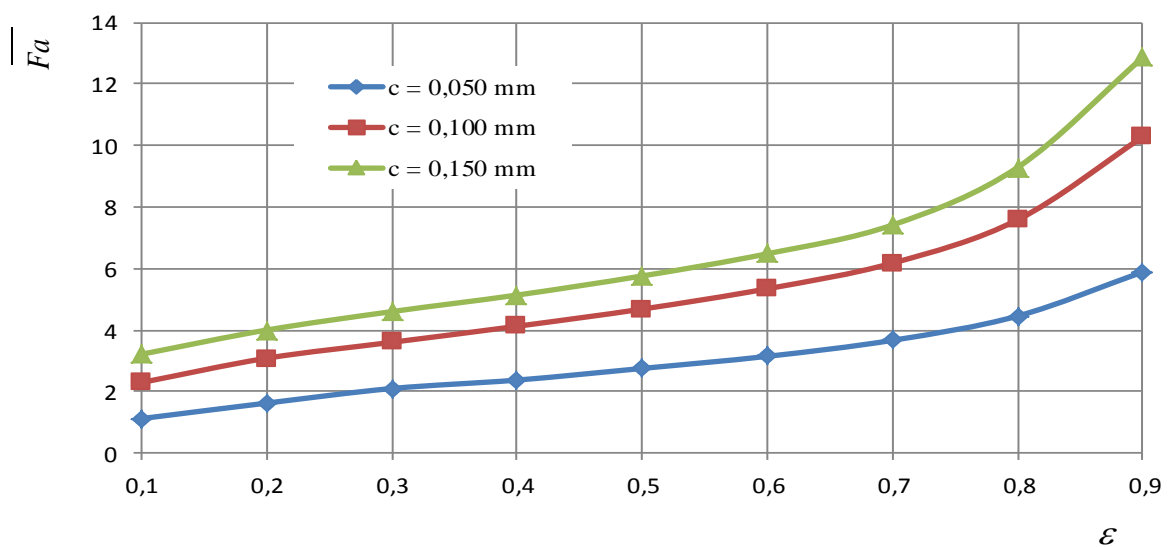


Figura 6.42 Força de atrito adimensional, $\bar{F}a$, versus ε
para $N=1500$ rpm; $L/D=1,0$; $n=1,0$; $T_s=35$ °C

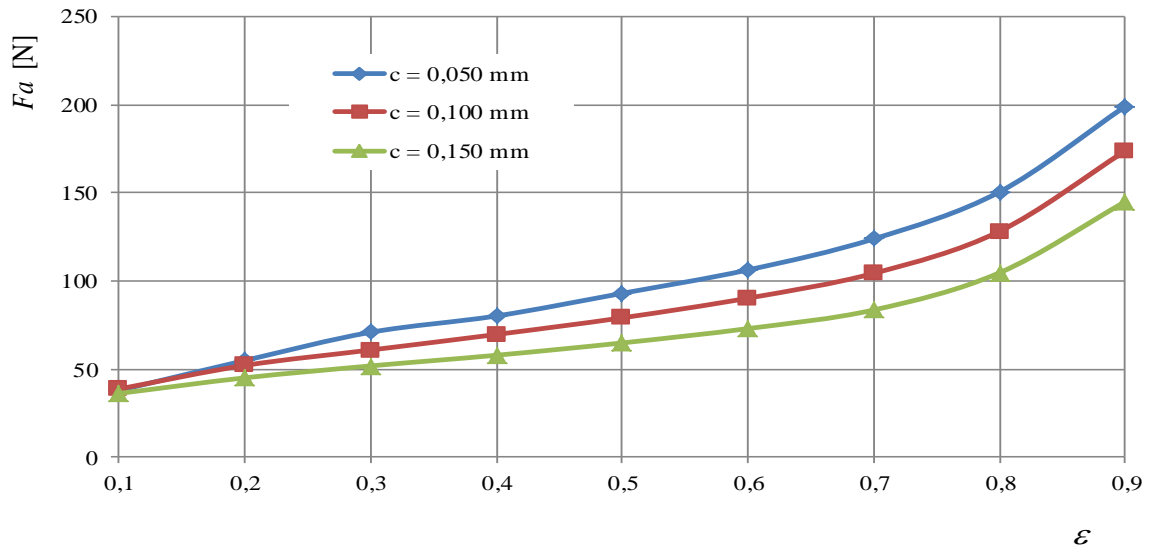


Figura 6.43 Força de atrito, F_a [N], versus ε
para $N = 1500$ rpm; $L/D = 1,0$; $n = 1,0$; $T_s = 35$ °C

A Figura 6.44 mostra que a elevação da temperatura, ΔT , é tanto maior quanto menor a folga radial do mancal, c .

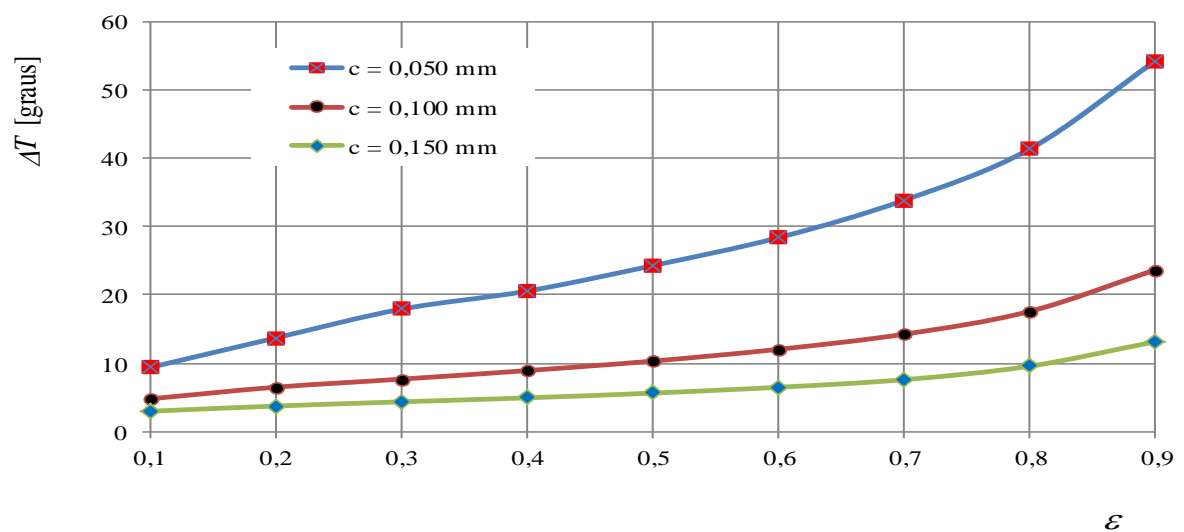


Figura 6.44 Elevação de temperatura do filme de óleo, ΔT [°C], versus ε
 $N = 1500$ rpm; $L/D = 1,0$; $n = 1,0$; $T_s = 35$ °C

A Figura 6.45 mostra que a vazão lateral, Q_L , aumenta continuamente com a excentricidade e é tanto maior quanto maior a folga radial do mancal, c .

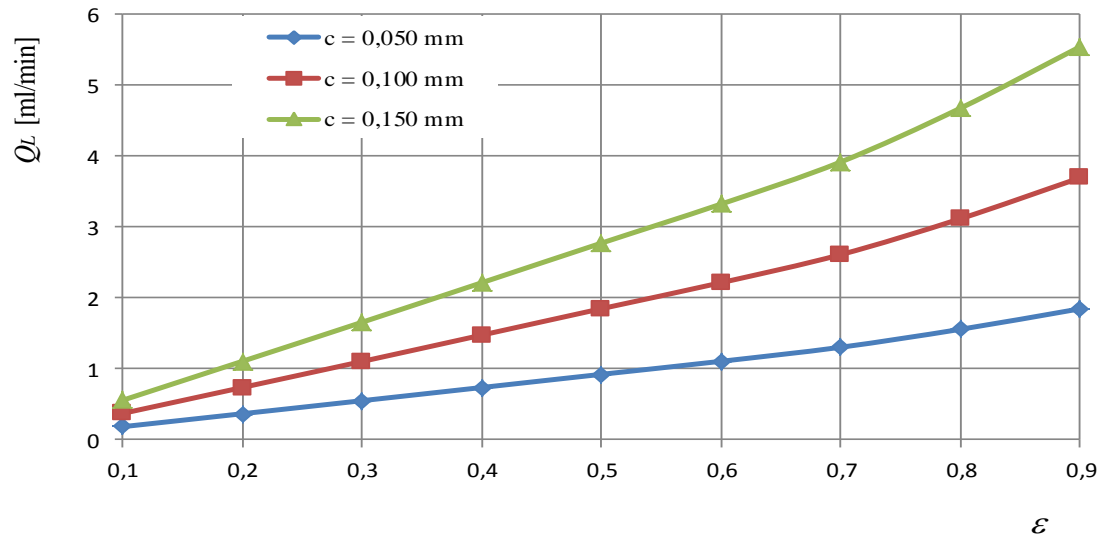


Figura 6.45 Vazão lateral, Q_L [ml/min], versus ε

$N=1500$ rpm; $L/D=1,0$; $n=1,0$; $T_s=35$ °C

Comparações entre $\bar{P} \times P$, $\bar{F} \times F$, $\bar{F}_a \times F_a$, $\mu \times \bar{m}$ são mostradas nas Figuras 6.46, 6.47, 6.48 e 6.49, para $N=1500$ rpm, $c=0,1$ mm; $L/D=1,0$; $n=1,0$.

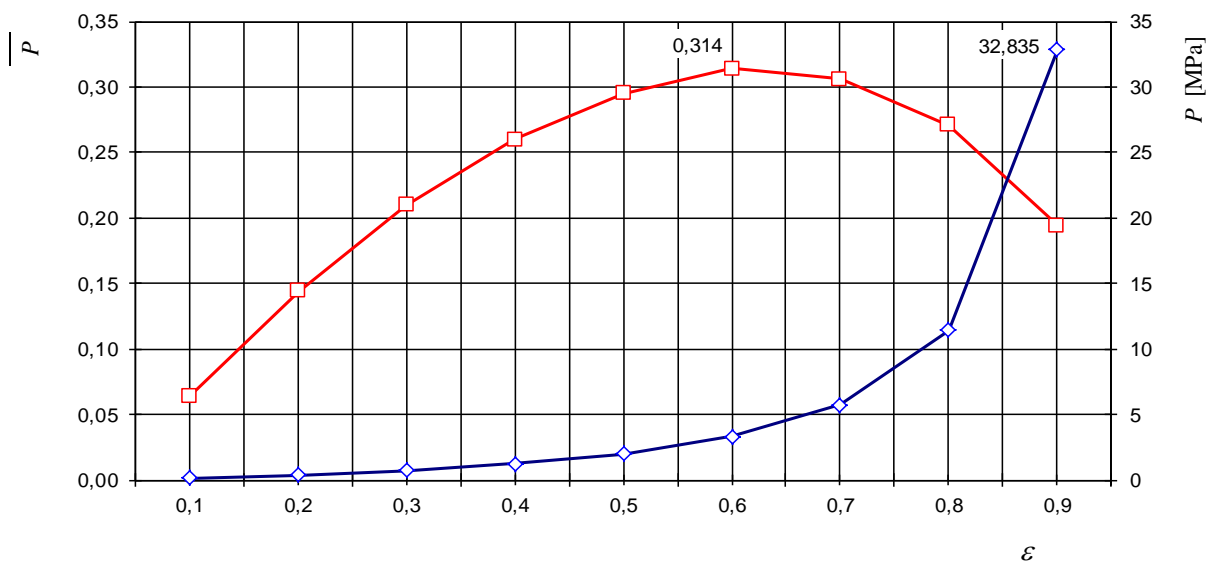


Figura 6.46 Pressão adimensional, \bar{P} , e Pressão, P [MPa], versus ε

$N=1500$ rpm; $L/D=1,0$; $n=1,0$; $c=0,1$ mm, $T_s=35$ °C

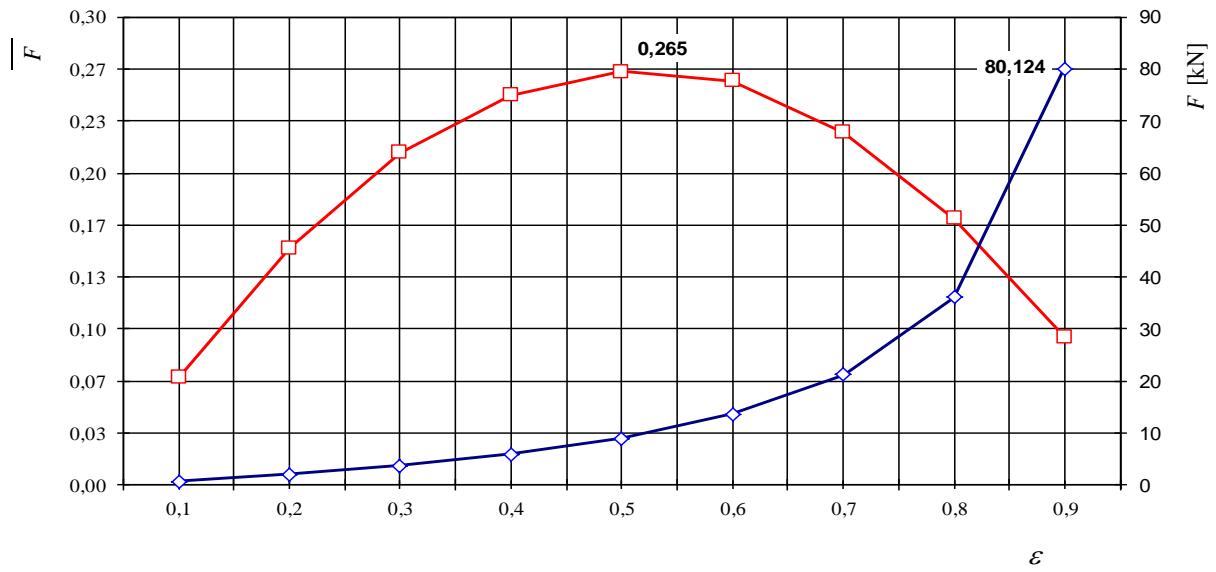


Figura 6.47 Capacidade de carga adimensional, \bar{F} , e dimensional, F , versus ε

$N = 1500$ rpm; $L/D = 1,0$; $n = 1,0$; $c = 0,1$ mm, $T_s = 35$ °C

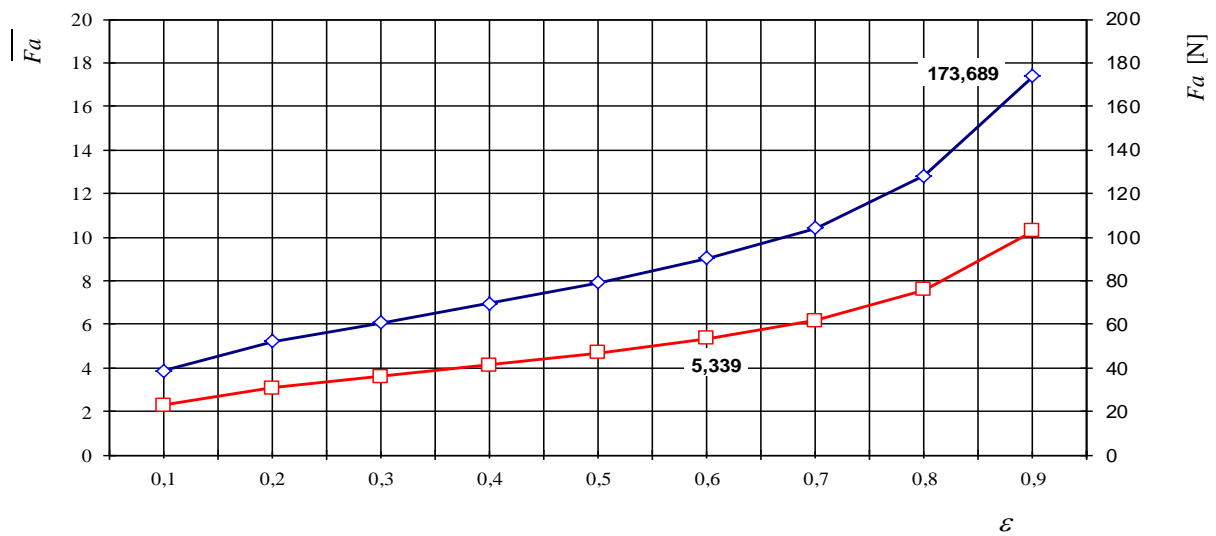


Figura 6.48 Força de atrito \bar{F}_a e F_a [N], versus ε

$N = 1500$ rpm; $L/D = 1,0$; $n = 1,0$; $c = 0,1$ mm, $T_s = 35$ °C

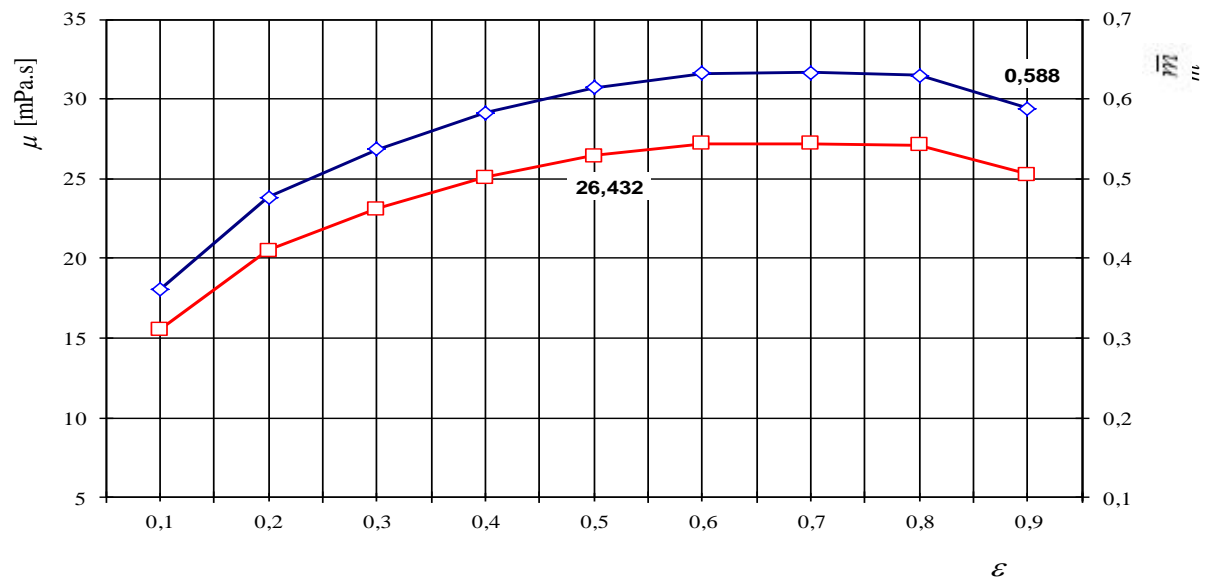


Figura 6.49 Viscosidade absoluta, μ , e absoluta adimensional, \bar{m} , versus ε

$N = 1500$ rpm; $L/D = 1,0$; $n = 1,0$; $c = 0,1$ mm, $T_s = 35$ °C

A Figura 6.50 mostra que a temperatura média, T_m , é tanto maior quanto maior a velocidade de rotação e passa por um mínimo para uma excentricidade $\varepsilon \pm 0,7$.

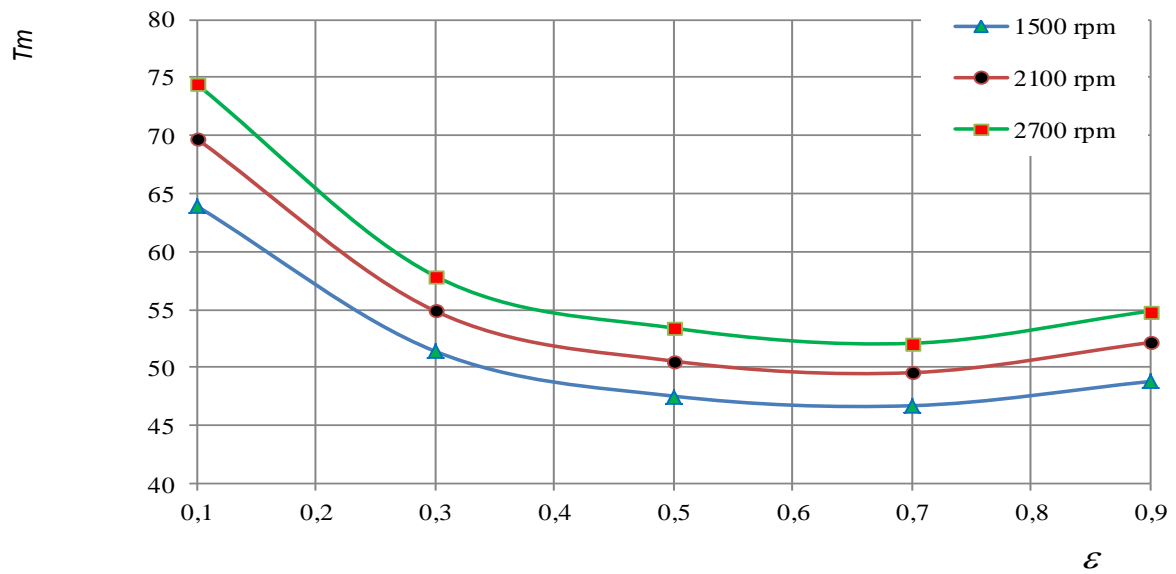


Figura 6.50 Temperatura média, T_m [°C], versus ε

$c = 0,1$ mm; $L/D = 1,0$; $n = 1,0$; e $T_s = 35$ °C

A Figura 6.51 mostra que a vazão lateral, Q_L , é tanto maior quanto maior a velocidade de rotação e aumenta continuamente com a excentricidade.

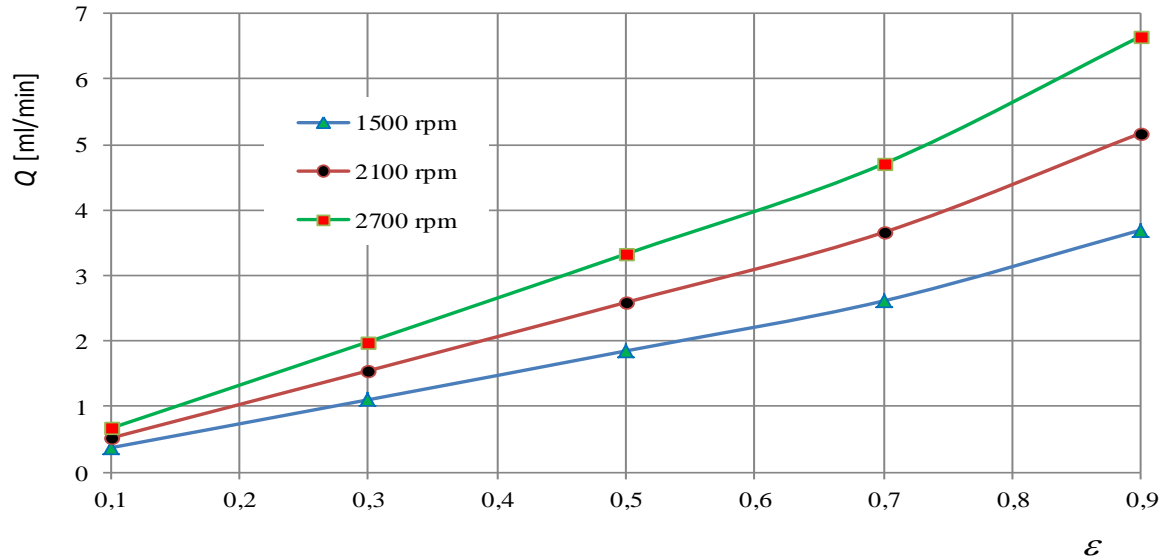


Figura 6.51 Vazão, Q_L [ml/min], versus ε
 $L/D = 1,0$; $n = 1,0$; $c = 0,1$ mm, $T_s = 35$ °C

Conforme mostrado na Figura 6.52, a força de atrito adimensional, \bar{F}_a , é tanto menor quanto maior a velocidade de rotação e aumenta continuamente com a excentricidade.

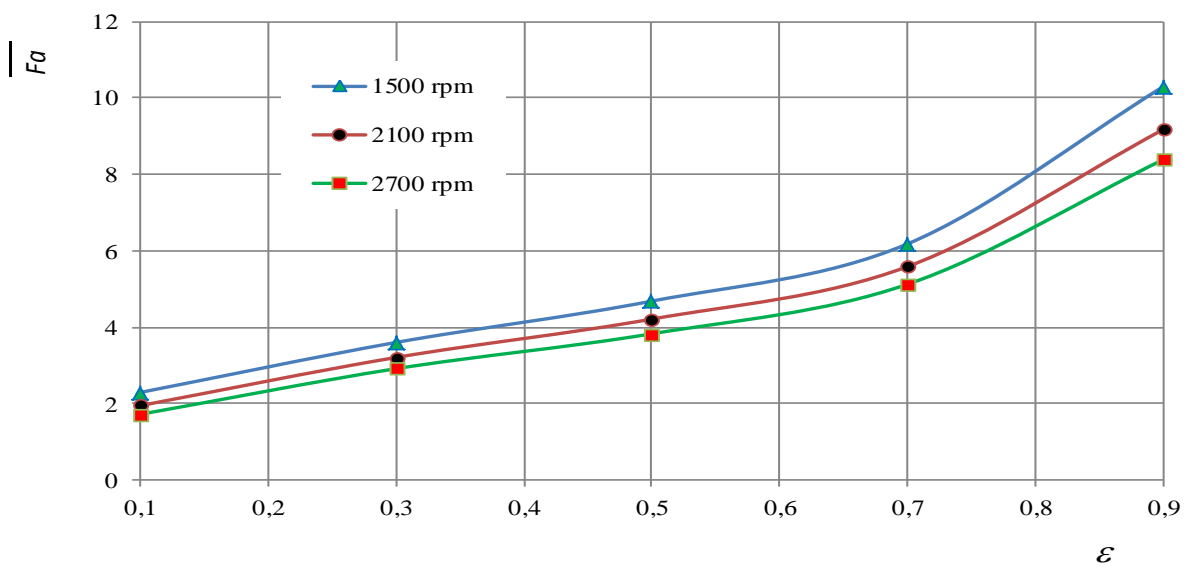


Figura 6.52 Força de atrito adimensional, \bar{F}_a , versus ε
 $c = 0,1$ mm; $L/D = 1,0$; $n = 1,0$; e temperatura de suprimento $T_s = 35$ °C

A Figura 6.53 mostra que a força de atrito, F_a , aumenta com a velocidade de rotação, comportamento inverso ao da força de atrito adimensional.

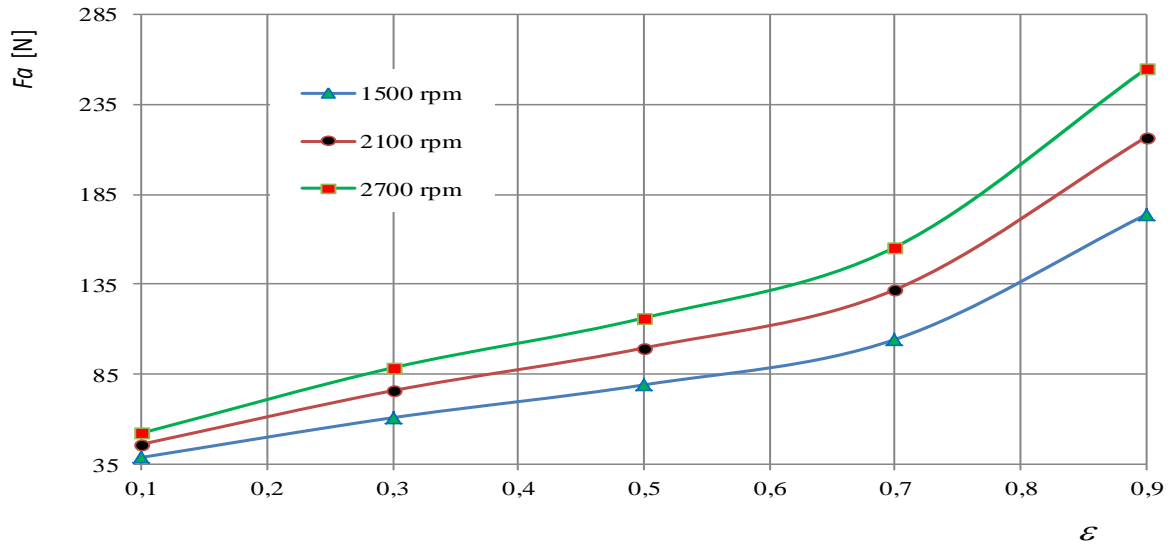


Figura 6.53 Força de atrito, F_a [N], versus ε

$c = 0,1$ mm; $L/D = 1,0$; $n = 1,0$; e temperatura de suprimento $T_s = 35^\circ\text{C}$

As Figuras 6.54 a 6.56 mostram a distribuição de pressão adimensional, \bar{P} , no plano circunferencial, para várias relações L/D e para $n=0,8$, $n=1$ e $n=1,1$, respectivamente. Pode-se observar que \bar{P} diminui com o aumento do índice de característica reológica do lubrificante.

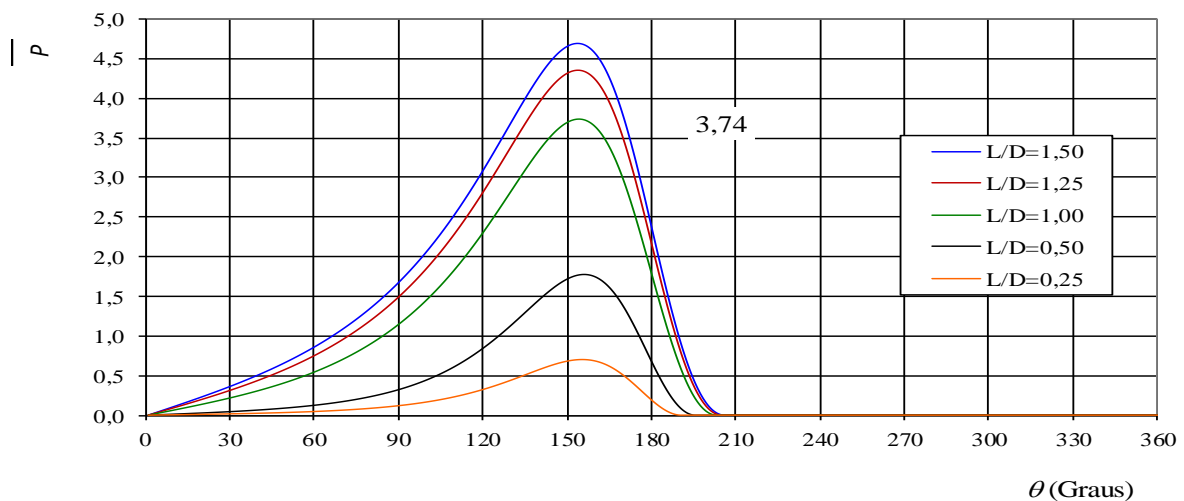


Figura 6.54 Distribuição de pressão adimensional, \bar{P} , versus posição angular, θ ,
 $N=1500$ rpm; $c = 0,1$ mm; $L/D = 1,0$; $T_s = 35^\circ\text{C}$; $n = 0,8$

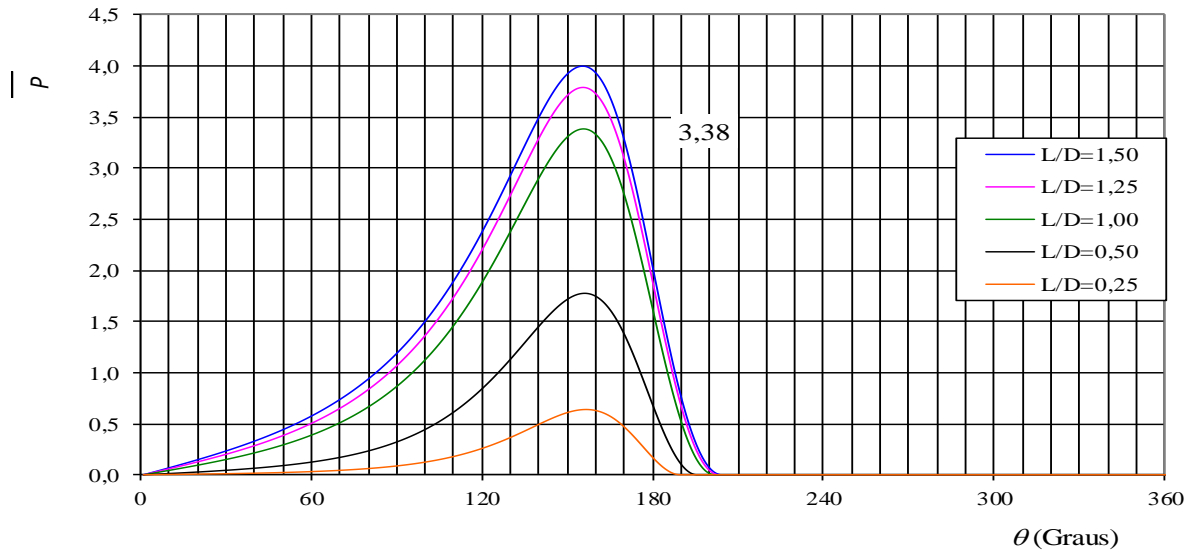


Figura 6.55 Distribuição de pressão adimensional, \bar{P} , versus posição angular, θ ,
 $N=1500$ rpm; $c=0,1$ mm; $L/D=1,0$; $T_s=35^\circ\text{C}$; $n=1,0$

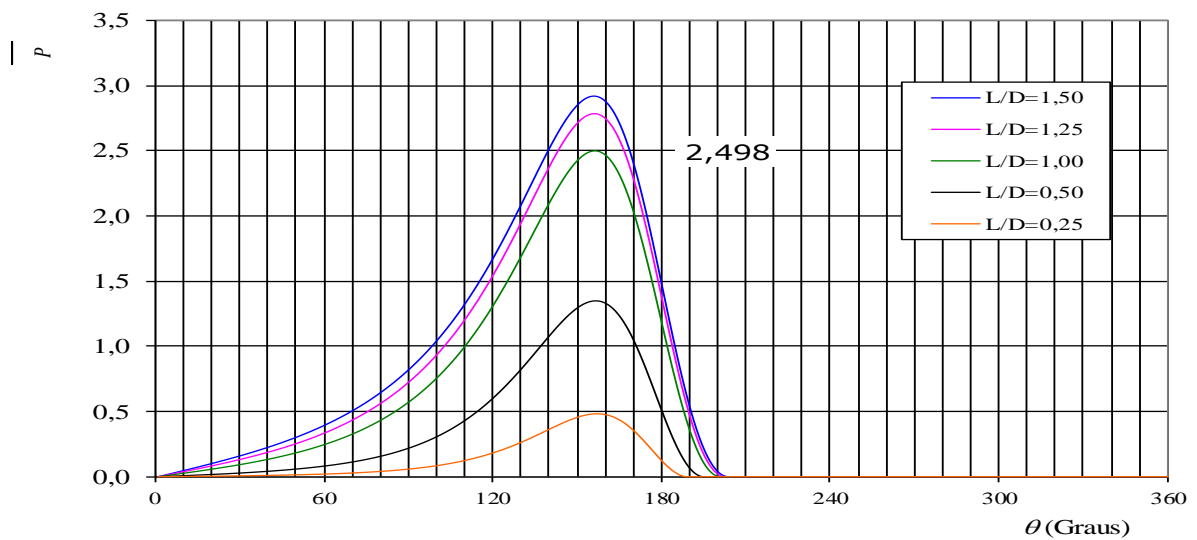


Figura 6.56 Distribuição de pressão adimensional, \bar{P} , versus posição angular, θ ,
 $N=1500$ rpm; $c=0,1$ mm; $L/D=1,0$; $T_s=35^\circ\text{C}$; $n=1,1$

Pode-se observar ainda nas Figuras 6.54, 6.55 e 6.56 que as pressões adimensionais \bar{P} são tanto maiores quanto maior a relação L/D .

A Figura 6.57 mostra a distribuição de pressões no plano axial, para um lubrificante newtoniano, $n = 1$. Convém observar a correspondência com a Figura 6.55.

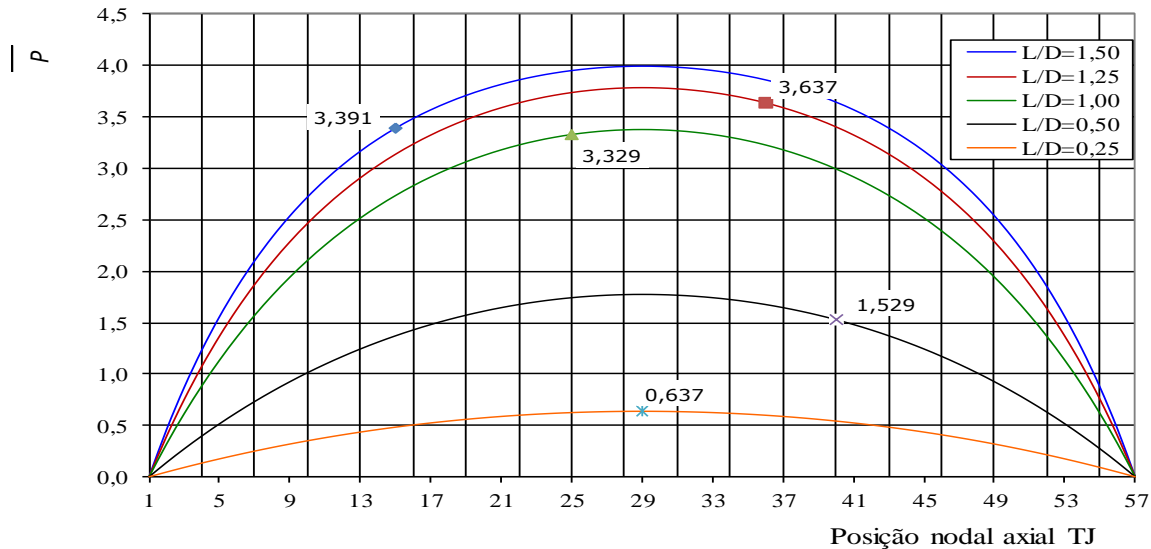


Figura 6.57 Distribuição de pressão adimensional, \bar{P} , versus posição axial, j
 $N=1500$ rpm; $c=0,1$ mm; $L/D=1,0$; $T_s=35^\circ\text{C}$; $n=1,0$

6.3.2 Análise Complementar sobre a Variação da Folga Radial do Mancal nos Parâmetros de Desempenho

Com o objetivo de analisar mais detalhadamente os efeitos da variação da folga radial, alguns parâmetros de desempenho do mancal foram calculados para três folgas e três óleos lubrificantes dados na Tabela 6.21.

Tabela 6.21 Dados técnicos do óleo lubrificante

Óleo	Viscosidade absoluta [mPa.s]		Massa específica [kg/m ³]
	T_{40}	T_{100}	
22	18,4	3,58	866
32	27,6	4,40	872
46	40,0	5,50	878

Conforme discutido anteriormente, a partir da Figura 6.38, pode-se concluir que, para uma determinada excentricidade específica, ε , um mancal com menor folga radial apresenta

maior capacidade de carga, o que seria vantajoso. No entanto, da Figura 6.42, verifica-se que uma menor folga radial implica em maior força de atrito e perda de potência, mantida a mesma excentricidade, o que seria desvantajoso.

Contudo, torna-se necessário fixar a capacidade de carga, isto é, a força aplicada ao mancal, é então determinar os demais parâmetros de comportamento, inclusive a excentricidade. Por exemplo, fixando-se $F \cong 21$ kN, foram organizadas as Tabelas 6.22, 6.23 e 6.24, para três folgas radiais e três óleos lubrificantes de diferentes viscosidades.

Tabela 6.22 Parâmetros de comportamento do mancal para três folgas radiais
 $F \cong 21$ kN, $N = 1500$ rpm, $T_s = 35^\circ\text{C}$, $L/D = 1$, $n = 1$, óleo ISO 22.

c [mm]	ε	F [kN]	Fa [N]	ΔPot [kW]	T_m [°C]	m [mPa.s]	Q_L [ml/min]	S	ϕ [graus]	h_0 [μm]
0,050	0,590	21,2	72,6	0,57	54,0	11,1	1,10	0,130	50,7	20
0,075	0,710	20,7	75,5	0,60	44,0	14,6	2,00	0,078	42,1	22
0,100	0,785	20,7	76,2	0,60	42,5	16,7	2,96	0,050	36,8	22

Tabela 6.23 Parâmetros de comportamento do mancal para três folgas radiais
 $F \cong 21$ kN, $N = 1500$ rpm, $T_s = 35^\circ\text{C}$, $L/D = 1$, $n = 1$, óleo ISO 32.

c [mm]	ε	F [kN]	Fa [N]	ΔPot [kW]	T_m [°C]	m [mPa.s]	Q_L [ml/min]	S	ϕ [graus]	h_0 [μm]
0,050	0,54	21,0	81,4	0,64	58,8	13,1	1,0	0,156	54,0	23
0,075	0,655	21,1	89,0	0,70	49,2	18,7	1,8	0,098	46,5	26
0,100	0,740	21,5	91,8	0,70	45,0	22,2	2,7	0,065	40,5	26

Tabela 6.24 Parâmetros de comportamento do mancal para três folgas radiais
 $F \cong 21$ kN, $N = 1500$ rpm, $T_s = 35^\circ\text{C}$, $L/D = 1$, $n = 1$, óleo ISO 46.

c [mm]	ε	F [kN]	Fa [N]	ΔPot [kW]	T_m [°C]	m [mPa.s]	Q_L [ml/min]	S	ϕ [graus]	h_0 [μm]
0,050	0,515	21,4	93,3	0,73	62,9	15,4	0,97	0,180	55,2	24
0,075	0,610	21,0	102,0	0,80	52,5	22,8	1,70	0,121	49,3	29
0,100	0,690	21,1	108,5	0,85	47,0	28,9	2,61	0,085	43,8	31

Para cada um dos três óleos, pode-se observar que quanto menor a folga radial do mancal resultam menores valores de força de atrito, Fa , de perda de potência, ΔPot , e de vazão lateral do óleo, Q_L . Isso é vantajoso, desde que não haja qualquer possibilidade de ocorrer contato metálico entre as superfícies do munhão e do mancal. Mesmo com a utilização do óleo de menor viscosidade, ISO 22, resultou espessura mínima $h_0 = 20$ μm, no mínimo vinte e cinco vezes a rugosidade superficial de 0,4 a 0,8 μm, típica de mancais de motores elétricos, geradores e máquinas similares.

Aumentando-se a força radial aplicada para $F = 42$ kN, com a utilização do óleo ISO 22 e folga radial $c = 0,05$ mm, resultaria uma espessura mínima, $h_0 = 13$ μm , suficiente para evitar o contato metálico entre as superfícies do munhão e do mancal. Nesse caso, resultariam os seguintes parâmetros de comportamento: $\varepsilon = 0,74$, $Fa = 90$ N, $\Delta P_{ot} = 0,7$ kW, $T_m = 54,6^\circ\text{C}$, $m = 10,9$ mPa.s, $Q_L = 1,37$ ml/min, $S = 0,065$, $\phi = 40,5^\circ$, e $h_0 = 13$ μm .

A Figura 6.58 mostra a distribuição de pressão adimensional do mancal limão juntamente com a variação da espessura adimensional, para os seguintes dados de entrada: excentricidade específica, $\varepsilon = 0,2$; índice de característica reológica, $n = 1,0$; relação $L/D = 0,50$; folga radial $c = 0,1$ mm; rotação, $N = 1500$ rpm; ângulo de atitude, $\phi = 51^\circ$; fator de pré-carga $a/c = 0,2$, utilizando-se uma malha com 361 por 61 nós (sentido radial x axial).

Observa-se a pequena intensidade da distribuição de pressão no lóbulo 2. Foram calculados, além das pressões, os seguintes parâmetros de apoio: $\alpha = 64,50$; $\beta = 25,50$; $\varepsilon_1 = 0,36$; $\varepsilon_2 = 0,17$; e número de Sommerfeld, $S = 1,63$.

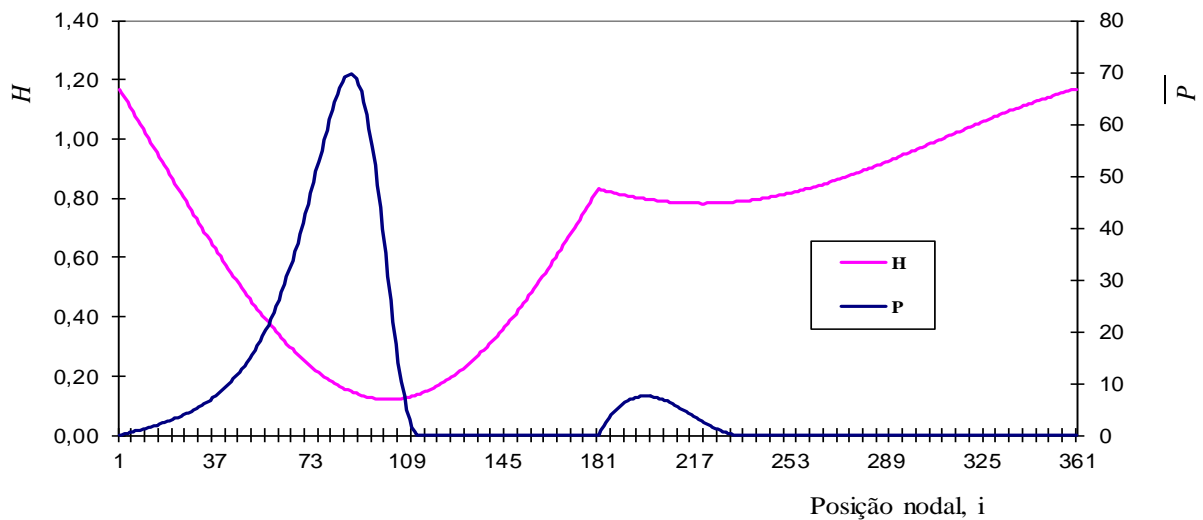


Figura 6.58 Espessura adimensional H e distribuição de pressão \bar{P} versus posição nodal

A Figura 6.59 mostra a distribuição de pressões adimensional do mancal limão, para os três tipos de fluidos: não-newtoniano do tipo pseudoplástico ($n < 1$) e dilatante ($n > 1$), bem como de um óleo mineral comum, lubrificante newtoniano ($n = 1$).

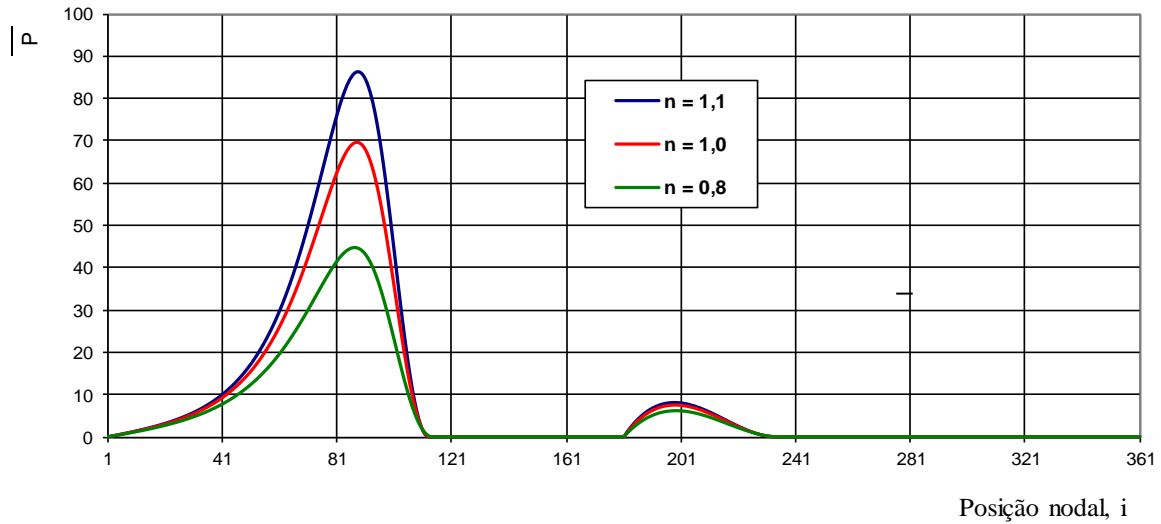


Figura 6.59 Distribuição de Pressão \bar{P}
para lubrificante pseudoplástico, newtoniano e dilatante.

Capítulo 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÕES

Pode-se concluir que o índice de característica reológica do óleo lubrificante tem grande influência sobre o comportamento operacional de um mancal radial hidrodinâmico.

Os lubrificantes não-newtonianos do tipo pseudoplástico ($n < 1$) apresentam maior capacidade de carga adimensional, e menor temperatura efetiva. Por outro lado, os lubrificantes não-newtonianos do tipo dilatante ($n > 1$) conferem maior capacidade de carga ao mancal.

Conclui-se ainda, através de alguns dos gráficos apresentados, que a faixa ideal de trabalho do mancal corresponde às condições de excentricidade específica variando entre 0,5 e 0,7, uma vez que nesta faixa a temperatura efetiva do filme de óleo é mínima, principalmente para os óleos lubrificantes newtonianos e não-newtonianos do tipo dilatante.

Especificamente para o caso do mancal limão foram desenvolvidas equações simplificadas para determinação da espessura do filme de óleo nos dois lóbulos do mancal. Isto possibilitou obter a solução da equação bidimensional de Reynolds, mediante aplicação do método de diferenças finitas, obtendo-se então a distribuição de pressão em ambos os lóbulos e alguns parâmetros de desempenho do mancal.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando que a maioria dos óleos lubrificantes comerciais possui aditivos para atender determinadas exigências de aplicação e que, portanto, exibem um comportamento reológico não-newtoniano, nem sempre especificado em seus dados técnicos, o presente trabalho sugere que se avalie e considere, sempre que possível, o comportamento reológico do óleo lubrificante a ser utilizado em aplicações ou em simulações teóricas do comportamento operacional de mancais.

Com relação à modelagem teórica e simulação computacional do comportamento operacional de mancais radiais hidrodinâmicos, o presente trabalho sugere as seguintes considerações para trabalhos futuros:

- Considerar na modelagem teórica e computacional a variação tridimensional da temperatura do filme de óleo lubrificante além dos efeitos não-newtonianos. Para tanto, é necessário resolver a equação modificada de Reynolds para fluidos não-newtonianos, modelo exponencial, acoplada à equação da energia para o filme fluido (domínio fluido) e para o eixo e a bucha (domínio sólido);
- Adaptar o programa computacional, de tal forma que seja dado inicialmente, como dado de entrada, a força radial aplicada ao mancal. Deverá resultar uma excentricidade específica, ε , correspondente, como dado de saída;
- Analisar os efeitos da lubrificação hidrodinâmica, com lubrificantes não-newtonianos sobre o comportamento dinâmico do mancal;
- Analisar os efeitos da presença de desalinhamento no mancal, parâmetro este sempre presente na prática;
- Utilizar parâmetros de adimensionalização para as variáveis do problema de tal forma que se tenha uma tendência semelhante para os parâmetros adimensionais e os parâmetros dimensionais, a fim de facilitar a análise do comportamento operacional do mancal.
- Desenvolver a metodologia toda, para o caso do mancal de dois lóbulos, iniciada no Capítulo 5.

- Desenvolver um modelo teórico para análise do comportamento operacional de um mancal de dois lóbulos, através de análise tridimensional por dinâmica dos fluídos computacional (3-D DFC), utilizando o software FLUENT.
- Montar um banco de ensaios para validação real dos resultados.

7.3 CONTRIBUIÇÕES DO PRESENTE TRABALHO

De um ponto de vista bem específico, as seguintes contribuições do presente trabalho podem ser destacadas:

- Apresentação dos resultados não só na forma adimensional, como é de praxe na literatura, mas também na forma dimensional. Verificou-se que vários parâmetros dimensionais têm comportamento oposto ao dos parâmetros adimensionais. Portanto, a análise pura e simples dos parâmetros adimensionais pode levar o leitor a conclusões errôneas para o projeto e uso do mancal;
- Desenvolvimento de equações exatas e aproximadas para o mancal limão.

Capítulo 8

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barnes, H. A., Hutton, J. F. and K. Walters, F. R. S., An Introduction to Rheology. In Elsevier Science Publishers B. V., 1993.

Cameron, A., 1966, The principles of lubrication, London, Longmans Press.

Cardullo, F. E., Some practical deductions from the theory of lubrication of short cylindrical bearings. Trans. ASME, Vol. 52, pp. 143-53, 1930.

Castro Lima, A. E. de, Raimundo, M. R., Silva, P. F., Schwarz, V. A., , 2011, Simulação do comportamento operacional de mancais radiais hidrodinâmicos operando com lubrificantes não-newtonianos, CIBEM 10, Porto, Portugal.

Dowson, D. et al., An experimental investigation of the thermal equilibrium of steadily load journal bearings, Proc. Instn. of Mech. Engrs., 181, Pt 3 B, pp. 70-80, 1966.

Dien, I.K. and Elrod, H.G., A generalized steady-state Reynolds equation for non-newtonian fluids, with application to journal bearings. J. Lubr. Technol., Trans. ASME, Vol. 105, pp. 385-390, 1983.

Dubois, G. B. & Ocvirck, F. W., Analytical derivation and experimental evaluation of short

bearing approximation of full journal bearings, NACA Rep. 1157, 1953.

Faria, M. T. C. and Correia, F. A. G., Static and dynamic behaviour of oil-lubricated cylindrical and elliptical journal bearings, 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering, 2011.

Frêne, J., Paliers hydrodynamiques, B 671, pp. 1- 12, B 671,1 pp 1-4, Techniques de l'ingenieur, 1982.

Gero, L. R., Ettles, C. M. McC., An evaluation of finite element methods for the solution of the Reynolds equation, Trans. ASLE, Vol. 29, 2, pp. 166-72, 1986.

Gertzos, K. P., Nikolakopoulos, P. G., Papadopoulos, C. A., CFD analysis of journal bearing hydrodynamic lubrication by Bingham lubricant, Tribology International 41, p. 1190-1204, 2008.

Kasai, M., Fillon, M., Bouyer, J., Jarny, S., Influence of lubricants on plain bearing performance: Evaluation of bearing performance with polymer-containing oils, Tribology International, Elsevier Science Publishers, p. 190 – 199, 2012.

Lloyd, T., McCallion, H, Recent developments in fluid film lubrication theory. Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 182, Pt. 3A, p. 36-50, 1967-68.

Miyazima, A. T., Solução analítica e numérica da equação de Reynolds para mancal radial de deslizamento hidrodinâmico, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 1989.

Pinkus, O., Analysis of elliptical bearings, Trans. ASME, Vol. 78, pp. 965-973, 1956.

Pinkus, O., and Sternlicht, B., Theory of hydrodynamic lubrication, McGraw-Hill, 1961.

Prashad, H., The effects of viscosity and clearance on the performance of hydrodynamic journal bearings. Trans. ASLE, Vol. 31, 1, pp. 113-19, 1988.

Raimondi, A. A., and Boyd, J., A Solution for the finite journal bearing and its application to analysis and design, Part 1, 2 and 3, Trans. ASLE, Vol. 1, pp. 159-209, 1958.

- Reynolds, O., On the Theory of Lubrication and its Application to Mr. Beauchamp Tower's experiments, including an experimental determination of the viscosity of olive oil, Philosophical Trans. of the Royal Society, series A, vol. 177, pp. 157-234, 1886.
- Sassenfeld, H. and Walther, A., Journal bearing calculations, VDI Forschungsherft 411, ausgabe B, Band 20, 1954.
- Silva, P. F., Análise Preditiva do Comportamento Operacional de Mancais Radiais de deslizamento, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá., 1993.
- Silva, P. F., Dias, J. C., Schwarz, V. A. and Neves, M. T., Study rheological effects on the lubrication of infinitely-wide slider bearings, SAE International, 2001.
- Singh, Ajeet, and Gupta, B. K., Stability limits of elliptical journal bearings supporting flexible rotors, Wear, Vol. 77, pp. 159-170, 1982.
- Stachowiak, G. W., Batchelor, A. W., Engineering Tribology, Ed. Elsevier Butterworth - Heinemann, 3rd edition, 801 p., 2005.
- Sfyris, D., Chasalevris, A., An exact analytical solution of the Reynolds equation for the finite journal bearing lubrication, Tribology International, Elsevier Science Publishers, vol. 55, pp. 46-58, 2012.
- Tonnesen, J., and Hansen, P. K., Some experiments on the steady-state characteristics of a cylindrical fluid-film bearing considering thermal effects, Trans. ASME, journal of lubrication technology, vol. 103, pp. 7-14, 1981.
- Tower, B., 1st Report on friction experiments, Proc. Inst. Mech. Eng., vol. 161, pp. 59-69, 1883.
- Wada, S. and Hayashi, H., Hydrodynamic lubrication of journal bearings by pseudoplastic lubricants, Bull. JSME, Vol. 14, pp. 268-278 and 279-286, 1971.
- Wada, S. and Hayashi, H., Hydrodynamic Lubrication of Journal Bearings by Pseudoplastic Lubricants, Bulletin JSME, Vol. 17, pp. 967-974, 1974.

Wada, S., Hayashi H. e Haga K., Behaviour of Bingham solid in hydrodynamic lubrication. Part 1, general theory. Bulletin of the JSME, vol. 16: n^o. 92, pp. 422-431, 1973.

Wada, S., Hayashi H. e Haga K., Behaviour of Bingham solid in hydrodynamic lubrication. Part 3, application to journal bearing. Bulletin of the JSME, vol. 17: n^o. 111, pp. 1182-1191, 1974.

APÊNDICE A

CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS PRINCIPAIS DOS FLUÍDOS LUBRIFICANTES

Reologia é a ciência do escoamento e da deformação. Estuda as propriedades mecânicas dos gases, líquidos, plásticos, substâncias asfálticas e materiais cristalinos. Assim, por uma parte, o campo da reologia se estende desde a mecânica dos fluidos newtonianos, até a lei da elasticidade de Hooke, por outra. A região intermediária entre as mesmas corresponde à deformação e escoamento de todos os tipos de materiais pastosos e suspensões.

Um fluido é qualquer material que submetido à ação de uma força ou tensão de cisalhamento estará sujeito a uma deformação contínua. A resistência interna à deformação ou escoamento é definida como a viscosidade do fluido. Portanto, em função da relação tensão de cisalhamento versus taxa de deformação, os fluidos podem ser classificados da seguinte forma:

- a) Fluido newtoniano: é caracterizado por apresentar uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação;
- b) Fluido não-newtoniano: apresenta uma relação não linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação.

A água e a maioria dos óleos minerais comuns são exemplos de fluidos newtonianos. Os fluidos não-newtonianos compreendem os óleos minerais com adição de polímeros aumentadores do índice de viscosidade (Kasai et al., 2012), as graxas, os lubrificantes sintéticos, etc.

Várias equações empíricas têm sido propostas para representar as relações entre a tensão de cisalhamento, τ , e a taxa de deformação, $\partial u/\partial y$, para os fluidos não-newtonianos. Entre os modelos reológicos usados na lubrificação de mancais que operam com lubrificantes não-newtonianos, o modelo de Ostwald-de-Waele ou modelo power law tem sido bastante utilizado, pois apresenta uma boa aproximação para a relação tensão de cisalhamento versus taxa de deformação. A tensão de cisalhamento, τ , e a viscosidade aparente, μ , para um fluido não-newtoniano modelo power law, são expressas respectivamente por:

$$\tau = m \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right\}^{\frac{n-1}{2}} = m \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|^{n-1} \frac{\partial u}{\partial y} \quad (\text{A.1})$$

$$\mu = m \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|^{n-1}, \quad (\text{A.2})$$

sendo:

m [Pa.sⁿ] a viscosidade absoluta ou pseudoplástica do fluido, segundo Dien e Elrod (1983);

n é o índice de característica reológica do fluido;

μ [Pa.s] a viscosidade aparente do fluido.

A viscosidade absoluta, m , não depende da taxa de deformação. Para o caso de um fluido newtoniano ($n = 1$) a equação (A.1) recai na lei da viscosidade de Newton, de modo que resulta $m = \mu$, a partir da Equação (A.2).

Os lubrificantes não-newtonianos, modelo power law, podem ser classificados em:

- Pseudoplásticos (shear thinning): a viscosidade diminui com o aumento da taxa de deformação (tornam-se finos com a aplicação da tensão de cisalhamento). São caracterizados pelo índice de característica reológica $n < 1$;

- Dilatantes (shear thickening): a viscosidade aumenta com o aumento da taxa de deformação (tornam-se espessos com a aplicação da tensão de cisalhamento). São caracterizados pelo índice de característica reológica $n > 1$;

Além do modelo *power law* outros modelos reológicos foram estabelecidos para descrever o comportamento dos fluidos não-newtonianos. Um exemplo é citado a seguir.

- Modelo de Bingham Generalizado – Viscopoplástico

O chamado plástico de Bingham comporta-se como sólido até que seja excedido um valor de tensão de cisalhamento, τ_e , e a partir da qual se inicia o escoamento de um fluido newtoniano viscoso de viscosidade μ_p , de acordo com a seguinte equação:

$$\tau - \tau_e = m \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|^{n-1} \frac{\partial u}{\partial y} \quad (\text{A.3})$$

Conforme Wada et al. (1974), uma graxa lubrificante apresenta um comportamento equivalente a um sólido de Bingham.

A Figura A.1 mostra a relação tensão de cisalhamento versus taxa de deformação para os fluidos descritos anteriormente.

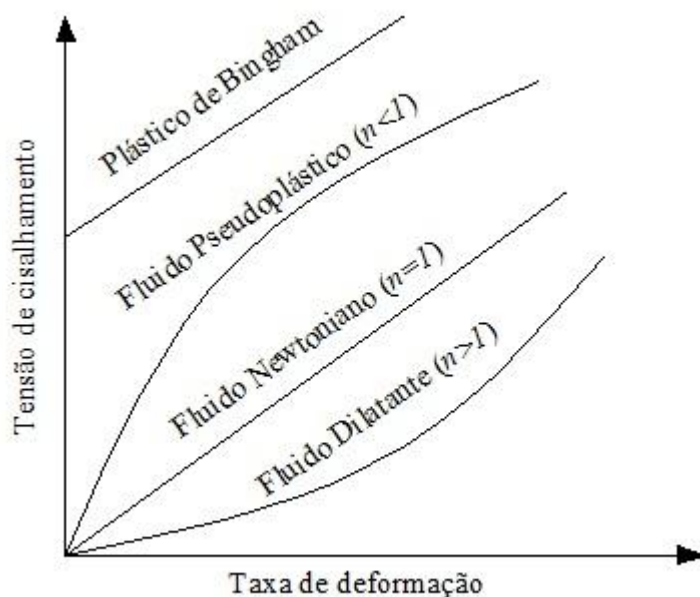


Figura A.1 Tensão de cisalhamento τ versus taxa de deformação $\partial u/\partial y$

Fonte com adaptações http://pt.wikipedia.org/wiki/Fluido_n%C3%A3o_newtoniano

Viscosidade

A viscosidade representa o atrito interno de um fluido, ou seja, a resistência à taxa de deformação ou ao escoamento. A viscosidade de um lubrificante fluido diminui com o aumento da temperatura. As variações de temperatura podem ser causadas por variações de temperatura do ambiente externo ou pelo calor gerado através do atrito viscoso.

Várias formas aproximadas para expressar a dependência da viscosidade de um lubrificante com a temperatura estão disponíveis na literatura, tais como:

Equação de Vogel,

$$m = m_0 e^{\frac{b}{(T+\theta)}}, \quad (\text{A.4})$$

sendo

m_0 é a viscosidade dinâmica do óleo lubrificante à temperatura de referência T_0 ,
 b e θ são constantes que dependem do óleo lubrificante utilizado.

Equação geral de Walther (ASTM),

$$m = \left[-0,6 + 10^E \right]; \quad E = 10^{(K_A \log T + K_B)} \quad (\text{A.5})$$

ou

$$\log \left[\log (m + 0,6) \right] = K_A \log T + K_B, \quad (\text{A.6})$$

sendo

m [mPa.s] é a viscosidade dinâmica do óleo lubrificante à temperatura absoluta, T ; K_A e K_B são constantes específicas de cada óleo lubrificante.

Determinando-se a viscosidade de certo óleo a duas temperaturas absolutas, $T_1=313,15\text{K}$ (40°C) e $T_2=373,15\text{K}$ (100°C), por exemplo, e substituindo-se os pares m_1, T_1 e m_2, T_2 na Equação (A.6), obtêm-se duas equações a duas incógnitas K_A e K_B , como segue:

$$\log \left[\log (m_1 + 0,6) \right] = K_A \log T_1 + K_B, \quad (\text{A.7})$$

$$\log \left[\log (m_2 + 0,6) \right] = K_A \log T_2 + K_B, \quad (\text{A.8})$$

Resolvendo-se esse sistema de duas equações, aplicando-se propriedades dos logaritmos, obtêm-se:

$$K_A = \log \left[\frac{\log (m_1 + 0,6)}{\log (m_2 + 0,6)} \right] / \log \left(\frac{T_1}{T_2} \right), \quad (\text{A.9})$$

e

$$K_B = \log (\log (m_1 + 0,6)) - K_A \log T_1 \quad (\text{A.10})$$

Tanto a equação de Vogel como a de Walther apresentam bons resultados para uma faixa relativamente ampla de temperaturas, principalmente na faixa de 40°C a 100°C .

Comumente, alguns componentes químicos são adicionados aos lubrificantes para melhorar suas características. Estes componentes químicos são denominados aditivos, como é o caso dos aditivos para aumentar o índice de viscosidade, que resultam em uma menor variação da viscosidade do lubrificante com a temperatura. São geralmente polímeros orgânicos de alto peso molecular, solúveis em óleo (Kasai et al. 2012). A Figura A.2 ilustra o comportamento da viscosidade versus temperatura para três óleos diferentes.

Além de analisar os efeitos térmicos no comportamento operacional de um mancal radial hidrodinâmico, no presente trabalho analisam-se também os efeitos da utilização de lubrificantes não-newtonianos, onde a viscosidade varia com a taxa de deformação.

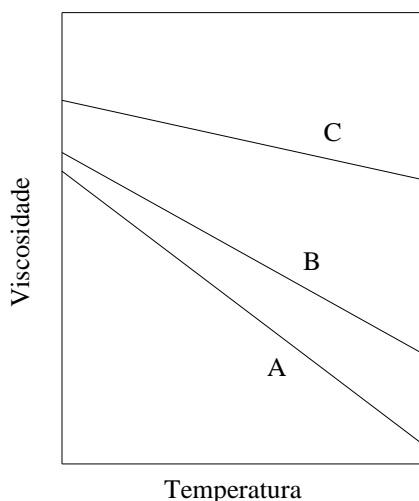


Figura A.2 - Comportamento da viscosidade em função da variação de temperatura para:

A - Óleo mineral comum; B - Óleo mineral com um aditivo aumentador do índice de viscosidade; C - Óleo sintético a base de silicone.

A Equação (A.2) estabelece a relação de dependência entre a viscosidade e a taxa de deformação, a qual, levando-se em conta a hipótese de escoamento com alta dominância de Couette, toma a seguinte forma aproximada:

$$\mu = m \left(\frac{U}{c} \right)^{n-1} \quad (\text{A.11})$$

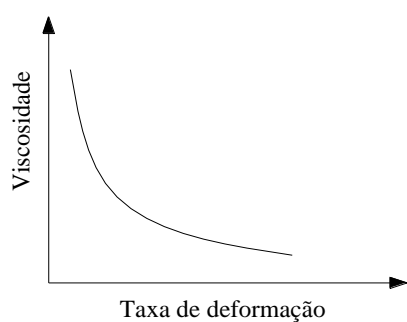
onde U é a velocidade tangencial do munhão e c é a folga radial do mancal.

Para o caso de um fluido lubrificante newtoniano ($n = 1$) a viscosidade é constante, ou seja, não depende da taxa de deformação e a viscosidade aparente, μ , é igual à viscosidade dinâmica, m .

A Figura A.3 e a Figura A.4 ilustram, respectivamente, o comportamento da viscosidade versus taxa de deformação para um fluido lubrificante newtoniano e para fluídos não-newtonianos.



Figura A.3 - Viscosidade versus taxa de deformação para fluido lubrificante newtoniano



(a) Fluido pseudoplástico



(b) Fluido dilatante

Figura A.4 - Viscosidade versus taxa de deformação para lubrificantes não-newtoniano

APÊNDICE B

MÉTODO ITERATIVO PARA DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA DO FILME DE ÓLEO

Conforme evidenciado nos trabalhos experimentais de Dowson et al. (1966) e Tonnesen e Hansen (1981) os efeitos térmicos na lubrificação hidrodinâmica não podem ser desprezados, devido à grande variação da viscosidade do óleo lubrificante com a temperatura.

Assim que um mancal hidrodinâmico é colocado em operação, o óleo lubrificante sofre um acréscimo substancial de temperatura até atingir a condição de regime, com conseqüente redução da viscosidade. Portanto, para determinar os parâmetros de desempenho de um mancal hidrodinâmico, torna-se necessário determinar uma temperatura média do filme de óleo, em regime, e a viscosidade correspondente. Isto pode ser feito através de um processo iterativo, mostrado a seguir, com base em um equilíbrio entre a perda de potência por atrito adicionada da energia introduzida pelo óleo na posição ($\theta = -\phi$) e as energias retiradas pelo lubrificante através da vazão lateral, Q_l , e da vazão de recirculação, Q_{rec} (ver Figura 4.2, repetida aqui por conveniência), isto é:

$$\Delta Pot + Q_t \rho C_p T_{mist} = Q_{rec} \rho C_p T_{rec} + Q_L \rho C_p T_L \quad (B.1)$$

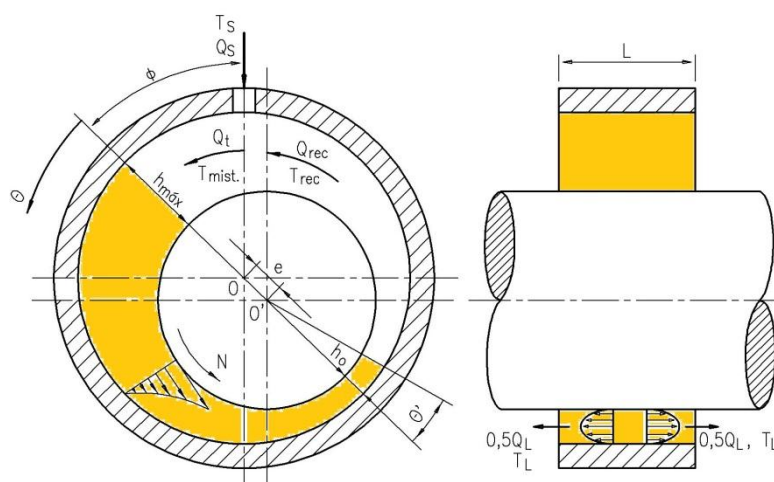


Figura 4.2 (repetida). Componentes de vazão e temperaturas correspondentes

A elevação de temperatura, ΔT , é calculada levando-se em consideração os efeitos das temperaturas dos óleos de suprimento, T_s , e recirculação, T_{rec} .

A temperatura média do filme de óleo do mancal radial hidrodinâmico, operando em regime, pode ser calculada por:

$$T_m^{(\gamma+1)} = T_{mist}^{(\gamma+1)} + \lambda \Delta T^{(\gamma)}, \quad (\text{B.2})$$

onde:

λ é uma constante empírica utilizada para determinar uma temperatura de referência, a partir da qual é calculada uma viscosidade média da película de óleo lubrificante;

$\Delta T^{(\gamma)}$ é a elevação de temperatura na iteração γ ;

$T_m^{(\gamma+1)}$ é a temperatura média na iteração $\gamma+1$;

$T_{mist}^{(\gamma+1)}$ é a temperatura resultante da mistura do óleo de suprimento com o óleo de recirculação na posição $(\theta = -\phi)$, iteração $\gamma+1$.

O valor da constante empírica λ , segundo resultados experimentais, varia para cada mancal específico e é bastante influenciado pela velocidade de rotação e pela folga construtiva do mancal. No presente trabalho será adotado $\lambda = 0,5$, conforme Raimondi e Boyd (1958).

A temperatura T_{mist} é resultante da mistura do óleo de suprimento com o óleo de recirculação. Assim, têm-se as seguintes relações:

$$T_{rec}^{(\gamma)} = T_{mist}^{(\gamma)} + \Delta T^{(\gamma)} \quad (\text{B.3})$$

$$T_{mist}^{(\gamma+1)} = \frac{Q_{rec} T_{rec}^{(\gamma)} + Q_L T_S}{Q_t} \quad (\text{B.4})$$

onde:

T_{rec} é a temperatura do óleo de recirculação;

T_S é a temperatura do óleo de suprimento;

Q_{rec} é a vazão de recirculação;

Q_L é a vazão lateral ou axial de óleo;

Q_t é a vazão total de óleo lubrificante, na entrada da cunha de óleo.

As equações (B.2), (B.3) e (B.4) caracterizam o processo iterativo utilizado para calcular a temperatura média, T_m , de um mancal radial hidrodinâmico operando em regime. Tal procedimento, ilustrado na Figura (B.1), pode ser resumido na seguinte sequência de cálculos:

- 1 – Arbitram-se inicialmente valores para T_m e para T_{mist} , se possível com base em dados experimentais e calculam-se a viscosidade dinâmica, m , e aparente, μ , correspondentes, através das equações (A.6), (A.9), (A.10) e (A.11);
- 2 – Calcula-se a distribuição de pressão adimensional, $\bar{P} = \bar{P}(\theta, \bar{z})$, através das equações de diferenças finitas desenvolvidas no Capítulo 3.
- 3 – Calculam-se os parâmetros capacidade de carga do mancal, número de Sommerfeld, força de atrito, coeficiente de atrito, perda de potência, vazões de óleo, e por fim a elevação de temperatura ΔT , através da Equação (4.63).
- 4 – Calculam-se as temperaturas T_{rec} , T_{mist} e T_m , respectivamente pelas equações (B.3), (B.4) e (B.2);
- 5 – Efetua-se o teste de convergência de T_m , impondo-se uma tolerância de 0,2 °C, por exemplo;
- 6 – Atualiza-se a temperatura média T_m para reiniciar o processo iterativo;
- 7 – Após a convergência da temperatura média, calculam-se os demais parâmetros resultantes do comportamento operacional do mancal radial hidrodinâmico.

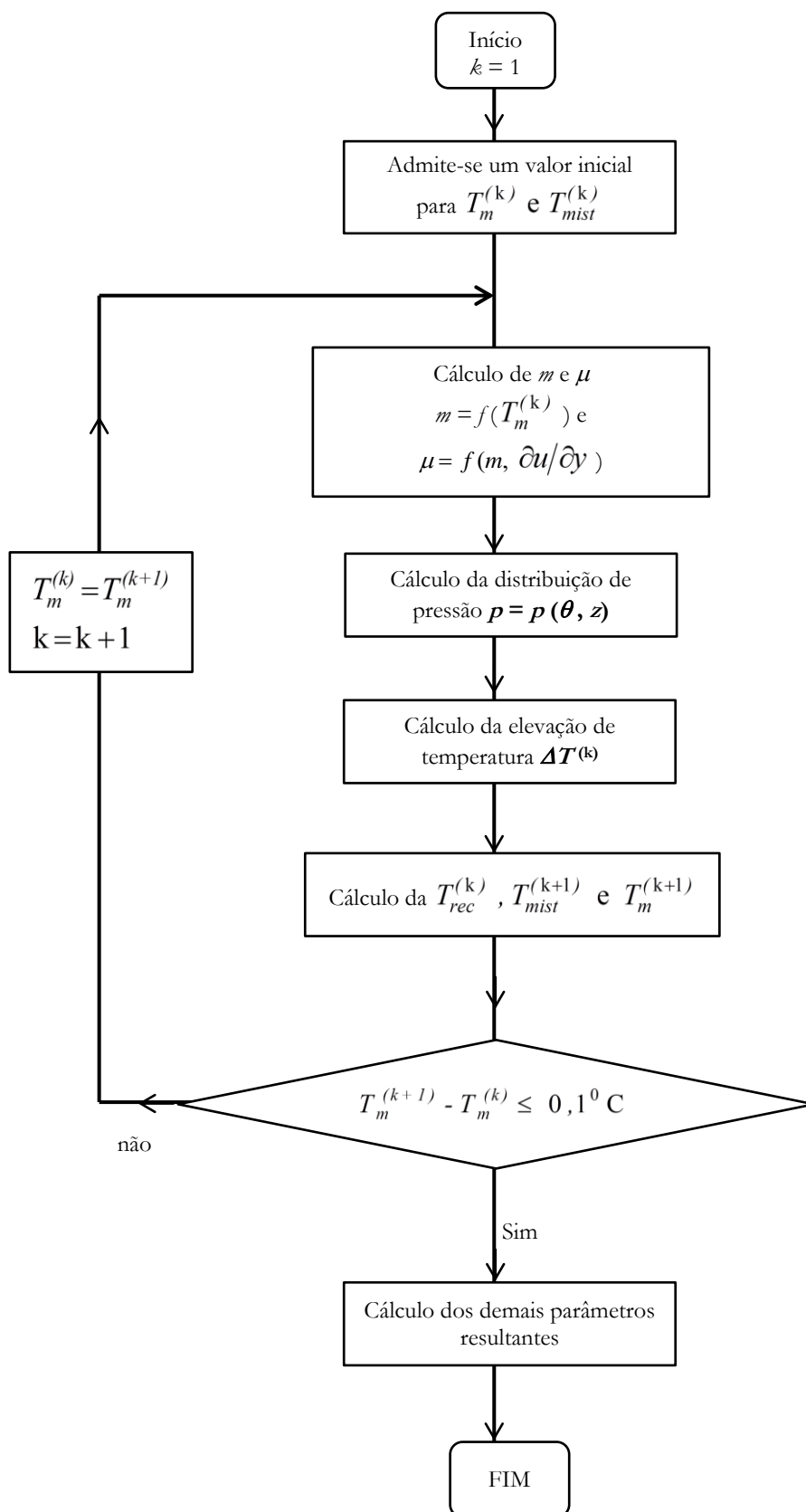


Figura B.1 Diagrama de blocos do procedimento iterativo

APÊNDICE C

ANÁLISE COMPARATIVA DE CONDIÇÕES DE CONTORNO

As Figuras C.1 e C.2 mostram respectivamente a distribuição de pressão, obtida com a aplicação da condição de contorno de Reynolds, utilizada na presente dissertação, e a distribuição correspondente obtida com aplicação da condição de Sommerfeld, para uma excentricidade específica $\varepsilon = 0,70$, índice de característica reológica $n = 1$, folga radial $c = 0,1$ mm, relação $L/D = 1$ e rotação $N = 1800$ rpm. A condição de contorno de meio Sommerfeld, utilizada frequentemente na literatura, despreza a parte negativa da Figura C.2.

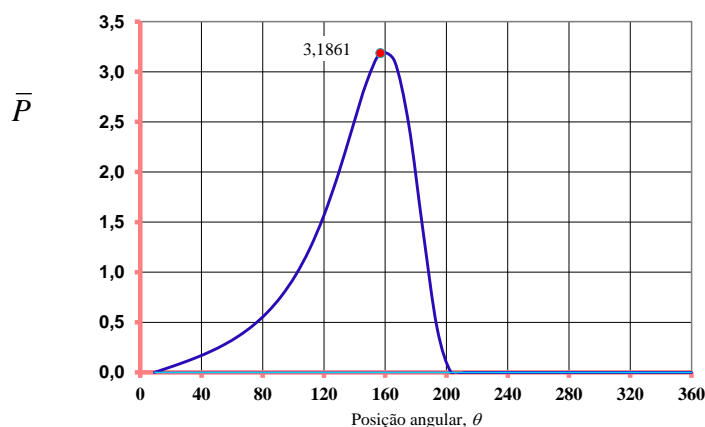


Figura C.1 Distribuição de pressão adimensional segundo condição de contorno de Reynolds

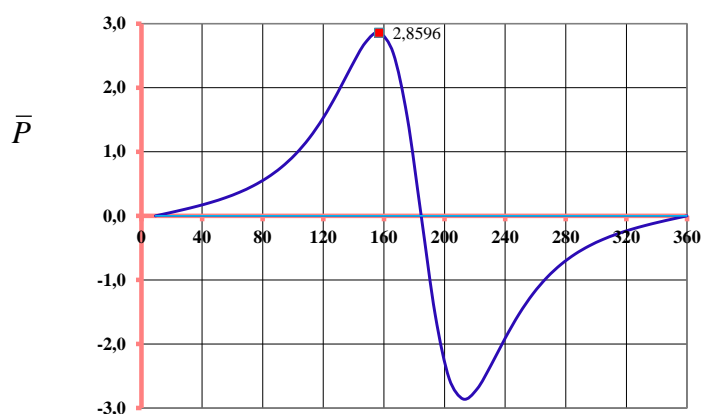


Figura C.2 Distribuição de pressão adimensional segundo condição de Sommerfeld

Nota-se que, para as mesmas condições fixas de projeto, a pressão adimensional obtida mediante aplicação da condição de Reynolds é cerca de 11% maior em relação ao valor obtido com a condição de meio Sommerfeld.

APÊNDICE D - DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO ADIMENSIONAL

Tabela D.1 - Distribuição de pressão adimensional para $\varepsilon=0,7$; $N=1500$ rpm; $c=0,1$ mm; $L/D=1,0$; $T_s=35^\circ\text{C}$; $n=1,0$, malha 57x361.
(os valores de pressão estão multiplicados por 10000)

Nº (i, j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
1																														
2		0,31	0,60	0,88	1,15	1,41	1,66	1,90	2,12	2,34	2,54	2,73	2,91	3,08	3,25	3,39	3,53	3,65	3,77	3,87	3,96	4,04	4,11	4,18	4,22	4,26	4,29	4,30	4,31	
3		0,61	1,19	1,76	2,31	2,82	3,32	3,80	4,25	4,67	5,08	5,47	5,83	6,17	6,49	6,78	7,06	7,30	7,54	7,75	7,93	8,09	8,24	8,35	8,45	8,53	8,58	8,62	8,63	
4		0,91	1,79	2,64	3,45	4,24	4,98	5,70	6,37	7,02	7,63	8,21	8,75	9,27	9,74	10,18	10,60	10,97	11,31	11,63	11,90	12,14	12,36	12,54	12,68	12,80	12,88	12,93	12,95	
5		1,22	2,40	3,53	4,61	5,65	6,64	7,60	8,51	9,37	10,18	10,95	11,68	12,36	12,99	13,59	14,13	14,64	15,09	15,50	15,88	16,20	16,49	16,73	16,92	17,08	17,19	17,25	17,28	
6		1,53	2,99	4,41	5,77	7,07	8,32	9,51	10,64	11,72	12,74	13,71	14,61	15,46	16,25	17,00	17,68	18,31	18,89	19,40	19,86	20,28	20,63	20,93	21,17	21,36	21,50	21,58	21,62	
7		1,84	3,60	5,30	6,93	8,50	9,99	11,43	12,78	14,08	15,31	16,46	17,56	18,58	19,53	20,42	21,25	22,00	22,68	23,31	23,87	24,36	24,78	25,14	25,43	25,67	25,83	25,93	25,96	
8		2,14	4,20	6,19	8,10	9,93	11,67	13,34	14,94	16,44	17,88	19,23	20,50	21,70	22,82	23,86	24,82	25,69	26,50	27,23	27,88	28,45	28,95	29,36	29,71	29,98	30,17	30,29	30,33	
9		2,45	4,81	7,09	9,27	11,36	13,36	15,28	17,10	18,82	20,47	22,01	23,47	24,83	26,12	27,30	28,41	29,41	30,33	31,16	31,90	32,56	33,13	33,61	34,00	34,31	34,54	34,66	34,71	
10		2,77	5,42	7,98	10,44	12,80	15,06	17,21	19,27	21,22	23,06	24,81	26,45	27,99	29,43	30,77	32,00	33,14	34,18	35,11	35,95	36,70	37,34	37,88	38,32	38,67	38,91	39,06	39,12	
11		3,07	6,04	8,89	11,63	14,26	16,76	19,17	21,44	23,61	25,68	27,61	29,45	31,15	32,76	34,25	35,63	36,89	38,05	39,09	40,02	40,85	41,56	42,17	42,65	43,04	43,31	43,49	43,54	
12		3,39	6,65	9,80	12,82	15,71	18,48	21,13	23,64	26,04	28,30	30,44	32,46	34,35	36,11	37,73	39,27	40,66	41,94	43,09	44,12	45,02	45,81	46,47	47,02	47,44	47,72	47,92	47,99	
13		3,71	7,28	10,71	14,02	17,19	20,21	23,10	25,85	28,47	30,95	33,28	35,48	37,55	39,48	41,28	42,93	44,46	45,85	47,11	48,23	49,23	50,08	50,81	51,40	51,87	52,20	52,40	52,47	
14		4,02	7,91	11,64	15,22	18,66	21,95	25,09	28,07	30,91	33,60	36,14	38,54	40,78	42,88	44,82	46,63	48,29	49,80	51,16	52,38	53,46	54,39	55,17	55,82	56,32	56,68	56,90	56,97	
15		4,35	8,53	12,57	16,44	20,15	23,70	27,09	30,31	33,38	36,29	39,03	41,61	44,04	46,30	48,40	50,35	52,13	53,76	55,24	56,55	57,72	58,72	59,57	60,26	60,81	61,20	61,43	61,51	
16		4,67	9,18	13,51	17,67	21,65	25,47	29,11	32,57	35,86	38,99	41,94	44,71	47,31	49,74	52,00	54,09	56,02	57,76	59,34	60,76	62,01	63,09	64,01	64,75	65,34	65,76	66,01	66,10	
17		5,00	9,82	14,46	18,90	23,17	27,25	31,14	34,85	38,38	41,71	44,87	47,83	50,62	53,22	55,64	57,87	59,92	61,80	63,49	65,00	66,34	67,50	68,47	69,27	69,99	70,54	70,92	70,71	
18		5,33	10,47	15,41	20,15	24,70	29,05	33,20	37,16	40,91	44,46	47,82	50,99	53,95	56,73	59,31	61,68	63,87	65,87	67,67	69,29	70,71	71,94	72,98	73,83	74,49	74,97	75,26	75,36	
19		5,67	11,12	16,37	21,42	26,24	30,86	35,28	39,47	43,47	47,25	50,81	54,17	57,33	60,26	63,00	65,54	67,86	69,97	71,89	73,60	75,11	76,42	77,52	78,44	79,14	79,65	79,95	80,05	
20		6,00	11,79	17,35	22,69	27,81	32,70	37,37	41,82	46,04	50,05	53,83	57,39	60,73	63,84	66,74	69,42	71,88	74,12	76,15	77,97	79,57	80,95	82,12	83,08	83,82	84,36	84,68	84,80	
21		6,35	12,46	18,33	23,98	29,38	34,55	39,49	44,19	48,66	52,89	56,87	60,64	64,16	67,45	70,52	73,35	75,94	78,32	80,46	82,37	84,06	85,52	86,76	87,78	88,56	89,13	89,47	89,59	
22		6,69	13,14	19,33	25,28	30,98	36,43	41,63	46,59	51,30	55,75	59,96	63,94	67,64	71,10	74,33	77,32	80,05	82,55	84,81	86,83	88,61	90,14	91,45	92,52	93,35	93,95	94,30	94,43	
23		7,03	13,81	20,34	26,60	32,60	38,33	43,80	49,02	53,96	58,66	63,08	67,24	71,15	74,80	78,19	81,33	84,21	86,83	89,21	91,34	93,20	94,83	96,19	97,31	98,19	98,81	99,19	99,33	
24		7,40	14,51	21,36	27,94	34,23	40,26	46,00	51,47	56,67	61,59	66,24	70,61	74,71	78,54	82,10	85,40	88,42	91,17	93,66	95,89	97,86	99,56	100,99	102,17	103,09	103,74	104,14	104,28	
25		7,75	15,22	22,39	29,28	35,89	42,20	48,22	53,96	59,41	64,56	69,43	74,02	78,31	82,32	86,06	89,50	92,68	95,56	98,17	100,50	102,57	104,35	105,85	107,09	108,04	108,73	109,15	109,29	
26		8,11	15,93	23,44	30,66	37,56	44,17	50,47	56,48	62,18	67,58	72,67	77,47	81,96	86,17	90,06	93,67	96,99	100,01	102,74	105,18	107,33	109,19	110,77	112,06	113,06	113,78	114,22	114,37	
27		8,48	16,65	24,51	32,05	39,27	46,17	52,76	59,04	64,99	70,63	75,95	80,97	85,66	90,04	94,12	97,89	101,35	104,51	107,37	109,91	112,16	114,10	115,75	117,09	118,15	118,90	119,35	119,51	
28		8,86	17,39	25,58	33,46	41,00	48,20	55,08	61,62	67,84	73,73	79,28	84,51	89,41	93,99	98,24	102,17	105,78	109,07	112,05	114,71	117,05	119,08	120,80	122,20	123,30	124,08	124,56	124,72	
29		9,24	18,13	26,68	34,89	42,74	50,27	57,43	64,25	70,73	76,86	82,66	88,10	93,21	97,98	102,41	106,51	110,28	113,70	116,80	119,57	122,01	124,13	125,92	127,38	128,52	129,34	129,83	130,00	
30		9,62	18,89	27,79	36,34	44,52	52,35	59,81	66,92	73,66	80,05	86,08	91,75	97,07	102,03	106,65	110,91	114,83	118,40	121,62	124,51	127,05	129,25	131,12	132,63	133,82	134,67	135,18	135,36	
31		10,02	19,65	28,92	37,82	46,33	54,48	62,24	69,63	76,65	83,29	89,56	95,46	100,98	106,15	110,95	115,39	119,45	123,17	126,52	129,52	132,16	134,44	136,39	137,97	139,20	140,08	140,62	140,80	
32		10,41	20,44	30,07	39,32	48,17	56,63	64,70	72,38	79,67	86,57	93,09	99,22	104,96	110,33	115,31	119,91	124,15	128,01	131,49	134,60	137,34	139,72	141,73	143,37	144,66	145,57	146,13	146,32	
33		10,82	21,23	31,24	40,85	50,04	58,83	67,21	75,18	82,75	89,92	96,68	103,04	109,00	114,57	119,74	124,53	128,92	132,91	136,53	139,77	142,62	145,07	147,16	148,87	150,20	151,15	151,73	151,93	
34		11,23	22,04	32,43	42,39	51,94	61,05	69,75	78,02	85,88	93,31	100,32	106,92	113,12	118,88	124,25	129,21	133,76	137,91	141,66	145,01	147,97	150,52	152,69	154,45	155,83	156,82	157,41	157,62	
35		11,65	22,86	33,64	43,97	53,86	63,32	72,33	80,91	89,06	96,76	104,04	110,87	117,29	123,28	128,84	133,97	138,69	142,99	146,87	150,35	153,40	156,05	158,29	160,13	161,56	162,58	163,19	163,41	
36		12,08	23,70	34,87	45,57	55,83	65,63	74,97	83,86	92,30	100,28	107,81	114,90	121,53	127,73	133,49	138,81	143,70	148,15	152,17	155,77	158,93	161,67	164,00	165,90	167,37	168,43	169,07	169,29	
37		12,51	24,55	36,12	47,21	57,83	67,98	77,65	86,85	95,59	103,85	111,65	118,98	125,86	132,27	138,23	143,74	148,80	153,40	157,56	161,28	164,56	167,40	169,80	171,76	173,29	174,38	175,04	175,27	
38		12,96	25,42	37,39	48,88	59,88	70,37	80,39	89,91	98,94	107,49	115,56	123,15	130,26	136,89	143,06	148,75	153,98	158,74	163,05	166,89	170,28	173,22	175,70	177,73	179,31	180,44	181,13	181,36	
39		13,41	26,31	38,69	50,57	61,95	72,81	83,16	93,02	102,36	111,20	119,54	127,39	134,74	141,60	147,97	153,85	159,26	164,19	168,63	172,60	176,11	179,14	181,71	183,80	185,43	186,61	187,31	187,56	
40		13,87	27,21	40,02	52,31	64,07	75,30	86,00	96,18	105,84	114,98	123,60	131,70	139,31	146,39	152,98	159,05	164,64	169,72	174,32	178,43	182,04	185,17	187,82	189,99	191,67	192,88	193,61	193,86	
41		14,34	28,13	41,38	54,07	66,22	77,83	88																						

Tabela D.1 - Distribuição de pressão adimensional para $\varepsilon=0,7$; $N=1500$ rpm; $c=0,1$ mm; $L/D=1,0$; $T_s=35^\circ\text{C}$; $n=1,0$, malha 57x361.
(continuação)

Nó (i, j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
54		21,47	42,10	61,87	80,80	98,88	116,13	132,54	148,12	162,88	176,83	189,97	202,31	213,86	224,62	234,61	243,82	252,29	259,98	266,92	273,13	278,59	283,31	287,30	290,56	293,11	294,93	296,03	296,41
55		22,12	43,36	63,72	83,20	101,82	119,56	136,45	152,48	167,67	182,01	195,53	208,22	220,10	231,17	241,44	250,91	259,60	267,51	274,65	281,03	286,63	291,49	295,59	298,95	301,56	303,43	304,56	304,95
56		22,78	44,64	65,61	85,66	104,82	123,08	140,45	156,94	172,57	187,33	201,23	214,28	226,49	237,87	248,42	258,16	267,10	275,22	282,55	289,10	294,87	299,86	304,07	307,53	310,20	312,13	313,28	313,68
57		23,45	45,97	67,54	88,18	107,89	126,69	144,56	161,52	177,59	192,76	207,06	220,47	233,02	244,72	255,57	265,58	274,75	283,11	290,65	297,37	303,29	308,42	312,75	316,29	319,04	321,01	322,21	322,61
58		24,15	47,32	69,53	90,77	111,05	130,37	148,76	166,21	182,73	198,33	213,02	226,82	239,72	251,74	262,88	273,16	282,59	291,18	298,92	305,83	311,91	317,17	321,62	325,25	328,08	330,11	331,33	331,75
59		24,86	48,71	71,57	93,42	114,28	134,16	153,07	171,01	188,00	204,04	219,14	233,31	246,56	258,91	270,37	280,94	290,62	299,43	307,38	314,48	320,72	326,13	330,70	334,43	337,33	339,41	340,67	341,10
60		25,58	50,14	73,64	96,13	117,59	138,04	157,49	175,93	193,39	209,88	225,40	239,96	253,59	266,27	278,03	288,89	298,84	307,89	316,05	323,34	329,76	335,30	339,99	343,82	346,81	348,94	350,22	350,67
61		26,34	51,59	75,79	98,92	120,99	142,02	162,01	180,97	198,92	215,86	231,81	246,78	260,78	273,80	285,89	297,04	307,24	316,55	324,93	332,40	339,00	344,69	349,50	353,43	356,50	358,69	360,01	360,46
62		27,10	53,10	77,98	101,78	124,48	146,10	166,65	186,15	204,59	222,00	238,39	253,76	268,14	281,52	293,94	305,37	315,87	325,41	334,01	341,69	348,45	354,30	359,24	363,28	366,42	368,67	370,01	370,48
63		27,89	54,64	80,24	104,71	128,05	150,28	171,41	191,44	210,40	228,29	245,13	262,02	275,68	289,43	302,17	313,93	324,38	334,48	343,33	351,20	358,14	364,14	369,21	373,35	376,58	378,88	380,21	380,74
64		28,70	56,21	82,55	107,72	131,72	154,58	176,29	196,88	216,36	234,74	252,03	268,25	283,42	297,54	310,62	322,69	333,73	343,79	352,85	360,95	368,06	374,22	379,42	383,67	386,97	389,34	390,77	391,26
65		29,54	57,84	84,93	110,80	135,48	158,98	181,30	202,46	222,47	241,36	259,12	275,77	291,35	305,84	319,28	331,65	343,00	353,32	362,63	370,93	378,23	384,54	389,88	394,24	397,63	400,06	401,52	402,03
66		30,39	59,51	87,37	113,97	139,35	163,50	186,44	208,18	228,75	248,14	266,38	283,50	299,48	314,36	328,15	340,86	352,50	363,09	372,64	381,15	388,65	395,13	400,60	405,07	408,55	411,04	412,54	413,06
67		31,26	61,22	89,87	117,23	143,32	168,14	191,71	214,05	235,17	255,10	273,83	291,41	307,81	323,09	337,24	350,29	362,24	373,11	382,90	391,63	399,32	405,97	411,58	416,17	419,74	422,29	423,83	424,36
68		32,17	62,98	92,44	120,57	147,39	172,90	197,13	220,08	241,77	262,24	281,48	299,52	316,37	332,00	346,57	359,96	372,22	383,37	393,42	402,38	410,26	417,08	422,84	427,54	431,20	433,81	435,40	436,04
69		33,10	64,78	95,09	124,01	151,57	177,79	202,68	226,27	248,55	269,56	289,33	307,84	325,14	341,23	356,14	369,88	382,45	393,89	404,20	413,39	421,47	428,47	434,37	439,19	442,94	445,63	447,25	447,81
70		34,05	66,65	97,80	127,54	155,87	182,82	208,39	232,61	255,51	277,09	297,37	316,38	334,14	350,66	365,95	380,05	392,95	404,68	415,25	424,68	432,97	440,14	446,20	451,14	455,00	457,74	459,40	459,97
71		35,02	68,55	100,59	131,17	160,29	187,98	214,25	239,14	262,65	284,81	305,64	325,15	343,37	360,32	376,02	390,47	403,72	415,75	426,59	436,26	444,76	452,11	458,32	463,39	467,34	470,16	471,86	472,44
72		36,04	70,52	103,46	134,89	164,83	193,28	220,27	245,83	269,98	292,73	314,12	334,15	352,85	370,24	386,35	401,18	416,76	427,11	438,23	448,13	456,86	464,39	470,75	475,95	480,00	482,89	484,63	485,23
73		37,07	72,53	106,42	138,73	169,48	198,72	226,46	252,71	277,51	300,87	322,82	343,38	362,57	380,34	396,95	412,16	426,69	438,75	450,15	460,31	469,25	476,98	483,51	488,83	492,98	495,94	497,73	498,34
74		38,13	74,61	109,45	142,66	174,28	204,33	232,81	259,78	285,25	309,23	331,76	352,86	372,56	390,87	407,82	423,43	437,72	450,69	462,39	472,81	481,97	489,89	496,58	502,04	506,29	509,33	511,16	511,79
75		39,24	76,75	112,56	146,71	179,20	210,08	239,35	267,04	293,19	317,81	340,95	362,60	382,82	401,60	418,99	435,00	449,64	462,95	474,95	485,62	495,03	503,15	510,00	515,59	519,95	523,06	524,93	525,58
76		40,36	78,94	115,77	150,88	184,27	215,99	246,06	274,50	301,35	326,64	350,38	372,60	393,34	412,61	430,45	446,87	461,88	475,54	487,83	498,78	508,42	516,73	523,76	529,50	533,96	537,15	539,06	539,72
77		41,52	81,20	119,07	155,15	189,48	222,07	252,96	282,18	309,74	335,70	360,06	382,87	404,15	423,92	442,21	459,05	474,46	488,45	501,05	512,28	522,15	530,68	537,88	543,76	548,33	551,59	553,56	554,23
78		42,72	83,54	122,47	159,57	194,83	228,32	260,05	290,05	318,36	345,01	370,01	393,42	415,25	435,53	454,29	471,56	487,30	500,70	514,62	526,13	536,24	544,99	552,36	558,39	563,08	566,42	568,44	569,12
79		43,95	85,93	125,96	164,10	200,35	234,75	267,34	298,15	327,22	354,57	380,24	404,25	426,65	447,46	466,70	484,40	500,60	515,31	528,55	540,35	550,72	559,67	567,23	573,41	578,20	581,64	583,70	584,40
80		45,21	88,39	129,56	168,75	206,01	241,36	274,83	306,49	336,32	364,40	390,74	415,39	438,36	459,71	479,44	497,59	514,20	529,27	542,85	554,94	565,56	574,74	582,49	588,81	593,73	597,24	599,36	600,08
81		46,52	90,93	133,26	173,55	211,84	248,16	282,55	315,05	345,69	374,50	401,54	426,82	450,39	472,28	492,52	511,14	528,16	543,61	557,52	569,92	580,80	590,21	598,14	604,63	609,66	613,26	615,43	616,17
82		47,86	93,54	137,07	178,49	217,84	255,15	290,47	323,84	355,30	384,89	412,63	438,58	462,75	485,21	505,96	525,04	542,50	558,34	572,60	585,30	596,45	606,08	614,22	620,85	626,02	629,70	631,92	632,68
83		49,24	96,23	140,99	183,57	224,01	262,35	298,63	332,90	365,20	395,56	424,03	450,65	475,45	498,48	519,76	539,33	557,22	573,45	588,07	601,08	612,51	622,38	630,71	637,52	642,80	646,57	648,84	649,62
84		50,67	99,00	145,03	188,80	230,36	269,75	307,02	342,21	375,37	406,53	435,75	463,06	488,50	512,11	533,94	554,00	572,34	588,98	603,96	617,28	629,00	639,12	647,64	654,61	660,02	663,89	666,22	667,02
85		52,14	101,85	149,19	194,18	236,89	277,37	315,65	351,79	385,83	417,81	447,80	475,82	501,91	526,13	548,50	569,07	587,87	604,92	620,27	633,93	645,92	656,28	665,03	672,16	677,70	681,66	684,05	684,86
86		53,66	104,79	153,46	199,72	243,62	285,20	324,52	361,63	396,57	429,41	460,18	488,92	515,69	540,53	563,46	584,56	603,82	621,30	637,02	651,01	663,31	673,92	682,87	690,18	695,85	699,91	702,36	703,19
87		55,21	107,82	157,88	205,43	250,54	293,27	333,66	371,76	407,64	441,33	472,90	502,40	529,85	555,32	578,84	600,45	620,20	638,11	654,22	668,56	681,15	692,02	701,19	708,67	714,49	718,64	721,14	721,99
88		56,81	110,94	162,41	211,31	257,67	301,57	343,05	382,18	419,01	453,59	486,00	516,25	544,41	570,52	594,64	616,79	637,03	655,38	671,89	686,58	699,48	710,61	720,00	727,66	733,62	737,87	740,43	741,30
89		58,47	114,15	167,09	217,35	265,01	310,11	352,72	392,90	430,71	466,21	499,45	530,48	559,36	586,14	610,86	633,57	654,31	673,12	690,03	705,08	718,29	729,69	739,30	747,15	753,25	757,60	760,22	761,12
90		60,17	117,46	171,90	223,58	272,56	318,90	362,66	403,92	442,75	479,17	513,27	545,11	574,73	602,19	627,54	650,81	672,06	691,33	708,67	724,07	737,60	749,28	759,13	767,17	773,41	777,86	780,55	781,46
91		61,93	120																										

Tabela D.1 - Distribuição de pressão adimensional para $\varepsilon = 0,7$; $N = 1500$ rpm; $c = 0,1$ mm; $L/D = 1,0$; $T_s = 35^\circ\text{C}$; $n = 1,0$, malha 57×361 .
(continuação)

Nº (i, j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
107	98,60	191,77	279,73	362,65	440,73	514,15	583,07	647,68	708,11	764,55	817,12	865,94	911,18	952,94	991,34	1026,48	1058,45	1087,35	1113,26	1136,25	1156,38	1173,73	1188,32	1200,22	1209,44	1216,02	1219,98	1221,32	
108	101,52	197,40	287,88	373,13	453,38	528,79	599,57	665,89	727,89	785,77	839,67	889,73	936,08	978,86	1018,18	1054,15	1086,89	1116,46	1142,98	1166,50	1187,09	1204,83	1219,77	1231,93	1241,36	1248,08	1252,13	1253,51	
109	104,52	203,20	296,26	383,92	466,38	543,85	616,51	684,57	748,20	807,56	862,82	914,12	961,61	1005,43	1045,70	1082,53	1116,03	1146,29	1173,42	1197,48	1218,56	1236,69	1251,96	1264,39	1274,04	1280,92	1285,05	1286,45	
110	107,62	209,16	304,88	394,99	479,73	559,31	633,91	703,76	769,03	829,91	886,55	939,13	987,78	1032,67	1073,90	1111,61	1145,89	1176,86	1204,61	1229,22	1250,77	1269,32	1284,93	1297,64	1307,50	1314,53	1318,75	1320,19	
111	110,80	215,29	313,74	406,38	493,45	575,17	651,77	723,45	790,40	852,83	910,89	964,77	1014,62	1060,58	1102,79	1141,38	1176,47	1208,16	1236,55	1261,72	1283,75	1302,71	1318,67	1331,66	1341,74	1348,93	1353,24	1354,72	
112	114,07	221,59	322,85	418,07	507,54	591,46	670,10	743,64	812,33	876,32	935,85	991,05	1042,10	1089,17	1132,38	1171,88	1207,78	1240,20	1269,23	1294,98	1317,50	1336,89	1353,20	1366,48	1376,77	1384,12	1388,54	1390,03	
113	117,44	228,08	332,20	430,08	522,00	608,18	688,89	764,36	834,79	900,41	961,40	1017,96	1070,25	1118,44	1162,68	1203,10	1239,83	1272,98	1302,67	1329,00	1352,02	1371,84	1388,51	1402,09	1412,60	1420,11	1424,62	1426,15	
114	120,89	234,73	341,80	442,41	536,83	625,33	708,17	785,58	857,82	925,08	987,59	1045,52	1099,07	1148,40	1193,68	1235,03	1272,60	1306,51	1336,88	1363,78	1387,33	1407,58	1424,62	1438,49	1449,24	1456,90	1461,50	1463,07	
115	124,44	241,56	351,66	455,05	552,04	642,90	727,91	807,33	881,40	950,35	1014,39	1073,72	1128,56	1179,06	1225,38	1267,69	1306,12	1340,80	1371,84	1399,34	1423,41	1444,10	1461,50	1475,68	1486,65	1494,48	1499,19	1500,78	
116	128,10	248,57	361,77	468,02	567,63	660,91	748,15	829,60	905,54	976,20	1041,81	1102,58	1158,72	1210,40	1257,80	1301,08	1340,38	1375,63	1407,56	1435,67	1460,26	1481,40	1499,18	1513,66	1524,88	1532,87	1537,68	1539,31	
117	131,84	255,77	372,14	481,31	583,62	679,36	768,87	852,40	930,24	1002,65	1069,88	1132,08	1189,54	1242,43	1290,92	1335,18	1375,83	1411,61	1444,04	1472,76	1497,88	1519,48	1537,64	1552,42	1563,88	1572,05	1576,95	1578,62	
118	135,68	263,14	382,76	494,93	599,97	698,25	790,06	875,72	955,51	1029,69	1098,51	1162,22	1221,03	1275,14	1324,74	1370,00	1411,08	1448,12	1481,26	1510,61	1536,27	1558,34	1576,88	1591,98	1603,68	1612,01	1617,02	1618,71	
119	139,61	270,69	393,65	508,86	616,71	717,56	811,74	899,56	981,32	1057,32	1127,79	1193,01	1253,18	1308,54	1359,25	1405,52	1447,54	1485,37	1519,23	1549,21	1575,41	1597,94	1616,88	1632,30	1644,23	1652,75	1657,86	1659,58	
120	143,65	278,43	404,78	523,13	633,85	737,32	833,89	923,91	1007,69	1085,51	1157,68	1224,41	1285,98	1342,59	1394,45	1441,75	1484,67	1523,34	1557,92	1588,54	1615,30	1638,30	1657,64	1673,37	1685,56	1694,24	1699,45	1701,22	
121	147,78	286,35	416,18	537,71	651,34	757,48	856,52	948,77	1034,60	1114,29	1188,15	1256,44	1319,42	1377,31	1430,32	1478,66	1522,50	1562,01	1597,33	1628,59	1655,91	1679,39	1699,13	1715,18	1727,61	1736,47	1741,80	1743,60	
122	152,00	294,44	427,83	552,60	669,21	778,08	879,60	974,13	1062,04	1143,63	1219,28	1289,08	1353,48	1412,66	1466,58	1516,24	1561,07	1601,37	1637,43	1669,35	1697,23	1721,19	1741,33	1757,71	1770,39	1779,43	1784,87	1786,70	
123	156,32	302,72	439,72	567,80	687,45	799,08	903,13	999,98	1089,99	1173,51	1250,84	1322,30	1388,15	1448,64	1504,00	1554,46	1600,20	1641,38	1678,20	1710,77	1739,23	1763,69	1784,23	1800,93	1813,87	1823,09	1828,62	1830,50	
124	160,73	311,17	451,85	583,31	706,03	820,48	927,10	1026,30	1118,44	1203,91	1283,01	1356,09	1423,40	1485,21	1541,77	1593,90	1639,99	1682,04	1719,61	1752,85	1781,88	1806,83	1827,77	1844,82	1858,01	1867,41	1873,06	1874,97	
125	165,24	319,78	464,22	599,10	724,96	842,27	951,50	1053,07	1147,38	1234,81	1315,71	1390,42	1459,20	1522,35	1580,11	1632,72	1680,39	1723,30	1761,63	1795,54	1825,15	1850,59	1871,96	1889,32	1902,78	1912,36	1918,12	1920,06	
126	169,82	328,55	476,81	615,19	744,21	864,43	976,29	1080,26	1176,77	1266,20	1348,91	1425,25	1495,53	1560,02	1619,00	1672,70	1721,35	1765,13	1804,23	1838,81	1869,00	1894,94	1916,72	1934,42	1948,13	1957,90	1963,76	1965,74	
127	174,49	337,48	489,62	631,52	763,78	886,93	1001,46	1107,87	1206,59	1298,03	1382,58	1460,57	1532,35	1598,20	1658,40	1713,19	1762,83	1807,34	1846,78	1882,61	1913,39	1939,82	1962,01	1980,05	1994,02	2003,98	2009,95	2011,97	
128	179,24	346,55	502,63	648,12	783,64	909,75	1026,99	1135,85	1236,81	1330,28	1416,66	1496,33	1569,61	1636,83	1698,26	1754,16	1804,77	1850,30	1890,95	1926,89	1958,26	1985,19	2007,80	2026,18	2040,41	2050,54	2056,63	2058,68	
129	184,06	355,76	515,83	664,95	803,76	932,87	1052,84	1164,18	1267,38	1362,90	1451,13	1532,48	1607,28	1675,87	1738,53	1795,54	1847,14	1893,55	1934,98	1971,58	2003,54	2030,98	2054,01	2072,72	2088,21	2097,54	2103,73	2105,83	
130	188,95	365,10	529,19	681,98	824,12	956,26	1078,97	1192,81	1298,28	1395,84	1485,94	1568,97	1645,29	1715,25	1779,14	1837,27	1889,86	1937,16	1979,36	2016,65	2049,19	2077,12	2100,57	2119,63	2134,38	2144,88	2151,19	2153,32	
131	193,90	374,54	542,72	699,20	844,70	979,87	1105,35	1221,69	1329,44	1429,07	1521,03	1605,75	1683,59	1754,93	1820,06	1879,29	1932,87	1981,05	2024,03	2062,00	2095,12	2123,56	2147,42	2166,81	2181,83	2192,52	2198,93	2201,10	
132	198,91	384,08	556,37	716,58	865,45	1003,69	1131,94	1250,79	1360,81	1462,50	1556,33	1642,74	1722,11	1794,83	1861,19	1921,53	1976,69	2025,15	2068,90	2107,54	2141,27	2170,20	2194,48	2214,21	2229,48	2240,34	2246,87	2249,08	
133	203,96	393,70	570,12	734,07	886,33	1027,65	1158,67	1280,04	1392,34	1496,09	1591,79	1679,88	1760,77	1834,85	1902,46	1963,89	2019,44	2069,38	2113,90	2153,22	2187,52	2216,94	2241,63	2261,70	2277,23	2288,28	2294,91	2297,15	
134	209,05	403,38	583,95	751,65	907,31	1051,69	1185,50	1309,39	1423,93	1529,77	1627,33	1717,09	1799,50	1874,95	1943,77	2006,84	2064,81	2117,63	2165,92	2209,28	2248,81	2288,81	2309,20	2324,98	2336,22	2342,96	2345,23		
135	214,15	413,09	597,83	769,28	928,33	1075,79	1212,36	1338,76	1455,59	1563,45	1662,86	1754,29	1838,21	1915,00	1985,04	2048,65	2106,16	2157,81	2203,86	2244,51	2279,96	2310,37	2335,87	2356,60	2372,63	2384,04	2390,90	2393,20	
136	219,27	422,83	611,71	786,92	949,35	1099,85	1239,19	1368,08	1487,16	1597,05	1698,29	1791,38	1876,77	1954,91	2026,15	2090,85	2149,30	2201,81	2248,61	2289,91	2325,93	2356,81	2382,72	2403,77	2420,04	2431,63	2438,59	2440,93	
137	224,39	432,54	625,57	804,51	970,31	1123,84	1265,91	1397,26	1518,57	1630,46	1733,52	1828,24	1915,12	1994,56	2067,00	2132,75	2192,16	2245,50	2293,03	2334,98	2371,55	2402,91	2429,21	2450,57	2467,10	2478,86	2485,92	2488,30	
138	229,49	442,22	639,36	822,00	991,13	1147,66	1292,44	1426,22	1549,73	1663,61	1768,44	1864,78	1953,10	2033,85	2107,45	2174,24	2234,57	2288,74	2337,00	2379,58	2416,70	2448,52	2475,21	2496,88	2513,65	2525,58	2532,74	2535,16	
139	234,55	451,81	653,03	839,33	1011,75	1171,24	1318,68	1454,87	1580,53	1696,36	1802,95	1900,86	1990,60	2072,63	2147,36	2215,18	2276,42	2331,39	2380,35	2423,56	2461,20	2493,49	2520,56	2542,53	2559,53	2571,63	2578,89	2581,34	
140	239,56	461,31	666,54	856,44	1032,09	1194,49	1344,55	1483,08	1610,87	1728,60	1836,91	1936,35	2027,48	2110,75	2186,60	2255,41	2317,54	2373,29	2422,95	2466,75	2504,92	2537,65	2565,08	2587,36	2604,59	2616,85	2624,21	2626,68	
141	244,48	470,64	679,83	873,26	1052,08	1217,32	1369,92	1510,76	1640,61	1760,20	1870,17	1971,12	2063,60	2148,07	2225,01	2294,79	2357,78	2414,20	2464,61	2509,01	2547,68	2580,83	2608,62	2631,19	2648,63	2661,06	2668,50	2671,02	
142																													

Tabela D.1 - Distribuição de pressão adimensional para $\varepsilon = 0,7$; $N = 1500$ rpm; $c = 0,1$ mm; $L/D = 1,0$; $T_s = 35^\circ\text{C}$; $n = 1,0$, malha 57x361.
(continuação)

Nº (i, j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
160		286,65	549,37	790,41	1011,72	1215,05	1401,91	1573,65	1731,48	1876,47	2009,55	2131,59	2243,33	2345,45	2438,56	2523,19	2599,83	2668,91	2730,82	2785,88	2834,40	2876,64	2912,82	2943,12	2967,71	2986,72	3000,25	3008,35	3011,08
161		283,84	544,00	782,71	1001,92	1203,33	1388,47	1558,67	1715,11	1858,85	1990,81	2111,84	2222,68	2323,99	2416,38	2500,37	2576,44	2645,02	2706,47	2761,14	2809,32	2851,26	2887,19	2917,28	2941,71	2960,59	2974,02	2982,08	2984,79
162		280,32	537,29	773,12	989,72	1188,79	1371,83	1540,14	1694,89	1837,10	1967,71	2087,52	2197,26	2297,61	2389,12	2472,33	2547,71	2615,67	2676,59	2730,78	2778,55	2820,13	2855,75	2885,60	2909,83	2928,55	2941,87	2949,86	2952,54
163		276,06	529,20	761,57	975,07	1171,37	1351,92	1518,00	1670,75	1811,18	1940,18	2058,55	2167,01	2266,21	2356,69	2438,99	2513,56	2580,79	2641,08	2694,70	2741,99	2783,15	2818,42	2847,97	2871,95	2890,49	2903,69	2911,59	2914,26
164		271,06	519,71	748,06	957,96	1151,04	1328,70	1492,21	1642,65	1781,01	1908,16	2024,89	2131,87	2229,74	2319,05	2400,30	2473,92	2540,33	2599,87	2652,86	2699,58	2740,26	2775,11	2804,32	2828,04	2846,36	2859,41	2867,22	2869,86
165		265,31	508,80	732,56	938,36	1127,76	1302,15	1462,73	1610,56	1746,59	1871,66	1986,51	2091,82	2188,20	2276,16	2356,22	2428,78	2494,26	2552,97	2605,22	2651,30	2691,44	2725,83	2754,65	2778,05	2796,14	2809,00	2816,73	2819,32
166		258,81	496,50	715,08	916,26	1101,57	1272,29	1429,61	1574,51	1707,93	1830,67	1943,43	2046,88	2141,58	2228,06	2306,79	2378,18	2442,59	2500,38	2551,82	2597,19	2636,72	2670,58	2698,98	2722,03	2739,84	2752,53	2760,13	2762,69
167		251,55	482,80	695,64	891,73	1072,49	1239,16	1392,87	1534,55	1665,10	1785,26	1895,72	1997,11	2089,99	2174,82	2252,08	2322,16	2385,42	2442,18	2492,73	2537,32	2576,16	2609,46	2637,37	2660,03	2677,56	2690,03	2697,51	2700,03
168		243,56	467,72	674,28	864,78	1040,56	1202,82	1352,59	1490,77	1618,18	1735,53	1843,50	1942,64	2033,50	2116,55	2192,20	2260,86	2322,86	2378,49	2428,06	2471,79	2509,90	2542,57	2569,96	2592,20	2609,41	2621,65	2628,99	2631,46
169		234,87	451,32	651,05	835,50	1005,91	1163,39	1308,90	1443,28	1567,30	1681,62	1786,87	1883,60	1972,29	2053,40	2127,33	2194,43	2255,06	2309,49	2358,00	2400,79	2438,11	2470,10	2496,92	2518,71	2535,56	2547,56	2554,75	2557,17
170		225,49	433,65	626,04	803,99	968,65	1121,00	1261,94	1392,25	1512,64	1623,72	1726,07	1820,19	1906,55	1985,59	2057,66	2123,11	2182,27	2235,40	2282,76	2324,56	2361,02	2392,27	2418,50	2439,79	2456,26	2467,98	2475,02	2477,39
171		215,46	414,78	599,36	770,39	928,90	1075,80	1211,90	1337,89	1454,42	1562,04	1661,31	1752,66	1836,55	1913,37	1983,46	2047,15	2104,74	2156,48	2202,62	2243,36	2278,90	2309,38	2334,94	2355,72	2371,79	2383,23	2390,08	2392,40
172		204,83	394,79	571,10	734,83	886,86	1028,02	1159,00	1280,44	1392,89	1496,87	1592,87	1681,31	1762,58	1837,05	1905,05	1966,87	2022,80	2073,08	2117,92	2157,54	2192,09	2221,75	2246,63	2266,84	2282,49	2293,62	2300,30	2302,55
173		193,66	373,78	541,42	697,49	842,76	977,89	1103,51	1220,16	1328,34	1428,51	1521,09	1606,46	1684,98	1756,99	1822,78	1882,65	1936,82	1985,55	2029,04	2067,47	2101,00	2129,78	2153,93	2173,56	2188,75	2199,56	2206,05	2208,23
174		182,00	351,87	510,50	658,60	796,80	925,69	1045,73	1157,40	1261,14	1357,32	1446,32	1528,49	1604,15	1673,58	1737,08	1794,88	1847,23	1894,34	1936,40	1973,57	2006,03	2033,90	2057,29	2076,30	2091,02	2101,50	2107,78	2109,90
175		169,91	329,19	478,48	618,35	749,28	871,69	985,97	1092,49	1191,62	1283,68	1368,98	1447,83	1520,50	1587,27	1648,36	1704,04	1754,48	1799,90	1840,47	1876,35	1907,68	1934,60	1957,19	1975,56	1989,78	1999,91	2005,98	2008,03
176		157,48	305,87	445,59	577,02	700,47	816,22	924,59	1025,83	1120,22	1208,02	1289,52	1364,93	1434,53	1498,52	1557,15	1610,60	1659,08	1702,75	1741,78	1776,32	1806,48	1832,40	1854,17	1871,87	1885,58	1895,34	1901,19	1903,17
177		144,79	282,08	412,04	534,86	650,68	759,66	861,99	957,82	1047,35	1130,81	1208,38	1280,28	1346,71	1407,87	1463,95	1515,12	1561,56	1603,43	1640,87	1674,01	1702,98	1727,88	1748,80	1765,80	1778,98	1788,37	1793,99	1795,89
178		131,93	257,96	378,06	492,16	600,27	702,37	798,56	888,89	973,50	1052,52	1126,10	1194,41	1257,60	1315,86	1369,33	1418,16	1462,52	1502,53	1538,34	1570,04	1597,78	1621,62	1641,66	1657,96	1670,59	1679,58	1684,98	1686,80
179		118,98	233,72	343,90	449,25	549,57	644,76	734,74	819,51	899,13	973,65	1043,19	1107,84	1167,75	1223,04	1273,84	1320,29	1362,52	1400,64	1434,78	1465,03	1491,49	1514,26	1533,39	1548,97	1561,03	1569,64	1574,79	1576,54
180		106,06	209,52	309,80	406,40	498,96	587,21	670,98	750,17	824,75	894,74	960,18	1021,14	1077,71	1129,99	1178,10	1222,13	1262,19	1298,38	1330,82	1359,58	1384,76	1406,42	1424,64	1439,47	1450,97	1459,16	1464,08	1465,73
181		93,27	185,58	276,05	363,98	448,82	530,16	607,73	681,33	750,87	816,30	877,63	934,86	988,07	1037,33	1082,70	1124,28	1162,15	1196,40	1227,11	1254,36	1278,22	1298,77	1316,06	1330,14	1341,06	1348,83	1353,50	1355,08
182		80,71	162,07	242,92	322,32	399,53	474,03	545,44	613,49	678,00	738,89	796,09	849,60	899,43	945,64	988,26	1027,37	1063,03	1095,31	1124,28	1150,00	1172,55	1191,97	1208,31	1221,63	1231,95	1239,31	1243,73	1245,23
183		68,50	139,23	210,69	281,75	351,49	419,26	484,59	547,13	606,66	663,02	716,11	765,89	812,36	855,51	895,38	932,01	965,45	995,76	1022,97	1047,15	1068,36	1086,64	1102,04	1114,59	1124,33	1131,26	1135,43	1136,84
184		56,75	117,24	179,65	242,61	305,08	366,26	425,62	482,74	537,35	589,22	638,24	684,32	727,42	767,54	804,66	838,81	870,03	898,35	923,80	946,45	966,32	983,46	997,90	1009,68	1018,81	1025,33	1029,25	1030,57
185		45,60	96,34	150,10	205,27	260,68	315,46	368,98	420,79	470,55	518,00	562,99	605,41	645,18	682,27	716,66	748,34	777,35	803,69	827,40	848,51	867,04	883,03	896,52	907,52	916,07	922,16	925,81	927,05
186		35,18	76,76	122,32	170,04	218,67	267,26	315,11	361,73	406,74	449,85	490,89	529,69	566,17	600,26	631,94	661,18	687,98	712,35	734,32	753,90	771,10	785,95	798,49	808,72	816,66	822,33	825,74	826,89
187		25,63	58,75	96,62	137,29	179,42	222,04	264,41	305,99	346,36	385,24	422,38	457,63	490,87	522,01	551,01	577,83	602,46	624,89	645,13	663,18	679,06	692,79	704,37	713,84	721,19	726,44	729,59	730,66
188		17,15	42,57	73,29	107,31	143,28	180,18	217,26	253,96	289,84	324,58	357,93	389,70	419,76	448,00	474,37	498,81	521,29	541,79	560,33	576,87	591,45	604,05	614,71	623,41	630,18	635,01	637,91	638,89
189		9,95	28,51	52,64	80,45	110,58	142,02	174,03	206,03	237,55	268,28	297,92	326,30	353,25	378,66	402,44	424,55	444,92	463,53	480,38	495,44	508,72	520,23	529,96	537,92	544,10	548,52	551,19	552,08
190		4,35	16,85	34,98	56,99	81,61	107,87	135,03	162,50	189,84	216,68	242,74	267,82	291,74	314,38	335,64	355,45	373,76	390,52	405,72	419,32	431,34	441,75	450,57	457,79	463,41	467,43	469,85	470,66
191		0,79	7,95	20,59	37,23	56,67	78,01	100,56	123,70	147,01	170,10	192,70	214,57	235,55	255,50	274,30	291,88	308,17	323,12	336,70	348,88	359,65	369,00	376,93	383,43	388,48	392,11	394,29	395,02
192			2,14	9,77	21,42	36,00	52,70	70,85	89,87	109,32	128,80	148,06	166,84	184,98	202,32	218,73	234,13	248,45	261,64	273,64	284,44	293,99	302,30	309,36	315,15	319,66	322,89	324,84	325,50
193				2,77	9,78	19,81	32,12	46,13	61,22	76,97	93,01	109,06	124,86	140,26	155,06	169,16	182,46	194,88	206,34	216,82	226,25	234,62	241,92	248,12	253,23	257,21	260,06	261,78	262,37
194					2,52	8,28	16,44	26,57	37,93	50,16	62,89	75,86	88,81	101,55	113,93	125,79	137,06	147,62	157,44	166,42	174,54	181,75	188,06	193,44	197,88	201,34	203,84	205,33	205,85
195						1,55	5,79	12,29	20,09	28,98	38,56	48,60	58,80	69,01	79,05</														