

SAMANTHA UEHARA

**INFLUÊNCIA DO ACABAMENTO SUPERFICIAL NO DESEMPENHO DE
BRONZINAS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia.

São Paulo
2005

OK

SAMANTHA UEHARA

**INFLUÊNCIA DO ACABAMENTO SUPERFICIAL NO DESEMPENHO DE
BRONZINAS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Roberto Martins de Souza

São Paulo
2005

“Quem conhece a sua ignorância revela a mais profunda sapiência. Quem ignora a sua ignorância vive na mais profunda ilusão”. (Lao-Tsé)

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Roberto Martins de Souza, pela dedicação, paciência e compreensão principalmente durante a fase de desenvolvimento do texto desta dissertação.

Ao Prof. Amilton Sinatora que me motivou a começar a estudar Tribologia e acompanhou este trabalho desde o seu início.

Ao meu “coach”, Eduardo Tomanik, por me inspirar a continuar o trabalho de pesquisa, quando estava desanimada e a valorizar cada pequeno progresso, ao invés de ficar desapontada por não alcançar logo o objetivo final.

Aos meus amigos Marcos, Celso, Cintia e Marcel por me incentivarem e também cobrarem a finalização do trabalho.

Especialmente à minha amiga Bia com quem tive a oportunidade de compartilhar momentos semelhantes na execução de nossos trabalhos, alegrias e tristezas; e por me encorajar, pois me mostrou que finalizar um trabalho como este é realmente gratificante.

Aos meus pais Kiyosi e Nilce e ao meu irmão Daniel, que sempre me mostraram que é necessário dedicar-se ao máximo e fazer o melhor possível, mesmo que não alcance o primeiro lugar.

Aos colegas e professores do LFS da POLI-USP que sempre se mostraram disponíveis e interessados em ajudar.

Aos colegas da MAHLE Metal Leve que direta ou indiretamente contribuíram para a execução deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental para verificar a influência do acabamento superficial no desempenho de bronzinas. Foram testadas bronzinas bimetálicas produzidas com dois tipos de acabamento mandrilado, um denominado convencional e outro microperfilado. Testes de bancada e teste de motor foram executados a fim de checar a capacidade de carga até o engripamento, a temperatura das peças e uma avaliação das superfícies das peças foi feita após os testes. A análise dos resultados mostrou que bronzinas microperfiladas apresentaram temperatura um pouco menor na parte posterior das peças durante os testes de bancada do que as bronzinas convencionais. A capacidade de carga para os diferentes acabamentos foi semelhante, pois os testes foram realizados a baixa rotação, o que propicia um maior contato metal-metal, e os dois acabamentos foram feitos no mesmo sentido (longitudinal). A média das temperaturas nas costas das peças convencionais foi maior que das peças microperfiladas, provavelmente devido à melhor capacidade de dissipação de calor através dos microcanais. Peças com acabamento convencional após teste de motor apresentaram polimento em algumas regiões; peças microperfiladas mostraram um aspecto visual mais homogêneo, apesar de apresentarem um maior desgaste. O maior desgaste das peças microperfiladas pode ser uma vantagem, considerando-se a melhor conformabilidade da peça.

ABSTRACT

This work presents an experimental study to analyze the influence of surface finishing on journal bearing performance. Bimetallic bearings were manufactured with two bored finishings, one called conventional and another microprofiled. Bench tests and engine test were conducted in order to check the loading carrying capacity until seizure occurrence, the temperature was evaluated at steel back of the tested parts and the surface of the parts was evaluated after the tests. The results showed that microprofiled bearings presented slightly lower temperature at steel back during the bench tests than the conventional bearings. The loading carrying capacity for both parts was similar, due to the lower speed of the test. The temperature at the steel back of the bearings with microprofile was a slightly lower than in parts with conventional finishing, probably due to the better heat dissipation on the microprofiled finishing. Parts with conventional finishing presented polished areas after the engine test; parts with microprofiled finishing presented a homogeneous aspect, but these parts presented higher wear. The higher wear of the microprofiled bearings can be considered an advantage due to the higher conformability of these parts.

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|----------|------------------------------------------------------------------|----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA | 4 |
| 2.1 | Bronzina | 4 |
| 2.1.1 | Constituição de uma Bronzina / Características Estruturais | 6 |
| 2.1.2 | Propriedades | 8 |
| 2.2 | Lubrificação | 12 |
| 2.2.1 | Mecanismos de Pressurização | 13 |
| 2.2.2 | Regimes de Lubrificação | 15 |
| 2.3 | Projeto de Bronzinas | 21 |
| 2.4 | Determinação do Atrito entre Bronzina e Virabrequim | 27 |
| 2.5 | Desgaste por deslizamento lubrificado | 28 |
| 2.5.1 | Desgaste Adesivo | 30 |
| 2.5.2 | Fadiga de Contato | 31 |
| 2.5.3 | Reação Triboquímica | 32 |
| 2.5.4 | Desgaste Abrasivo | 33 |
| 2.5.5 | Desgaste em Mancais de Deslizamento | 34 |
| 2.6 | Acabamento superficial | 39 |
| 2.7 | Resistência ao Engripamento | 43 |
| 2.8 | Influência do Acabamento no Desempenho das Bronzinas | 44 |

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.8.1 | Desempenho de Bronzinas Mandriladas x Brochadas | 46 |
| 2.8.2 | Desempenho de Bronzinas Microperfiladas x Brochadas | 57 |
| 2.8.3 | Compatibilidade Bronzina x Virabrequim | 69 |
| 2.9 | Tendências..... | 71 |
| 3 | OBJETIVOS..... | 78 |
| 4 | PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 85 |
| 4.1 | Teste de bancada | 85 |
| 4.1.1 | Descrição do Equipamento | 85 |
| 4.1.2 | Procedimento de Teste | 87 |
| 4.1.3 | Caracterização das Amostras | 88 |
| 4.2 | Testes de Motor..... | 92 |
| 4.2.1 | Descrição do Teste | 92 |
| 4.2.2 | Caracterização das amostras | 93 |
| 4.2.3 | Caracterização do Virabrequim..... | 95 |
| 4.2.4 | Avaliação de Rugosidade das Peças Após Teste | 97 |
| 5 | RESULTADOS..... | 98 |
| 5.1 | Teste de Bancada..... | 98 |
| 5.1.1 | Avaliação de Temperatura | 98 |
| 5.1.2 | Avaliação da Capacidade de Carga..... | 102 |
| 5.1.3 | Análise Visual das Peças Testadas..... | 103 |
| 5.1.3.1 | Análise de Superfície – Bronzinas com Acabamento Convencional. | 104 |
| 5.1.3.2 | Análise de Superfície – Bronzinas com Acabamento Microperfilado | 109 |
| 5.1.3.3 | Análise de Superfície – Eixo..... | 111 |
| 5.2 | Teste de Motor | 116 |
| 5.2.1 | Avaliação Visual | 116 |
| 5.2.2 | Avaliação de Rugosidade..... | 117 |
| 5.2.2.1 | Peças com Acabamento Convencional | 117 |
| 5.2.2.2 | Peças com Acabamento Microperfilado | 120 |

| | | |
|----------|----------------------------------------------|------------|
| 5.2.3 | Avaliação de Desgaste | 123 |
| 6 | DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 128 |
| 6.1 | Testes de Bancada | 128 |
| 6.2 | Teste de Motor | 132 |
| 7 | CONCLUSÕES | 134 |
| 8 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 135 |
| 9 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 136 |

ANEXO I – PROCEDIMENTO DE TESTE DE MOTOR

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1: Distribuição típica de energia em um motor de combustão interna (Taylor, 1998). | 1 |
| Figura 1.2: Distribuição de potência em um automóvel circulando numa cidade (Andersson, 1991). | 2 |
| Figura 2.1: Virabrequim – Colos centrais (A) e colos de biela (B). | 4 |
| Figura 2.2: Virabrequim – Montado com bielas e pistões (Metal Leve, 1996). | 5 |
| Figura 2.3: Montagem da bronzina na biela (Metal Leve, 1996)..... | 5 |
| Figura 2.4: Esquema – Bronzina Bimetálicas. | 7 |
| Figura 2.5: Esquema – Bronzina Trimetálicas. | 7 |
| Figura 2.6: Efeito cunha (Duarte, 2001). | 13 |
| Figura 2.7: Efeito de prensamento do fluido lubrificante (Duarte, 2001)..... | 14 |
| Figura 2.8: Regime de Lubrificação para componentes de motor (Rosenberg, 1982). | 15 |
| Figura 2.9: Coeficiente de atrito x parâmetro de filme (Tomanik, 2000)..... | 16 |
| Figura 2.10: Contato entre superfícies (Rosenberg, 1982) | 19 |
| Figura 2.11: Modelo de Lubrificação Hidrodinâmica – Fluido Lubrificante entre duas Placas paralelas em Movimento Relativo (Vickery, 1975)..... | 19 |
| Figura 2.12: Tensão Cisalhante de um Fluido Newtoniano (Vickery, 1975) | 20 |
| Figura 2.13: Forças no Sistema Bronzina x Virabrequim (Basshuysen e Schäfer, 2004) | 21 |
| Figura 2.14: Fluxograma de Dimensionamento de Bronzinas – Método HL. | 22 |
| Figura 2.15: Exemplo de gráfico ilustrando a órbita descrita pelo eixo num ciclo do motor (Zottin, 2001)..... | 23 |
| Figura 2.16: MOFT em função da folga diametral (Zottin, 2001)..... | 23 |
| Figura 2.17: Gráfico de POFP em Função da Folga Diametral (Zottin, 2001)..... | 24 |
| Figura 2.18: Fluxograma Cálculo EHL de Bronzinas (Zottin, 2001). | 25 |
| Figura 2.19: Comparação de Resultados – HL x EHL (Zottin, 2001)..... | 25 |
| Figura 2.20: Variação da Pressão no Filme de Óleo e da Espessura – HL x EHL (Zottin, 2001) | 26 |
| Figura 2.21: Tribossistema – Desgaste por Deslizamento (Ludema, 1992) | 29 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.22: Fatores que influenciam o mecanismo de desgaste durante contato deslizante (Zum Gahr, 1987)..... | 29 |
| Figura 2.23: Contato entre dois corpos sólidos e a transferência de uma partícula por desgaste adesivo. (a) Superfícies em contato sem carregamento. (b) Aplicação de carga P ocasiona deformação plástica e solda a frio. (c) Movimento de deslizamento e carga produzem um aumento de tensão. (d) Partículas são transferidas pela ruptura das asperezas na junção (Collins, 1993)..... | 30 |
| Figura 2.24: Mecanismo de Desgaste por Fadiga Superficial (t1) formação da trinca, (t2) propagação da trinca, (t3) destacamento de material (Bayer, 1997). | 31 |
| Figura 2.25: Mecanismo de Desgaste Oxidativo (t1) remoção da partícula de óxido, (t2) formação de nova camada de óxido, (t3) interação entre asperezas (Bayer, 1997) | 32 |
| Figura 2.26: Mecanismo de Abrasão: (a) abrasão a dois corpos, (b) abrasão a três corpos, (c) erosão (Hutchings, 1992). | 33 |
| Figura 2.27: Engripamento na superfície de uma bronzina. | 36 |
| Figura 2.28: Imagens de MEV – Superfície eixo virabrequim após ocorrência de engripamento..... | 36 |
| Figura 2.29: Análise de EDS (MEV) – Colo do Virabrequim..... | 36 |
| Figura 2.30: Riscamento na superfície de uma bronzina. | 37 |
| Figura 2.31: Presença de partícula de Fe na superfície de uma bronzina. | 37 |
| Figura 2.32: Polimento na superfície de uma bronzina. | 38 |
| Figura 2.33: Fadiga de contato na superfície de uma bronzina – Destacamento de liga..... | 38 |
| Figura 2.34: Bronzina Brochada – Acabamento Transversal | 40 |
| Figura 2.35: Bronzina Mandrilada – Acabamento Longitudinal | 40 |
| Figura 2.36: Área de Contato Típica para superfícies orientadas longitudinal ($\gamma > 1$), isotrópica ($\gamma = 1$) e transversal ($\gamma < 1$) – (Patir e Cheng, 1978a) | 42 |
| Figura 2.37: Efeito do Acabamento Superficial da Bronzina na Temperatura (Sorab e Kocek, 1998)..... | 45 |
| Figura 2.38: Efeito do Acabamento Superficial da Bronzina no Atrito (Sorab e Korcek, 1998) | 45 |
| Figura 2.39: Esquema do Equipamento de Teste de Bancada (Ni e Cheng, 1996a).. | 46 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.40: Ensaio de Engripamento – Gráfico Típico Durante Aumento Gradual de Carregamento (Ni e Cheng, 1996a). | 49 |
| Figura 2.41: Resultados Teste de Bancada – Resistência ao Engripamento (Ni e Cheng, 1996a). | 50 |
| Figura 2.42: Capacidade de Carga de Bronzinas com rugosidades $\gamma=9$ e $0,11$ comparada com superfície com rugosidade isotrópica (Ni e Cheng, 1996a)..... | 51 |
| Figura 2.43: Diferença de Temperatura nas Costas das Bronzinas Comparada com a Temperatura do Óleo do Teste (Ni e Cheng, 1996a) | 52 |
| Figura 2.44: Testes de Bancada - Resistência ao Engripamento (Ni e Cheng, 1996b). | 54 |
| Figura 2.45: Gráfico Típico – Ensaio de Bronzinas CuPb (Ni e Cheng, 1996b)..... | 54 |
| Figura 2.46: Gráfico Típico – Ensaio de Bronzinas AlSn - BA1 (Ni e Cheng, 1996b). | 56 |
| Figura 2.47: Superfície de Bronzina (a) Microperfilada (b) Brochada..... | 57 |
| Figura 2.48: Espessura Mínima do Filme de Óleo (Watabane et al, 2000). | 59 |
| Figura 2.49: Espessura do filme de Óleo x Largura da Bronzina (Watanabe et al, 2000) | 59 |
| Figura 2.50: Pressão do Filme de Óleo x Largura da Bronzina (Watanabe et al, 2000) | 60 |
| Figura 2.51: Máxima Pressão do Filme de Óleo (Watanabe et al, 2000) | 61 |
| Figura 2.52: Fluxo de Óleo (Watanabe et al, 2000)..... | 61 |
| Figura 2.53: Torque de Atrito (Watanabe et al, 2000)..... | 62 |
| Figura 2.54: Resultados Típicos de Atrito – Bronzinas Microperfiladas e Brochadas (Kumada et al, 1996)..... | 65 |
| Figura 2.55: Variação da Temperatura x Rotação (Kumada, 1996) | 67 |
| Figura 2.56: Esquema Equipamento – Avaliação de Resistência ao Engripamento (Kumada et al, 1996)..... | 67 |
| Figura 2.57: Resistência ao Engripamento – Bronzina Microperfilada x Brochada (Kumada et al, 1996)..... | 68 |
| Figura 2.58: Influência do Acabamento do Eixo na Força de Atrito (Sorab e Korcek, 1998). | 70 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.59: Influência do Acabamento Superficial do Eixo no Carregamento Suportado até o Engripamento (Sorab e Korcek, 1998) | 70 |
| Figura 2.60: Perfis de Rugosidade Diferentes com Mesmo Valor de Ra (Chavarria,1995) | 71 |
| Figura 2.61: Análise 3D de Superfície de Bronzina Microperfilada (WLI) – 2,5X .. | 72 |
| Figura 2.62: Comparativo – Área de Contato – Bronzina Convencional x Microperfilada..... | 72 |
| Figura 2.63: Custo para Bronzinas de Mesmo Diâmetro (Basshuysen e Schäfer 2004) | 73 |
| Figura 2.64: Taxa de Desgaste de Bronzinas ¹ (Basshuysen e Schäfer 2004). | 75 |
| Figura 2.65: Capacidade de Carga para Diferentes Materiais de Bronzinas ¹ (Basshuysen e Schäfer 2004). | 75 |
| Figura 2.66: Exemplo de Texturização em estudo no NIST (Hsu, 2004). | 77 |
| Figura 2.67: Variação do Fator de Fluxo de acordo com a espessura do filme de óleo e da texturização (Lagemann, 2000). | 77 |
| Figura 3.1: Posicionamento dos Testes Realizados nas Referências Bibliográfica ... | 82 |
| Figura 4.1: Equipamento Utilizado | 86 |
| Figura 4.2: Detalhe do equipamento utilizado | 86 |
| Figura 4.3: Esquema de Aplicação de Carga - Equipamento Mautus..... | 87 |
| Figura 4.4: Diagrama de carregamento – Ensaio de Bancada | 88 |
| Figura 4.5: Perfil de rugosidade típico – Acabamento Convencional | 89 |
| Figura 4.6: Perfil ce rugosidade típico – Acabamento Microperfilado..... | 89 |
| Figura 4.7: Seção Transversal Material Bimetálico. | 90 |
| Figura 4.8: Seção Transversal Material Bimetálico. | 90 |
| Figura 4.9: Seção Transversal Material Bimetálico | 91 |
| Figura 4.10: Avaliação do Tamanho das Partículas de Si na Liga..... | 91 |
| Figura 4.11: Perfil de rugosidade típico – Acabamento Convencional | 94 |
| Figura 4.12: Perfil de rugosidade típico – Acabamento Microperfilado | 94 |
| Figura 4.13: Perfil Típico de Bronzina – Diâmetro Interno (liga). | 95 |
| Figura 4.14: Colo de Biela – Perfil Típico de Rugosidade. | 95 |
| Figura 4.15: Perfil Típico de Colo de Biela. | 96 |
| Figura 4.16: Representação da Curva de Fração de Contato (DIN / ISO 4287). | 97 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 5.1: Avaliação de Temperatura – Bronzinas Convencionais..... | 99 |
| Figura 5.2: Avaliação de Temperatura – Bronzinas Microperfiladas..... | 100 |
| Figura 5.3: Avaliação de Temperatura nas Bronzinas | 101 |
| Figura 5.4: Carregamento Máximo – Convencional x Microperfilada..... | 102 |
| Figura 5.5: Bronzinas com acabamento Convencional após teste de Bancada..... | 103 |
| Figura 5.6: Bronzinas Microperfiladas após teste de Bancada. | 104 |
| Figura 5.7: Visual Peça #5 – Acabamento Convencional | |
| Ocorrência de Engripamento na Borda | 105 |
| Figura 5.8: MEV/BSE - Peça Convencional – Região com Engripamento | 105 |
| Figura 5.9: MEV/BSE - Peça Convencional – Região com Engripamento – Detalhe | |
| | 106 |
| Figura 5.10: MEV/BSE - Peça Convencional – Região com Engripamento | |
| Detalhe da Remoção de Material | 106 |
| Figura 5.11: MEV/EDS – Região Clara na Superfície da Peça Convencional..... | 107 |
| Figura 5.12: Visual Peça #3 – Acabamento Convencional..... | 107 |
| Figura 5.13: MEV/BSE - Peça Convencional – Região com Forte Marcação | 108 |
| Figura 5.14: MEV/BSE - Peça Convencional – Região com Forte Marcação – | |
| Detalhe | 108 |
| Figura 5.15: Visual Peça #3 – Acabamento Microperfilado | |
| Forte Marcação nas Bordas..... | 109 |
| Figura 5.16: Visual Peça #4 – Acabamento Microperfilado | |
| Forte Marcação nas Bordas..... | 109 |
| Figura 5.17: MEV/BSE - Peça Microperfilada – Região com Forte Marcação..... | 110 |
| Figura 5.18: MEV/BSE - Peça Microperfilada – Região com Forte Marcação - | |
| Detalhe | 110 |
| Figura 5.19: Superfície Eixo – Após Engripamento | 111 |
| Figura 5.20: MEV/SEI – Superfície Eixo – Após Engripamento | 111 |
| Figura 5.21: MEV/SEI – Superfície Eixo – Após Engripamento – Região A | |
| Presença de Estanho | 112 |
| Figura 5.22: MEV/EDS – Estanho na Superfície do Eixo Após Engripamento..... | 112 |
| Figura 5.23: MEV/SEI – Superfície Eixo – Após Engripamento – Região B | |
| Presença de Alumínio | 113 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 5.24: MEV/EDS – Alumínio na Superfície do Eixo Após Engripamento ... | 113 |
| Figura 5.25: MEV/EDS – Superfície do Eixo – Material Base | 114 |
| Figura 5.26: Superfície Eixo – Após Teste sem Engripamento | 114 |
| Figura 5.27: MEV/SEI – Superfície de Eixo sem Engripamento | 115 |
| Figura 5.28: MEV/BSE – Superfície de Eixo sem Engripamento | 115 |
| Figura 5.29: Aspecto Visual das peças após teste de Motor..... | 116 |
| Figura 5.30: Detalhe Visual das peças após teste de Motor..... | 117 |
| Figura 5.31: Regiões de avaliação de rugosidade..... | 117 |
| Figura 5.32: Perfil de rugosidade – Região A – Acabamento Convencional | 118 |
| Figura 5.33: Foto – Região A – Acabamento Convencional | 118 |
| Figura 5.34: Perfil de rugosidade – Região B – Acabamento Convencional..... | 119 |
| Figura 5.35: Foto – Região B – Acabamento Convencional | 119 |
| Figura 5.36: Perfil de Rugosidade – Região C – Acabamento Convencional | 120 |
| Figura 5.37: Foto – Região C – Acabamento Convencional | 120 |
| Figura 5.38: Perfil de rugosidade – Região A – Acabamento Microperfilado | 121 |
| Figura 5.39: Foto – Região A – Acabamento Microperfilado | 121 |
| Figura 5.40: Perfil de rugosidade – Região B – Acabamento Microperfilado..... | 122 |
| Figura 5.41: Foto – Região B – Acabamento Microperfilado | 122 |
| Figura 5.42: Perfil de rugosidade – Região C – Acabamento Microperfilado..... | 123 |
| Figura 5.43: Foto – Região C – Acabamento Microperfilado | 123 |
| Figura 5.44: Ilustração do desgaste – Peça com Acabamento Convencional..... | 124 |
| Figura 5.45: Ilustração do Desgaste – Peças com Acabamento Microperfilado..... | 124 |
| Figura 5.46: Avaliação de Tp (%) após Teste..... | 127 |
| Figura 6.1: Comparação dos Valores de B/D das Peças Testadas em Bancada. | 130 |
| Figura 6.2: Perfil - Bronzina com Acabamento Convencional..... | 130 |
| Figura 6.3: Perfil – Bronzina com Acabamento Microperfilado. | 131 |
| Figura 6.4: Configuração Bronzina – Colo de Virabrequim..... | 132 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 2.1: Materiais para Aplicação em Bronzinas (Basshuysen and Schäfer, 2004) | 8 |
| Tabela 2.2: Valores Típicos para as Aplicações Mais Comuns de Bronzinas em Motores de Combustão Interna. (Basshuysen and Schäfer, 2004) | 11 |
| Tabela 2.3: Parâmetros de Teste (Ni e Cheng, 1996a) | 47 |
| Tabela 2.4: Composição Química das Ligas Testadas (Ni e Cheng, 1996a) | 47 |
| Tabela 2.5: Rugosidade Ra (μm) das Peças AL1 Testadas (Ni e Cheng, 1996a) | 48 |
| Tabela 2.6: Acabamento superficial das bronzinas e eixos testados por Ni e Cheng (1996b) – Avaliado no sentido axial | 53 |
| Tabela 2.7: Condições de Cálculo (Watanabe, 2000) | 58 |
| Tabela 2.8: Características das Bronzinas Microperfiladas Testadas (Kumada et al, 1996) | 63 |
| Tabela 2.9: Condições do Teste de Verificação do Coeficiente de Atrito (Kumada et al, 1996) | 64 |
| Tabela 2.10: Condições do Experimento para Verificação da Temperatura em Bronzinas (Kumada et al, 1996) | 66 |
| Tabela 2.11: Condições do Experimento de Retenção de Óleo (Kumada et al, 1996) | 68 |
| Tabela 3.1: Comparação dos Resultados das Referências Bibliográfica | 81 |
| Tabela 3.2: Comparação dos Materiais e Acabamentos Testados | 83 |
| Tabela 4.1: Condições de Teste de Bancada | 87 |
| Tabela 4.2: Características das Peças Testadas em Bancada | 88 |
| Tabela 4.3: Características do Acabamento Superficial – Microperfilada x Convencional | 89 |
| Tabela 4.4: Características do motor utilizado para teste | 92 |
| Tabela 4.5 : Configuração das bronzinas de biela em teste de motor | 93 |
| Tabela 4.6: Características das Bronzinas – Teste de Motor | 93 |
| Tabela 4.7: Caracterização das superfícies – amostras testadas | 94 |
| Tabela 4.8: Avaliação de Rugosidade – Colos de Biela | 96 |
| Tabela 5.1: Avaliação de Temperatura nas Bronzinas ($^{\circ}\text{C}$) | 101 |
| Tabela 5.2: Avaliação de Carregamento Máximo – Convencional x Microperfilada | 102 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 5.3: Capacidade de Carga – Microperfilada x Convencional..... | 103 |
| Tabela 5.4: Avaliação de Rugosidade – Acabamento Convencional | 118 |
| Tabela 5.5: Avaliação de Rugosidade – Acabamento Microperfilado | 121 |
| Tabela 5.6: Avaliação de Tp – Bronzinas Novas..... | 125 |
| Tabela 5.7: Avaliação de Tp – Bronzinas Convencionais Após Teste | 125 |
| Tabela 5.8: Avaliação de Tp – Bronzinas Microperfiladas Após Teste | 126 |
| Tabela 6.1: Comparação de Valores de Largura/Diâmetro de Peças Testadas em Bancada..... | 129 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|------|----------------------------------------------------------------|
| 3D | Tridimensional |
| AL1 | Liga de Alumínio 1 |
| AL2 | Liga de Alumínio 2 |
| AL3 | Liga de Alumínio 3 |
| ATDC | Após o Ponto Morto Superior (After Top Dead Center) |
| BA1 | Liga de Alumínio (AlSn) |
| BA2 | Liga de Alumínio (AlSnSi) |
| BCH | Brochada (Broached) |
| BCL | Bronzina Trimetálica – CuPb |
| BRD | Mandrilada (Bored) |
| BSE | Imagem de Elétrons Retroespalhados |
| EDS | Sistema de Análise por Dispersão de Energia |
| EHL | Elastohidrodinâmico |
| F1 | Acabamento Superficial do Eixo – Tipo 1 |
| F2 | Acabamento Superficial do Eixo – Tipo 2 |
| HL | Hidrodinâmico |
| MEV | Microscópio Eletrônico de Varredura |
| MOFT | Espessura Mínima do Filme de Óleo (Minimum Oil Film Thickness) |
| NC1 | Material do Eixo – Ferro Fundido Nodular 1 |
| NC2 | Material do Eixo – Ferro Fundido Nodular 1 |
| PMI | Ponto Morto Inferior |
| PMS | Ponto Morto Superior |
| POFP | Máxima Pressão no Filme de Óleo (Peak Oil Film Pressure) |
| PVD | Deposição Física do Vapor (Physical Vapor Deposition) |
| SEI | Imagens de Elétrons Secundários |
| THD | Termo Hidrodinâmica |
| WLI | Interferômetro de Luz Branca (White Light Interferometer) |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------|------------------------------------------|
| B | Largura da Bronzina (mm) |
| D | Diâmetro da Bronzina (mm) |
| μ | Viscosidade Absoluta |
| U | Velocidade de Rolamento |
| h | Espessura do Filme de Óleo |
| p | Pressão Hidrodinâmica |
| P | Carga Unitária |
| t | Parâmetro de Filme |
| R_{comb} | Rugosidade Combinada |
| Rq | Rugosidade Média Quadrática |
| $y(x)$ | Desvios do Perfil de Rugosidade |
| f | Coefficiente de Atrito Total |
| f_s | Coefficiente de Atrito Seco metal-metal |
| f_L | Coefficiente de Atrito Hidrodinâmico |
| α | Constante de Atrito metal-metal |
| A_r | Área Real de Contato |
| F_n | Carregamento Normal |
| σ_m | Tensão de Escoamento do Material |
| F_t | Força Tangencial |
| τ_m | Tensão de Cisalhamento do Material |
| du/dy | Gradiente de Velocidade Através do Filme |
| F_a | Força de Atrito |
| D_b | Diâmetro da Bronzina |
| L_b | Comprimento da Bronzina |
| \bar{h} | Folga Radial Média |
| N | Rotação do Eixo |
| ϕ_x | Fator de Fluxo de Pressão na Direção x |
| ϕ_y | Fator de Fluxo de Pressão na Direção y |
| ϕ_s | Fator de Fluxo de Cisalhamento |

| | |
|-------------|------------------------------------------------|
| \bar{p} | Pressão Hidrodinâmica Média |
| \bar{h}_T | Espessura Média de Filme de Óleo |
| σ | Rugosidade Média Quadrática Composta |
| γ | Parâmetro de Superfície |
| λ | h_{\min}/σ |
| W/W_i | Capacidade de Carga |
| A_C/A_0 | Área de Contato Real / Área de Contato Nominal |
| T_p | Perfil de Apoio |
| C | Linha de Corte |
| C_{ref} | Linha de Referência |

1 INTRODUÇÃO

Motores de combustão interna estão sendo projetados para serem cada vez mais eficientes e compactos, a fim de proporcionar menor consumo de combustível e menor nível de ruído. Do ponto de vista tribológico (atrito, desgaste e lubrificação), estas novas condições de projeto significam um aumento de carregamento, rotação e temperatura para a maior parte dos componentes do motor, como pistão, anéis, trem de válvulas e bronzinas, e menor viscosidade do óleo lubrificante destes sistemas. Tem-se uma diminuição da espessura do filme de óleo entre as superfícies destes componentes e um papel mais importante da topografia e perfil das superfícies na determinação do desempenho dos sistemas (Massey et al, 1990).

Nas últimas duas décadas, foram realizados muitos estudos com relação ao atrito em componentes de motores (Taylor, 1998). Na Fig. 1.1 é ilustrada a perda de potência em um motor a gasolina de médio porte. A Fig. 1.2 (Andersson, 1991) mostra a distribuição de potência em um automóvel circulando numa cidade. Nota-se que somente 12% (3,8kW) da energia gerada pelo combustível é transmitida para as rodas, 15% (4,9kW) está sendo dissipada por perdas, principalmente por atrito.

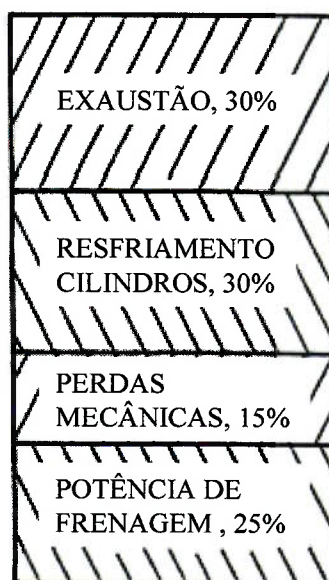


Figura 1.1: Distribuição típica de energia em um motor de combustão interna (Taylor, 1998).

Conforme a Fig. 1.2, a maior fonte de perda de potência são os anéis de pistão, seguidos pelas bronzinas, pelo sistema de válvulas, sistemas auxiliares e transmissão. Os sistemas auxiliares incluem bomba de óleo, sistema de refrigeração, etc. Exceto por algumas perdas auxiliares, todas estas perdas podem ser consideradas tribológicas por natureza. Cerca de 2/3 das perdas ocorrem em regime de lubrificação hidrodinâmica e 1/3 em lubrificação mista (Andersson, 1991).

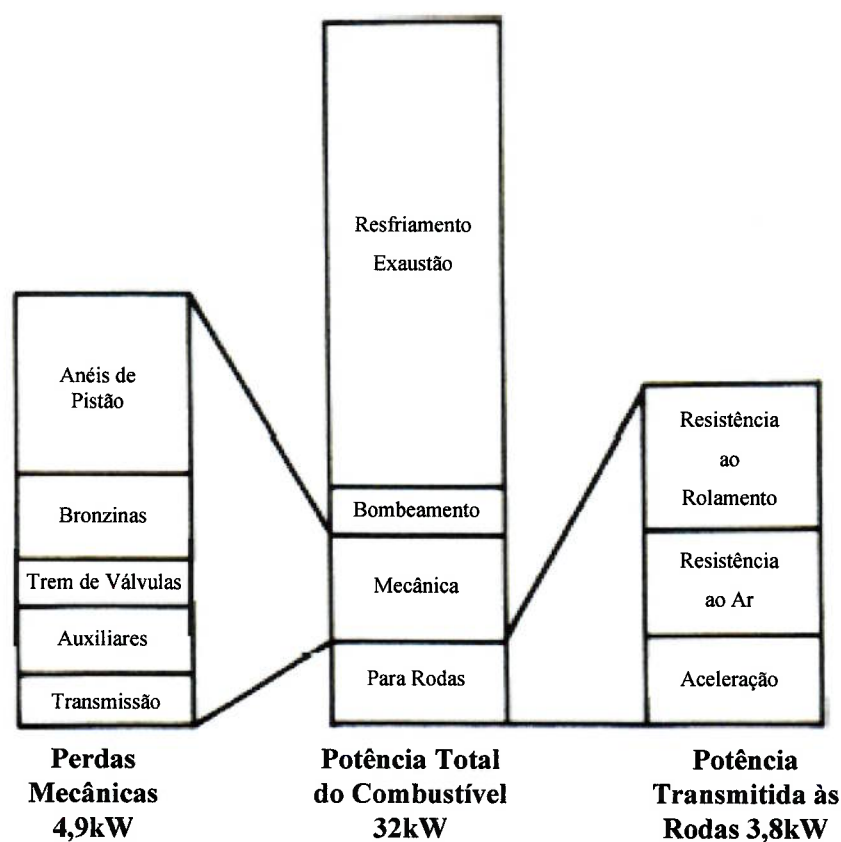


Figura 1.2: Distribuição de potência em um automóvel circulando numa cidade (Andersson, 1991).

Segundo Andersson (1991), se perdas por atrito no motor e na transmissão forem reduzidas, o consumo de combustível poderia diminuir. Isto também levaria a uma redução de emissões e a máxima potência efetiva do motor seria maior, levando a uma melhoria do desempenho do veículo.

A redução de perdas mecânicas em 10% resultaria num decréscimo no consumo de combustível da ordem de 3%. Assumindo uma média de consumo de combustível

de 10 km/litro e uma distância percorrida na vida útil do motor de 200.000 km, ter-se-ia uma economia de 600 litros de combustível neste período. Estes ganhos substanciais, se atingidos, reduziriam a utilização de recursos naturais.

Para atender a esta demanda de redução de atrito em motores de combustão interna, as bronzinas (mancais do virabrequim) estão mais estreitas e devem trabalhar também com folgas diametrais menores. Como resultado, estão sujeitas a maiores carregamentos, maiores temperaturas de trabalho e correm maiores riscos de falhar por fadiga ou engripamento. Para evitar estes tipos de falhas, segundo Desaki e Kamiya (2000), pode-se optar por utilizar materiais melhores ou reduzir as áreas de contato localizado durante o período de amaciamento, a fim de melhorar a conformabilidade da peça.

Sorab e Korcek (1998) mencionam que é possível melhorar a capacidade de carga de uma bronzina através da redução de folgas e modificação do acabamento superficial da bronzina e do eixo virabrequim. Estas ações podem contribuir para estender a transição do regime de lubrificação do regime hidrodinâmico para o regime misto em baixa rotação e altos carregamentos, resultando em menor perda de potência por atrito.

Uma outra proposta para otimizar o funcionamento de uma bronzina pela modificação do acabamento superficial foi apresentada por Kumada et al (1996). A produção de bronzinas com microperfilamento (usinagem que permite a formação de microcanais na superfície da peça) pode permitir um melhor fluxo de óleo e uma maior dissipação de calor do sistema bronzina / virabrequim.

Este trabalho visa comparar o desempenho de bronzinas com dois tipos de acabamento diferentes, convencional e microperfilado, ambos produzidos pelo mesmo processo de fabricação, mandrilamento.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Bronzina

Bronzina é um mancal de deslizamento bi-partido, que tem como função principal reduzir o atrito entre uma parte móvel de um motor e a parte estática a este ligada; além disto, ela deve suportar a parte móvel. Esta última função exige que a bronzina resista a cargas unitárias elevadas, de 50MPa a 90MPa (Basshuysen and Schäfer, 2004), devido à pressão de combustão do motor.

A bronzina de um motor de combustão interna pode ser classificada como central ou de biela, ou seja, está entre os mancais centrais do bloco do motor e o virabrequim ou entre os colos de biela e o olhal maior da biela, respectivamente. Na Fig. 2.1 pode-se observar a configuração do virabrequim e a Fig. 2.2 apresenta a montagem do virabrequim mais o conjunto biela / pistão.

As bronzinas de biela são mancais que são submetidos a um carregamento radial. A Fig. 2.3 ilustra a montagem da bronzina no olhal maior da biela.

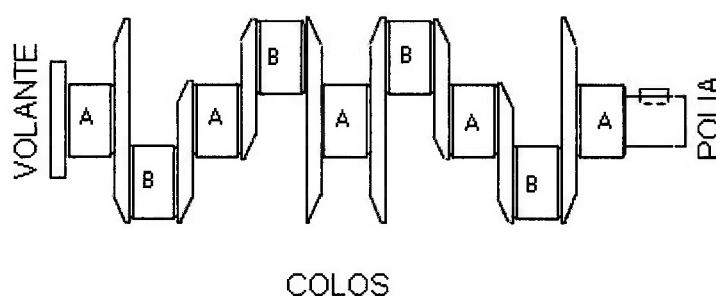


Figura 2.1: Virabrequim – Colos centrais (A) e colos de biela (B).

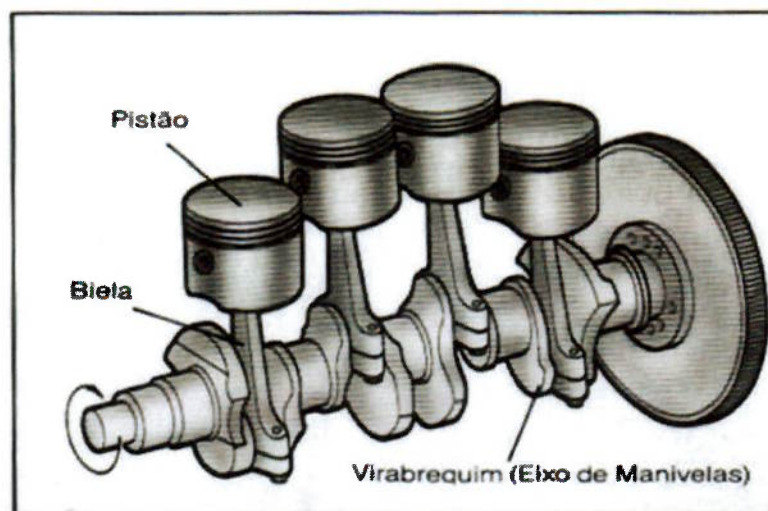


Figura 2.2: Virabrequim – Montado com bielas e pistões (Metal Leve, 1996).

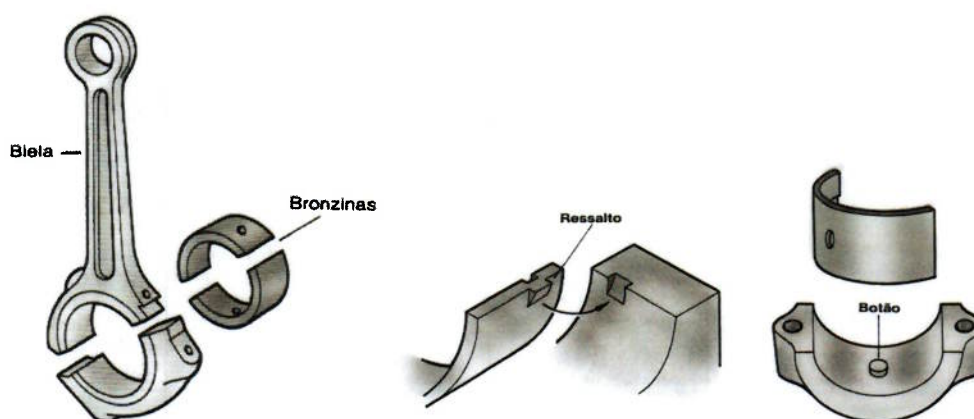


Figura 2.3: Montagem da bronzina na biela (Metal Leve, 1996).

Em bronzinas, o carregamento é transmitido entre partes em movimento pelo contato deslizante e o critério de desempenho satisfatório é o mínimo desgaste dos componentes, juntamente com a ausência de engripamento e falhas por deformação ou fadiga. Para sustentar um eixo de aço ou ferro fundido, o material da bronzina deve ser comparativamente macio para evitar o desgaste do material mais duro (eixo), mas resistente o suficiente para suportar as cargas elevadas sem distorção ou fadiga. A compatibilidade entre os metais no contato por deslizamento é o fator dominante no desempenho do material da bronzina e do eixo (Scott, 1991b).

Embora uma bronzina possa realizar sozinha essa função de redução de atrito, seu desempenho pode ser melhorado pela adição de um fluido lubrificante, que é

inserido entre as peças rígidas, a fim de minimizar o atrito e, também, para diminuir a temperatura e o conseqüente desgaste e perda de potência. Caso haja rompimento do filme lubrificante, a bronzina sofre os danos que, de outro modo, iriam alcançar outros elementos móveis, de maior responsabilidade e custo, como o virabrequim e as bielas (Metal Leve, 1996).

2.1.1 Constituição de uma Bronzina / Características Estruturais

O uso de peças antifricção, que possam ser facilmente trocadas e de baixo custo (embora de alta precisão), generalizou-se em motores de combustão interna e também em outras aplicações. A diversidade de usos exigiu uma grande variedade de tipos e de formas, além do desenvolvimento de diversas ligas antifricção (Eston, 1966).

As bronzinas são geralmente classificadas de acordo com o material e o número de camadas que as constitui (Davis, 1994): sólida (único material), bimetálica (duas camadas) e trimetálica (três camadas). Estes termos indicam o número de camadas com função mecânica (suporte de carga) e não estão incluídas camadas de acabamento cosmético, camadas para proporcionar melhor adesão e zonas de difusão.

Segundo Glaeser (1992), bronzinas com multicamadas são compostas por finas camadas de materiais macios sobre uma capa de aço. A intenção é de aumentar a capacidade de carga do material macio e manter a embutibilidade e baixa propriedade ao cisalhamento da bronzina. Estas características serão melhor definidas no item 2.1.2. A resistência à fadiga também pode ser melhorada quando se utiliza a configuração trimetálica.

Segundo Davis (1994), bronzinas sólidas não têm boas propriedades superficiais e sua tolerância a condições de lubrificação com pouco filme de óleo é limitada.

As Fig. 2.4 e 2.5 mostram a constituição de bronzinas bimetálicas e trimetálicas.

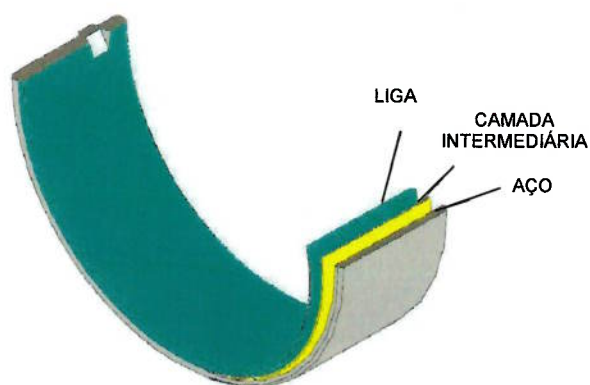


Figura 2.4: Esquema – Bronzina Bimetálicas.

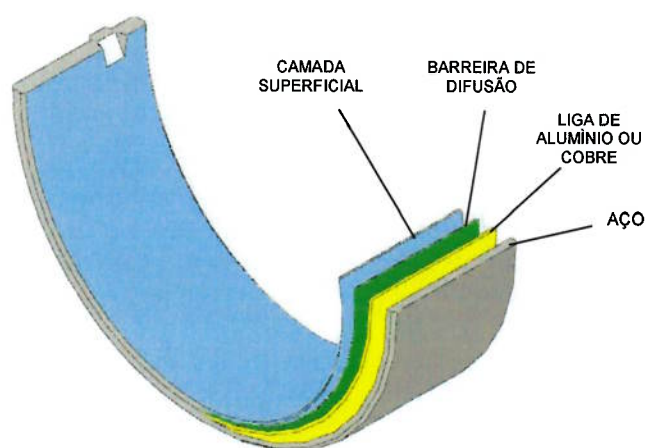


Figura 2.5: Esquema – Bronzina Trimetálicas.

Todas as bronzinas bimetálicas são constituídas por uma capa de aço e uma liga (camada antifricção) de alumínio ou cobre metalurgicamente aderidas (colaminação ou fusão). Pode existir também uma camada intermediária que facilite a adesão da camada de aço com a camada de liga. Os aços mais utilizados são os de baixo teor de carbono, devido à sua boa conformabilidade.

As bronzinas trimetálicas também são constituídas por uma camada estrutural de aço, uma camada de liga (geralmente, bronze) e uma camada muito fina ($\sim 0,025\text{mm}$) de liga superficial (de estanho e/ou chumbo) eletrodepositada, denominada overlay. Esta última camada promove nestas bronzinas maior resistência à fadiga e um aumento de capacidade de carga, quando comparadas a bronzinas bimetálicas de constituição correspondente. Algumas vezes faz-se necessária à

presença de uma camada de níquel, que impede a difusão do estanho da camada eletrodepositada para a liga (Metal Leve, 1996).

Na Tabela 2.1 são apresentados os materiais mais comuns para aplicação em bronzinas (Basshuysen and Schäfer, 2004).

| | |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Ligas de Alumínio Fundidas - Laminadas | SAE 770 – 788 |
| AlSn40Cu, AlSn20Cu, AlSn6Cu | |
| AlSn12Si4, AlSn10NiMn | |
| AlZn4SiPb | |
| Bronze ao Chumbo - Fundidas ou Sinterizadas | DIN 1716, DIN-ISO 4283, 4383 SAE 790 – 798 |
| CuPb30 | |
| CuPb23Sn4, CuPb20Sn2 | |
| CuPb15Sn7, CuPb10Sn10 | |
| Overlays - Eletrodepositados | SAE 19 |
| PbSn8, PbSn10Cu2, PbSn16Cu3 | |
| PbIn9, SnSb12Cu | |
| Camada Sputter – Liga de Alumínio | |
| AlSn20Cu | |

Tabela 2.1: Materiais para Aplicação em Bronzinas (Basshuysen and Schäfer, 2004)

2.1.2 Propriedades

Como citado anteriormente, a função de uma bronzina é reduzir o atrito entre a parte móvel de um motor e a parte de suporte a ela associada. É evidente que uma bronzina deve resistir a uma variedade de condições impostas. Nenhuma bronzina é igualmente boa com relação a todas as características necessárias para uma determinada circunstância, portanto deve-se ter uma cuidadosa análise dos fatores mais críticos durante sua operação, para seleção do material mais apropriado (Wilson e Shone, 1991). Dentre as características necessárias, tem-se (Davis, 1994):

- Compatibilidade: habilidade de duas superfícies estarem em contato sem falha do sistema.
- Conformabilidade: habilidade de compensar desalinhamentos, propriedade do material assumir a forma do alojamento e/ou colos.
- Embutibilidade: capacidade de absorver partículas sólidas estranhas, que poderiam vir a riscar o eixo que a bronzina está suportando. O material da bronzina deve permitir que essas partículas fiquem embutidas em sua superfície e não entrem no sistema de lubrificação, podendo, assim, prejudicar outros componentes do motor.
- Capacidade de carga: máxima carga unitária sob a qual o material pode operar sem que ocorra atrito excessivo ou dano severo (engripamento). A carga unitária pode ser calculada pela Eq. 1:

$$Carga \cdot unitária = \left[\frac{Carregamento \cdot aplicado}{Área \cdot Projetada \cdot da \cdot Bronzina} \right] \quad (1)$$

Onde:

Área projetada da Bronzina = Largura da Bronzina x Diâmetro da Bronzina

No caso de motores de combustão interna, pode-se considerar a carga unitária como (Eq.2):

$$Carga \cdot unitária = \left[\frac{Pressão \cdot de \cdot Combustão \times Área \cdot do \cdot Pistão}{Área \cdot Projetada \cdot da \cdot Bronzina} \right] \quad (2)$$

- Resistência à fadiga: capacidade do material em resistir ao carregamento cíclico.
- Resistência à corrosão: resistência aos ácidos orgânicos e minerais, do óleo lubrificante e dos resíduos de combustão.

Nenhum material de bronzina combina todas as características desejadas (Eston, 1966). Contudo, as propriedades podem ser agrupadas em duas principais categorias. Uma que inclui as características de superfície, como resistência ao desgaste, compatibilidade com o eixo, conformabilidade e embutibilidade e outra

relacionada às propriedades mecânicas, como resistência à fadiga e capacidade de carga. Como estas duas categorias são divergentes, para melhorar uma característica de superfície, a resistência do material será prejudicada e vice-versa (Wilson e Shone, 1991). A Tabela 2.2 apresenta os valores típicos das condições de operação de bronzinas nos motores de combustão interna.

Segundo Wilson (1986), o critério usual para seleção de materiais de bronzinas é o desempenho satisfatório com o mínimo de desgaste com atrito aceitável, juntamente com a resistência ao engripamento ou falha mecânica devido à deformação ou fadiga. Hoje em dia também se busca o baixo custo e a disponibilidade de material/processo. Todos os materiais de bronzinas procuram oferecer um compromisso entre ductilidade para evitar desgaste do contra-corpo e dureza para resistir ao carregamento excessivo, fadiga e abrasão.

| Tipo de Mancal | Condições de Operação | | | | Características Motor | |
|-------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| | Tipo de Movimento | Tipo de Carregamento | Velocidade (m/s) | Capacidade de Carga (N/mm ²) | Folga mín (%D) | Largura / Diâmetro (B/D) |
| Bucha de pino | Rotativo | Carga pulsante devido ao carregamento do pistão | 2 - 3 | 70 - 120 | 0,8 | < 1,0 |
| Bronzina de Biela | Rotativo não-uniforme | Carga pulsante devido ao carregamento do pistão e forças de inércia do eixo | 10 - 18 | 50 - 90 | 0,5 | 0,28 - 0,35 |
| Bronzina Central | Rotativo | Carga Pulsante devido ao carregamento das bronzinas de biela adjacentes | 12 - 20 | 40 - 60 | 0,8 | 0,25 - 0,32 |
| Bronzina Axial | Deslizamento | Carregamento de impacto, força de acoplamento | 15 - 24 | < 2 permanente < 5 breve < 12 impacto | - | - |

Tabela 2.2: Valores Típicos para as Aplicações Mais Comuns de Bronzinas em Motores de Combustão Interna. (Basshuysen and Schäfer, 2004)

2.2 Lubrificação

O objetivo principal da lubrificação é separar completamente as superfícies em contato, por um filme fluido; isto elimina o desgaste e reduz consideravelmente as perdas por atrito (Summers-Smith, 1994). Outras funções da lubrificação, segundo Basshuysen e Schäfer (2004), são:

- Transmissão de potência
- Amortecimento de impacto e vibrações
- Redução de ruído
- Resfriamento: dissipação de calor gerado por atrito
- Limpeza: liberação de partículas
- Proteção à corrosão

Embora uma bronzina possa realizar sozinha a função de redução de atrito entre o virabrequim e o alojamento, seu desempenho é melhorado pela adição de um lubrificante entre o eixo (parte móvel) e a superfície interna da bronzina. Por isso, um dos objetivos principais do projeto de uma bronzina é estabelecer e manter um filme de óleo entre essas superfícies, geralmente sob cargas variáveis (Metal Leve, 1996). Neste caso, o lubrificante pode ser considerado como um elemento de máquina (Basshuysen e Schäfer, 2004), pois nas bronzinas ele é responsável pela transmissão do movimento entre os componentes através de sua pequena espessura (milésimos de milímetros). Esta habilidade deriva de sua propriedade, viscosidade, que é a capacidade de resistir à mudança de forma.

As tensões de cisalhamento são responsáveis pelo trabalho de atrito (dissipação) na direção do movimento; esta energia cinética é transformada em calor e é perdida pelo sistema. No motor em operação, o atrito no fluido tem também um efeito prejudicial, já que a perda de energia por calor e o aumento de temperatura do lubrificante que podem alterar suas propriedades (Basshuysen e Schäfer, 2004).

2.2.1 Mecanismos de Pressurização

Para que seja possível separar as superfícies por um filme de óleo, é necessário gerar pressão neste filme. Isto pode ser feito externamente, ou através do movimento relativo entre as superfícies; o primeiro caso é denominado lubrificação hidrostática e o segundo lubrificação hidrodinâmica (Summers-Smith, 1994).

Pode-se considerar que as bronzinas são mancais hidrodinâmicos, que funcionam sem a necessidade de pressurização externa. Fisicamente, isto ocorre devido à velocidade relativa entre o eixo e o alojamento do mancal. A velocidade relativa entre estas duas partes pode causar dois fenômenos denominados “wedge”, ou efeito cunha, e “squeeze”, ou efeito de prensamento, do fluido lubrificante, que geram pressão interna no mesmo (Summers-Smith, 1994 e Duarte, 2001).

O efeito “wedge” pode ser melhor compreendido observando-se a Fig. 2.6. Devido à rotação do eixo, as moléculas do fluido (óleo) são levadas, por arraste, de uma região de maior volume pra uma região de menor volume gerando um aumento de sua pressão. Esta movimentação do fluido gera um gradiente de pressão hidrodinâmica, ou uma região de alta pressão entre as duas superfícies de deslizamento, o que tende a separar o eixo do seu alojamento. Se o mancal for devidamente projetado, não haverá contato entre ambas as partes e o atrito seco que haveria entre elas é substituído pelo atrito viscoso no fluido lubrificante.

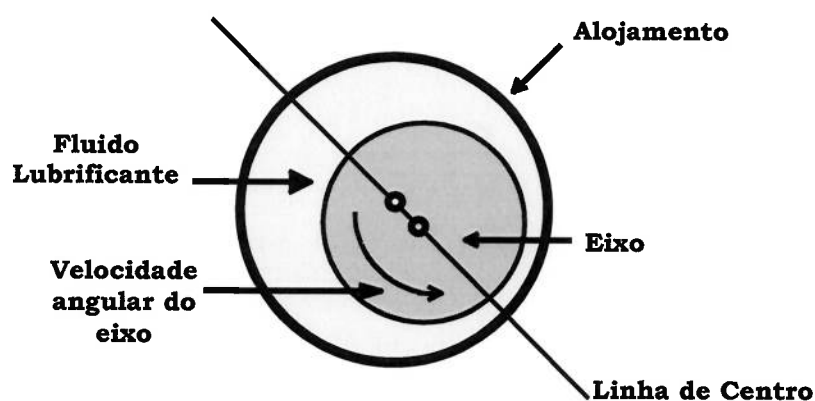


Figura 2.6: Efeito cunha (Duarte, 2001).

O efeito “squeeze” pode ser melhor entendido analisando-se a Fig. 2.7. Se durante o funcionamento do mancal, houver uma velocidade radial (U) do eixo, o fluido será prensado entre o eixo e o alojamento e a pressão hidrodinâmica aumentará drasticamente.

Assim como no caso anterior, essa pressão hidrodinâmica gera uma força que tende a separar o eixo do alojamento.

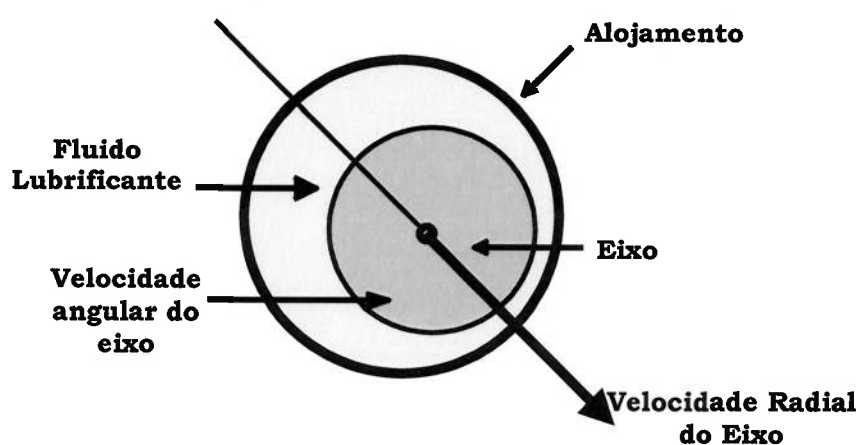


Figura 2.7: Efeito de prensamento do fluido lubrificante (Duarte, 2001).

A pressão que suporta a carga nominal num regime hidrodinâmico de lubrificação resulta das forças viscosas dentro do fluido lubrificante, que resultam do movimento relativo entre duas superfícies (Hutchings, 1992).

A distribuição de pressão dentro de um filme lubrificante hidrodinâmico é descrita pela Equação de Reynolds (Eq. 3), que foi derivada da equação de Navier-Stokes para um fluxo de fluido, assumindo: (i) que o fluxo é laminar, (ii) o fluido é incompressível e Newtoniano, (iii) que a espessura do filme é pequena quando comparada a outras dimensões do mancal, (iv) que as forças dominantes advêm da viscosidade.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{h^3}{12\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{h^3}{12\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \right] = \left(\frac{U_2 - U_1}{2} \right) \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

Onde:

μ = viscosidade absoluta

U = velocidade de rolamento $U = \left(\frac{U_1 + U_2}{2} \right)$

U_1 : velocidade de um dos componentes

U_2 : velocidade do outro componente

h = espessura nominal do filme de óleo

p = pressão hidrodinâmica

2.2.2 Regimes de Lubrificação

De acordo com Rosenberg (1982), um problema primário no entendimento do atrito em motor é a grande variação na magnitude das forças de atrito observadas. Isto ocorre devido à variação do coeficiente de atrito entre 0,2 para lubrificação limite e 0,01 para componentes que trabalham em condição de regime hidrodinâmico de lubrificação. A Fig. 2.8 ilustra o diagrama de Stribeck, que mostra a variação do coeficiente de atrito em função das condições de operação do sistema. Na figura, μ é a viscosidade absoluta, U é a velocidade relativa e P é a carga unitária.

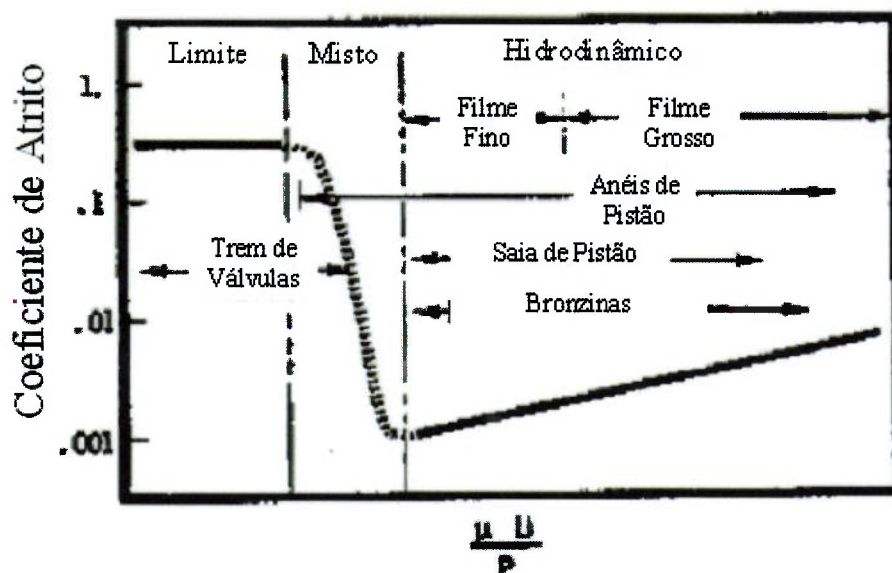


Figura 2.8: Regime de Lubrificação para componentes de motor (Rosenberg, 1982).

Para altas cargas e baixos valores de velocidade, ocorre o regime de lubrificação limite, onde o coeficiente de atrito é independente dos parâmetros de funcionamento.

Para contatos em altas velocidades, é possível que ocorra a separação das superfícies pela presença do filme de óleo, e o coeficiente de atrito é função das condições de operação. Com o aumento do carregamento num regime hidrodinâmico, há uma diminuição da espessura do filme de óleo. Sob estas condições de funcionamento, é possível que ocorra contato entre as asperezas de uma superfície sobre a outra. Esta condição também pode ser denominada de regime misto.

A condição desejada de funcionamento de um mancal de deslizamento é em regime hidrodinâmico, mas isto nem sempre ocorre. Wang (1997) menciona que condições de lubrificação mista e limite podem surgir devido ao processo de parada e re-início de operação do sistema e em condições severas de operação, por exemplo, quando há um suprimento de óleo insuficiente, altas temperaturas de trabalho e carregamento excessivo. Falhas por engripamento podem ser diretamente relacionadas com estas condições adversas.

A Fig. 2.9 (Tomanik, 2000) mostra a variação do coeficiente de atrito em função do parâmetro de filme de óleo (t), definido pela Eq. 4. Nota-se que o coeficiente de atrito total foi definido pela soma de uma parcela de contato rugoso e outra de contato hidrodinâmico. Se a espessura do filme de óleo for muito pequena, as asperezas podem ultrapassar o filme de óleo, acarretando um aumento do atrito e desgaste das superfícies.

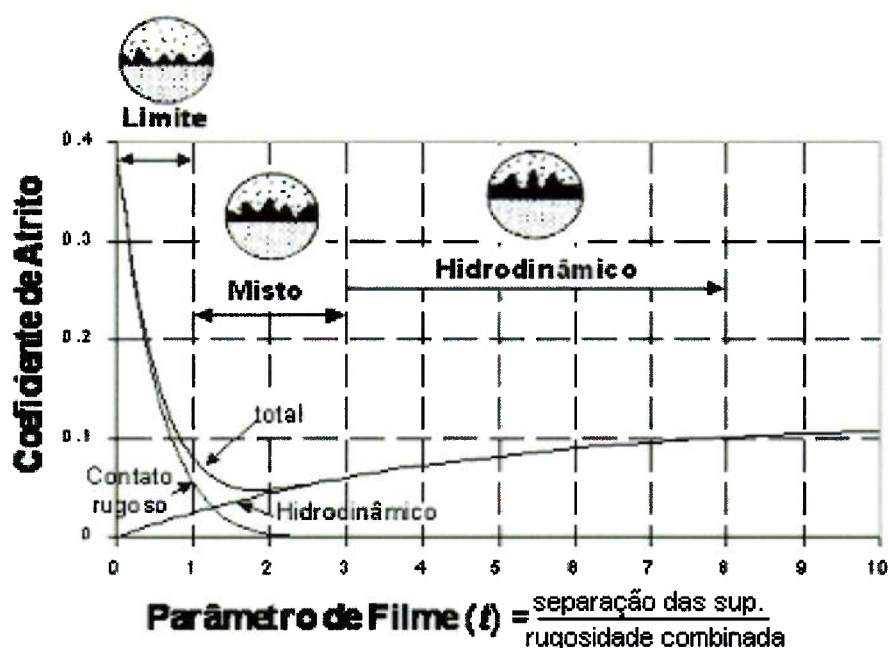


Figura 2.9: Coeficiente de atrito x parâmetro de filme (Tomanik, 2000)

$$t = \frac{h}{R_{comb}} \quad (4)$$

Na Eq. 4:

h: espessura do filme de óleo

R_{comb} : rugosidade combinada, definida por

$$R_{comb} = \sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2} \quad (5)$$

onde a rugosidade média (DIN 4762/1 E) R_q (Eq. 6) é o valor médio quadrático de todos os desvios do perfil de rugosidade “R” da reta média dentro do comprimento de medição “ l_m ”.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx} \quad (6)$$

$y(x)$: desvios do perfil de rugosidade

Segundo Heywod (1990), a equação de atrito total apresentada na Fig. 2.9 pode ser descrita pela Eq. 7:

$$f = \alpha f_s + (1 - \alpha) f_L \quad (7)$$

Onde:

f_s : coeficiente de atrito seco metal-metal

f_L : coeficiente de atrito hidrodinâmico

α : constante de atrito metal-metal (pode variar de 0 a 1)

Se $\alpha \rightarrow 1$, $f \rightarrow f_s$ e o atrito pode ser denominado atrito limite, ou seja, próximo ao atrito sólido. O filme de lubrificante é reduzido a uma ou poucas camadas de moléculas e não pode prevenir o contato metal-metal entre as asperezas das superfícies.

Se $\alpha \rightarrow 0$, $f \rightarrow f_L$, o atrito é denominado hidrodinâmico, pois o filme de lubrificante é suficientemente espesso para separar completamente as superfícies em movimento relativo.

Entre estes dois regimes existe o denominado regime misto, que seria a transição entre os regimes limite e hidrodinâmico.

Na condição de lubrificação limite, o atrito entre as duas superfícies em movimento relativo é determinado pelas propriedades das superfícies, bem como do lubrificante. As propriedades importantes da superfície a serem consideradas são: rugosidade, dureza, elasticidade, plasticidade, tensão de cisalhamento, condutividade térmica e molhabilidade com relação ao lubrificante.

Devido às asperezas da superfície, a área real de contato é muito menor que a área aparente de contato. A área real de contato A_r é igual ao carregamento normal F_n dividido pela tensão de escoamento do material σ_m (Heywood, 1990):

$$A_r = \frac{F_n}{\sigma_m} \quad (8)$$

A força necessária para promover o movimento tangencial é o produto da área real de contato pela tensão de cisalhamento do material τ_m :

$$F_t = A_r \cdot \tau_m \quad (9)$$

Com isto, pode-se determinar o coeficiente de atrito através da seguinte equação:

$$f = \frac{F_t}{F_n} = \frac{\tau_m}{\sigma_m} \quad (10)$$

Para materiais dissimilares, as propriedades do material menos resistente dominam o comportamento com relação ao atrito, mas, geralmente, as superfícies são cobertas por filmes de óxido e filmes de lubrificante adsorvidos, como mostra a Fig. 2.10. Portanto, a tensão de cisalhamento é efetivamente a tensão de cisalhamento do filme da superfície (Rosenberg, 1982).

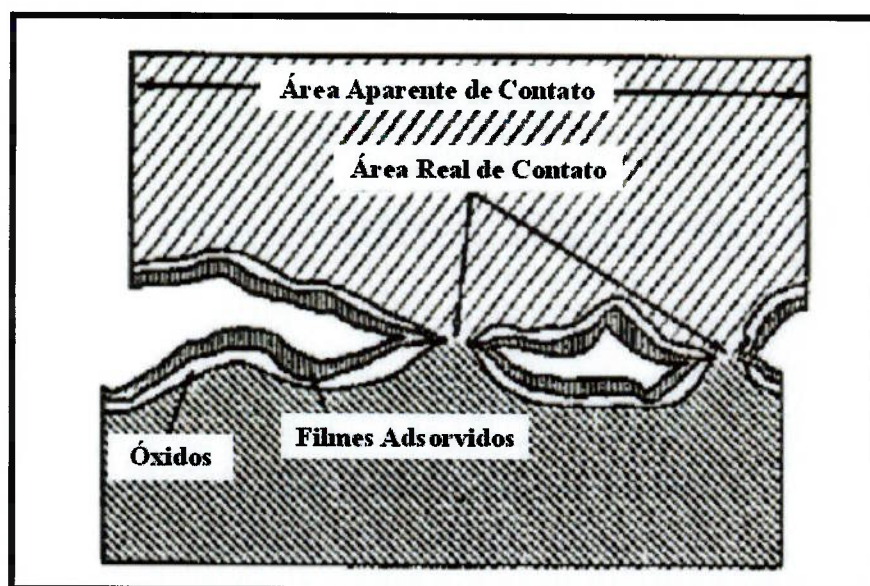


Figura 2.10: Contato entre superfícies (Rosenberg, 1982)

Um fluido, não pode, por definição, transmitir tensões de cisalhamento em repouso, mas sua viscosidade permite a transmissão de tensões cisalhantes quando em movimento (Vickery, 1975), um exemplo é mostrado na Fig. 2.11 Nesta figura é ilustrado o modelo de lubrificação hidrodinâmica com um fluido lubrificante entre duas placas paralelas.

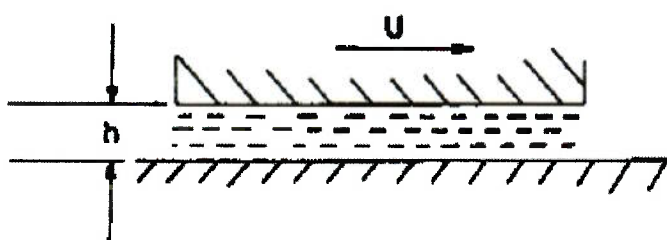


Figura 2.11: Modelo de Lubrificação Hidrodinâmica – Fluido Lubrificante entre duas Placas paralelas em Movimento Relativo (Vickery, 1975)

Quando uma força é aplicada à placa superior, esta é acelerada até certa velocidade em que a tensão de cisalhamento do lubrificante que é proporcional à velocidade é igual à força aplicada. Quando a força é relacionada com a tensão de cisalhamento, é obtida uma linha reta, para um fluido Newtoniano, como mostra a Fig. 2.12. A inclinação da

reta representa a viscosidade do lubrificante. No modelo para bronzinas criado por Ocvirk apud Vickery (1975), o perfil de velocidades das camadas de lubrificante entre as duas superfícies é assumido como sendo linear, e o efeito do gradiente de pressões no filme lubrificante é ignorado. A tensão de cisalhamento (τ), em qualquer posição (θ) ao redor da bronzina é dado pela Eq. 11:

$$\tau = \mu \left(\frac{du}{dy} \right) \quad (11)$$

Onde:

μ : viscosidade do fluido

(du/dy) : gradiente de velocidade através do filme

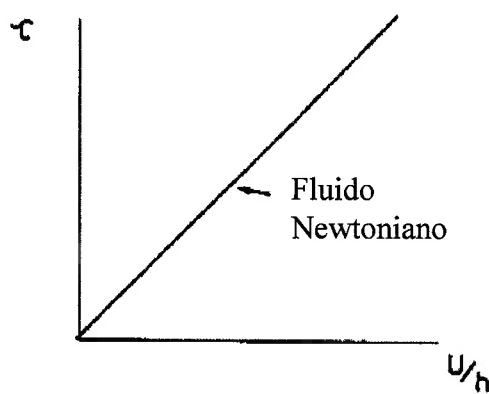


Figura 2.12: Tensão Cisalhante de um Fluido Newtoniano (Vickery, 1975)

Portanto, o coeficiente de atrito neste regime será proporcional à viscosidade x rotação/carregamento, isto é, uma linha reta no diagrama de Stribeck. A lubrificação hidrodinâmica está presente entre duas superfícies conformes, com movimento relativo em alta velocidade, uma em relação à outra, resistindo a um carregamento limitado, a cada vez que o filme de óleo pode ser formado. Este tipo de lubrificação é encontrado em bronzinas, entre a saia do pistão e o cilindro e entre os anéis de pistão e o cilindro, para altas velocidades de deslizamento (Heywood, 1990).

2.3 Projeto de Bronzinas

De acordo com Basshuysen e Schäfer (2004), uma bronzina é dimensionada em diversos estágios durante o projeto de um motor. As dimensões principais, diâmetro e largura, são determinadas primariamente pelas dimensões gerais do motor e dos componentes relacionados.

Os resultados primários do trabalho de cálculo são a seleção do tipo de bronzina apropriado para a aplicação e o estabelecimento das dimensões, em conjunto com os valores limites.

O carregamento numa bronzina muda ciclicamente. As forças do virabrequim são cíclicas e dependem também da pressão no topo dos pistões e das forças de inércia. A Fig. 2.13 ilustra os carregamentos aplicados no sistema em estudo.

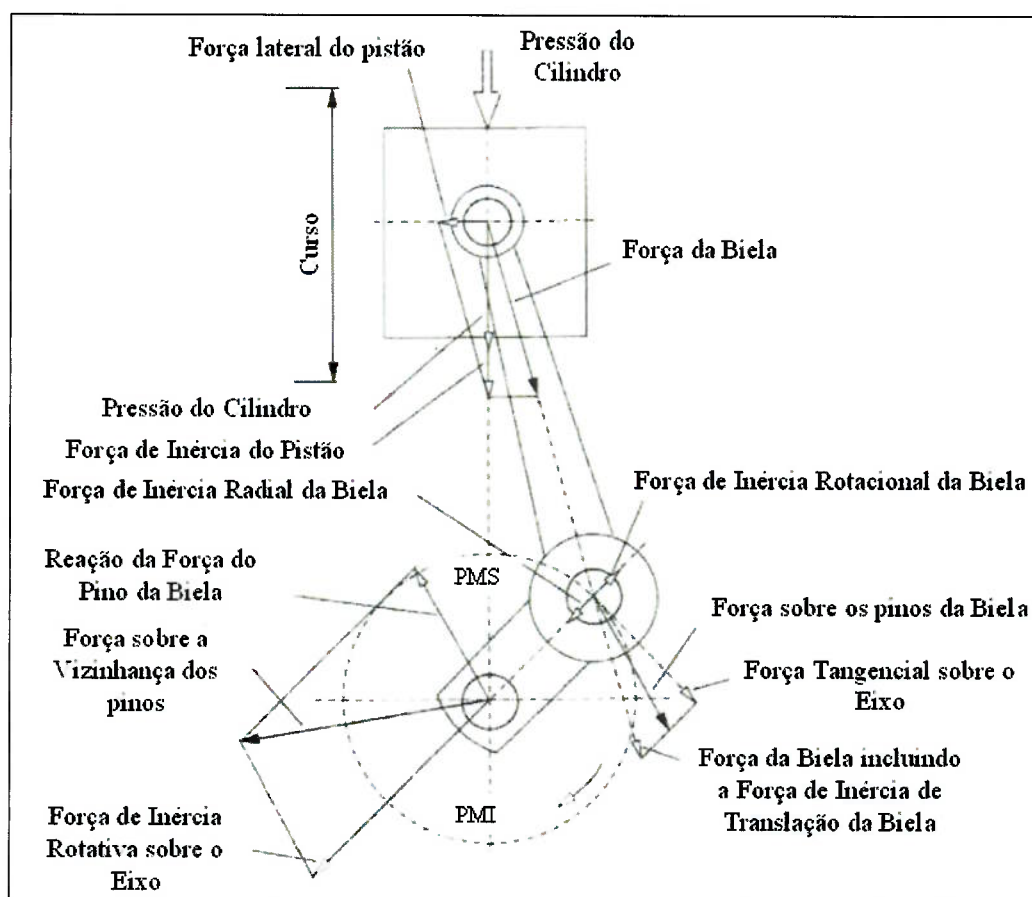


Figura 2.13: Forças no Sistema Bronzina x Virabrequim
(Basshuysen e Schäfer, 2004)

A análise de hidrodinâmica (HL) de bronzinas através de um modelo rígido, no qual não são consideradas as deformações elásticas da bronzina nem de seu alojamento, é feita como descrito no fluxograma da Fig. 2.14.

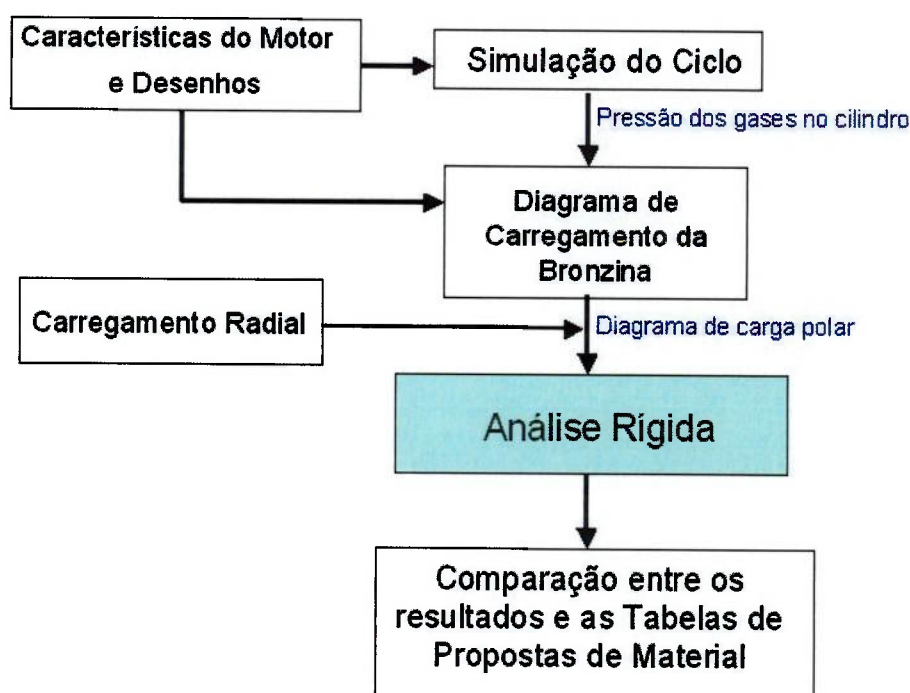


Figura 2.14: Fluxograma de Dimensionamento de Bronzinas – Método HL.

Através da determinação da órbita descrita pelo eixo virabrequim, devido ao movimento cíclico do motor, veja Fig. 2.15, podem ser obtidos os seguintes resultados (Basshuysen e Schäfer, 2004).

- espessura mínima do filme de óleo (MOFT – Minimum Oil Film Thickness) - ver Fig. 2.16
- máxima pressão de filme de óleo (POFP – Peak Oil Film Pressure) – ver Fig. 2.17

Estes dados (MOFT e POFP) permitem realizar a seleção de um material apropriado para uma determinada aplicação.

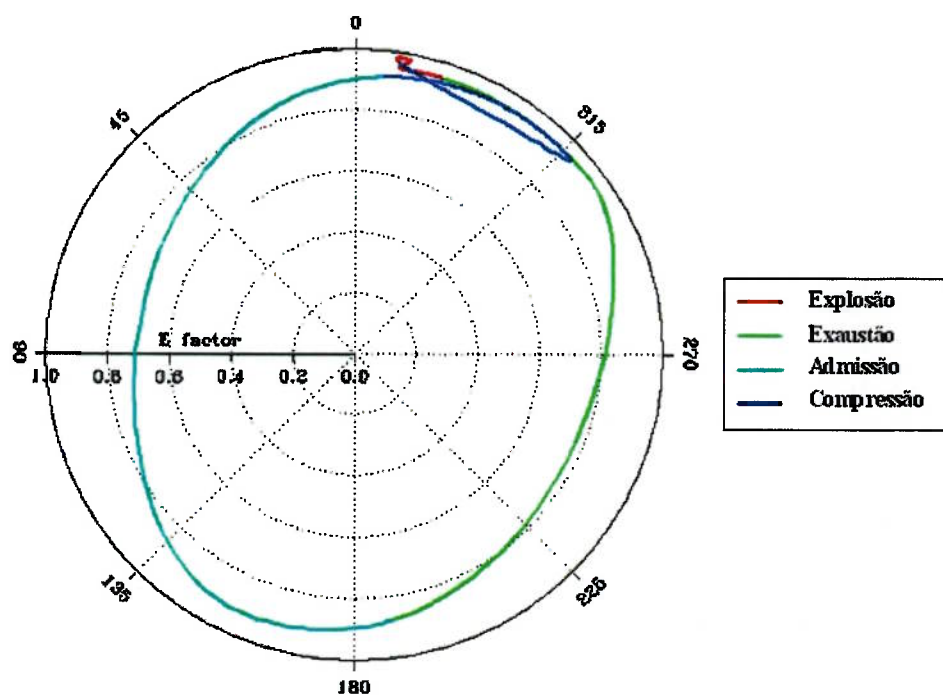


Figura 2.15: Exemplo de gráfico ilustrando a órbita descrita pelo eixo num ciclo do motor (Zottin, 2001)

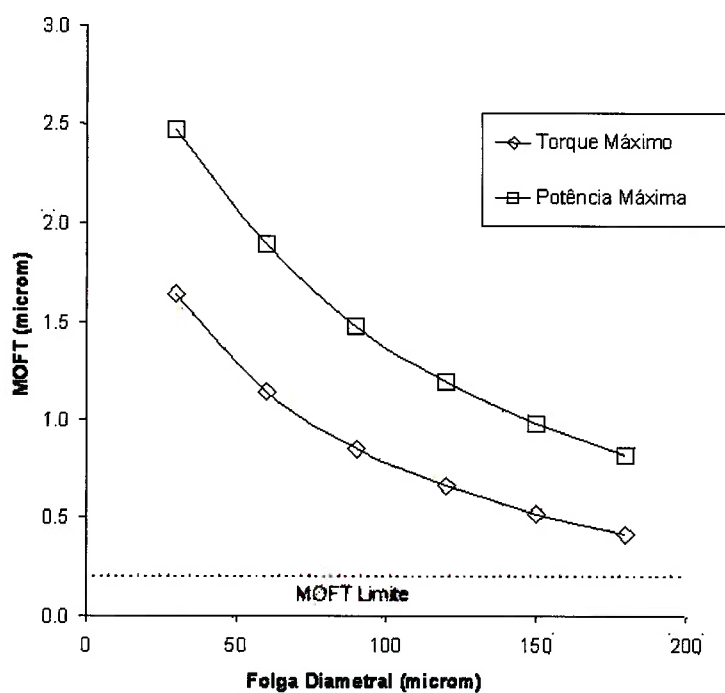


Figura 2.16: MOFT em função da folga diametral (Zottin, 2001).

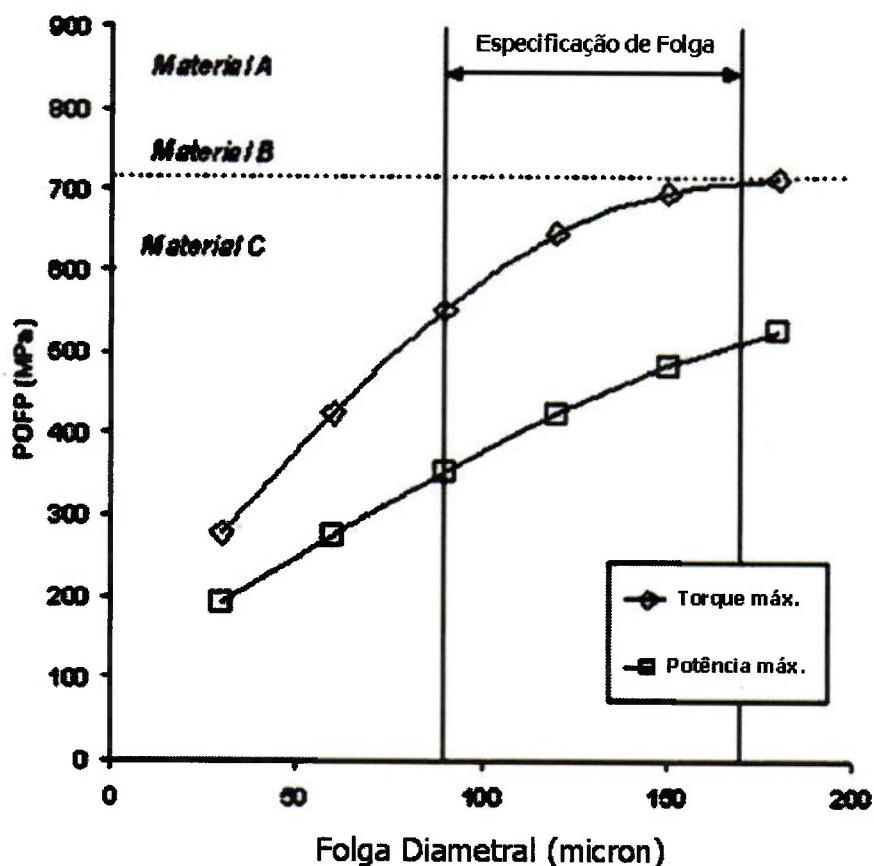


Figura 2.17: Gráfico de POFP em Função da Folga Diametral (Zottin, 2001).

O cálculo EHL (Elastohidrodinâmico) é um método mais preciso utilizado para o projeto de bronzinas.

Neste método, a distribuição do filme lubrificante na bronzina é calculada localmente, levando em consideração as deformações elásticas da bronzina e do seu alojamento (Zottin, 2001)

Através da resolução diferencial da equação de Reynolds, podem ser levadas em consideração também a rigidez da bronzina e do eixo. Este método requer muito mais dados detalhados e maiores recursos para o cálculo do que o método rígido. Portanto, é geralmente utilizado para checar pequenas variações de projeto e suas conseqüências. A Fig. 2.18 apresenta o fluxograma do método de análise de bronzinas pelo cálculo EHL.

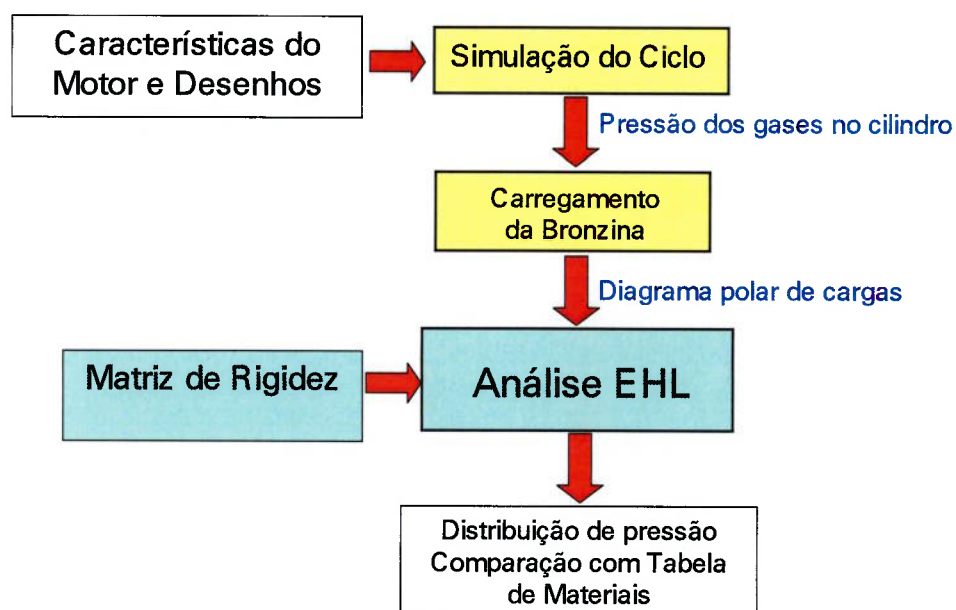


Figura 2.18: Fluxograma Cálculo EHL de Bronzinas (Zottin, 2001).

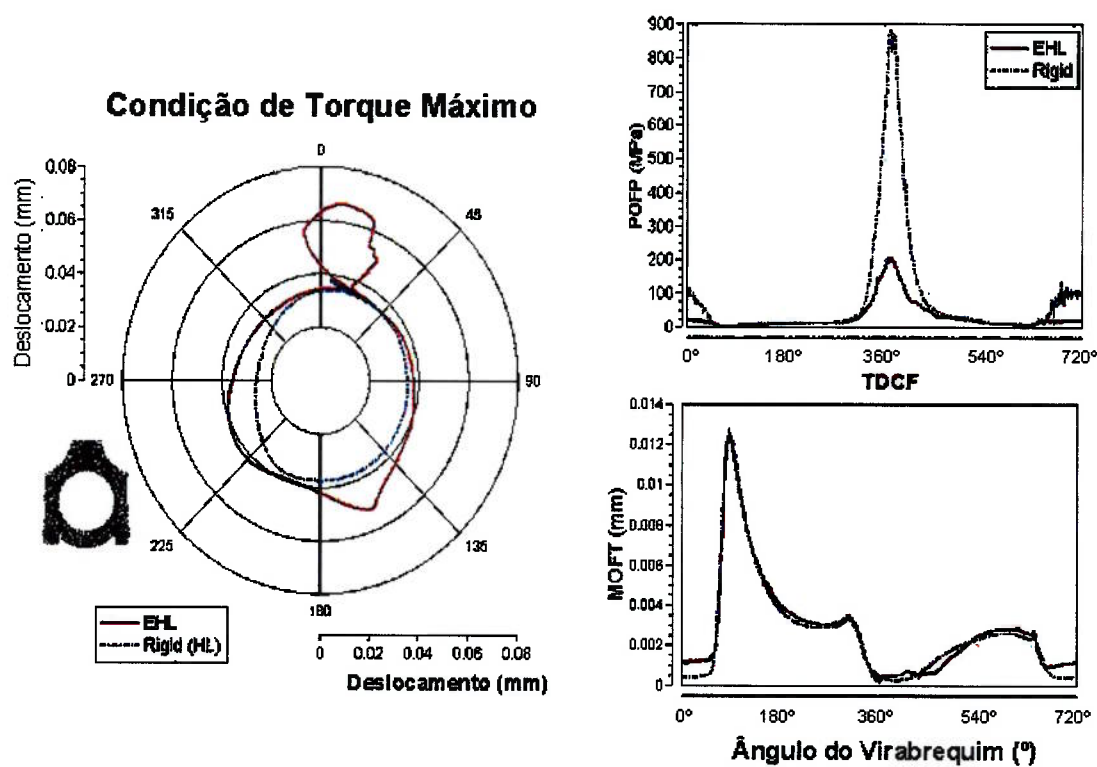


Figura 2.19: Comparação de Resultados – HL x EHL (Zottin, 2001)

As Fig. 2.19 e 2.20 ilustram um exemplo que evidencia as diferenças encontradas entre os modelos de cálculo HL e EHL. Nota-se que utilizando um modelo EHL, que leva em consideração a matriz de rigidez da biela, o valor de POFP é 77% menor que o valor obtido através da simulação HL.

Já com relação à variação da pressão de filme de óleo em função da largura da peça, nota-se uma grande diferença entre os modelos HL e EHL. O modelo HL apresenta um valor de pressão muito elevado. Com relação à espessura do filme de óleo, nota-se que no modelo EHL percebe-se o efeito de borda da peça, ou seja, nas bordas o filme de óleo é mais fino, enquanto que o modelo HL considera que o filme de óleo tem espessura constante em função da largura da peça.

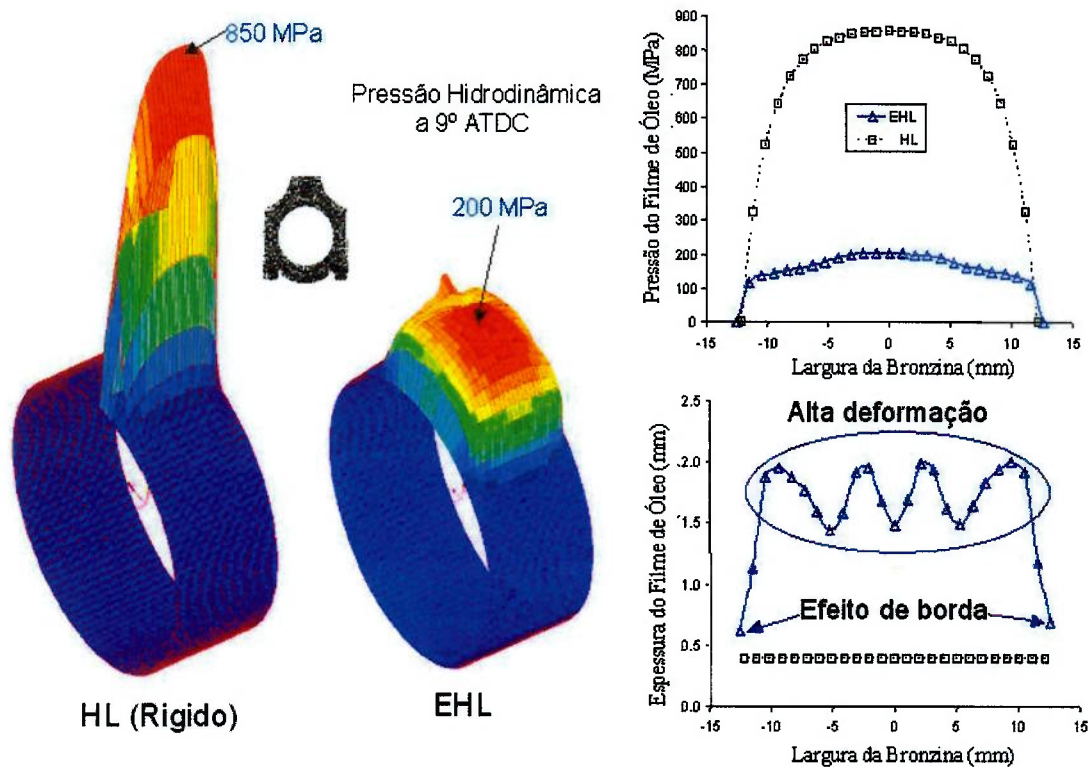


Figura 2.20: Variação da Pressão no Filme de Óleo e da Espessura – HL x EHL
(Zottin, 2001)

Para as máquinas que funcionam hoje em dia com altas rotações, a consideração dos efeitos da rugosidade e dependência da viscosidade pela temperatura é importante para prever com maior precisão o comportamento de mancais de deslizamento. As características termohidrodinâmicas (THD) de mancais

de deslizamento têm sido investigadas por diversos autores, como, por exemplo, Ramech et al. (1997) e Fillon e Bouyer (2004), mas este aspecto de influência da temperatura na modificação das condições do sistema não será detalhado neste trabalho.

2.4 Determinação do Atrito entre Bronzina e Virabrequim

O atrito em bronzinas de motores de combustão interna é um fator de muito interesse, pois, através deste, pode-se determinar o aumento de temperatura da bronzina (DeHart e Harwick, 1969). Este aumento de temperatura pode vir a precipitar a ocorrência da quebra do filme de óleo, devido à perda de viscosidade do lubrificante, e gerar a falha prematura da bronzina.

Segundo Heywood (1990), as contribuições de atrito no eixo virabrequim vêm das bronzinas de biela, centrais e seus alojamentos. A partir da excentricidade entre virabrequim e bronzina, pode-se determinar a mínima espessura do filme de óleo. Esta espessura é um parâmetro crítico no projeto de bronzinas. Se o filme de óleo for muito fino, as asperezas das superfícies poderão entrar em contato e o filme de óleo será quebrado, ocasionando um aumento substancial do atrito e do desgaste. Bronzinas são geralmente projetadas para trabalhar com uma espessura mínima de filme de óleo com cerca de $2\mu\text{m}$ (Heywood, 1990).

A força de atrito F_a numa bronzina pode ser calculada aproximadamente como sendo o produto da área da bronzina, a viscosidade do óleo e a média do gradiente de velocidade no óleo. Deve-se salientar que a Eq.12 não é suficiente para projetar uma bronzina:

$$F_a \approx (\pi D_b L_b) \mu \left(\frac{\pi D_b N}{\bar{h}} \right) = \frac{\pi^2 \mu D_b^2 L_b N}{\bar{h}} \quad (12)$$

Onde:

D_b : diâmetro da bronzina

L_b : comprimento da bronzina

\bar{h} : folga radial média

N: rotação do eixo

2.5 Desgaste por deslizamento lubrificado

Não existe uma definição definitiva de desgaste, porém as seguintes têm sido utilizadas:

- “Perda de material que ocorre quando uma superfície rola, desliza ou impacta sobre outra” (Bayer, 1972).
- “Modificações indesejáveis e cumulativas em dimensões, pela gradual remoção de partículas devido ao contato entre superfícies em movimento” (Collins, 1993)
- “Dano progressivo, que envolve a perda de material, que ocorre sobre a superfície de um componente como resultado do movimento relativo a um contra-corpo” (Williams, 1994).

O desgaste pode ter muitas formas, dependendo da topografia das superfícies, das condições do contato e do meio, mas basicamente pode-se dividi-lo em dois tipos principais: mecânico e químico (Scott, 1991). Em geral, o desgaste mecânico envolve processos que podem estar associados com atrito, abrasão e fadiga. O desgaste químico está relacionado com as reações que as superfícies podem estar sujeitas, dependendo do meio em que estão inseridas (Scott, 1991).

A predominância de um dos tipos, ou a natureza da interação entre os mesmos, será governada pelas condições que cercam o sistema tribológico: propriedades dos materiais, tipo de movimento, geometria e o meio. Portanto, segundo Bayer (1997), é necessário pensar no desgaste como uma resposta a um sistema e não como uma propriedade dos materiais.

A Fig. 2.21 mostra a representação básica de um tribossistema submetido ao desgaste por deslizamento. Essencialmente, o desgaste por deslizamento é aquele no qual há um movimento relativo entre duas superfícies em contato, com uma carga aplicada.

O sistema em estudo, bronzina x virabrequim, está submetido ao desgaste por deslizamento lubrificado, pois entre o contra-corpo (bronzina) e o corpo (virabrequim) existe a presença de óleo lubrificante.

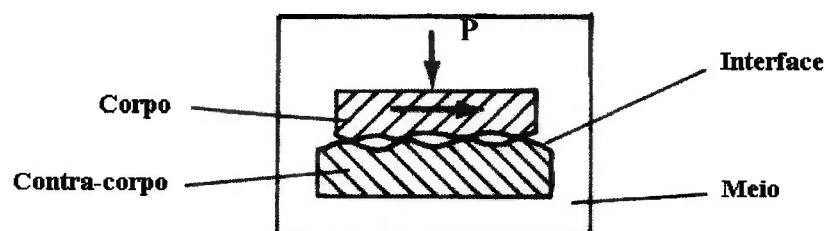


Figura 2.21: Tribossistema – Desgaste por Deslizamento (Ludema, 1992)

Neste trabalho, aspectos relativos ao desgaste por deslizamento serão apresentados segundo a classificação de Zum Gahr (1987), segundo o qual este tipo de desgaste pode ocorrer devido à adesão, fadiga de contato, reação triboquímica ou abrasão. Muitos fatores podem influenciar para que haja a predominância de um dos mecanismos, conforme mostra a Fig. 2.22: o tipo de contato (elástico ou plástico), a área de contato e as propriedades do material. Além disso, o tipo de deformação, as propriedades do corpo e do contra-corpo, o elemento interfacial e as condições de carregamento igualmente determinam o mecanismo de desgaste.

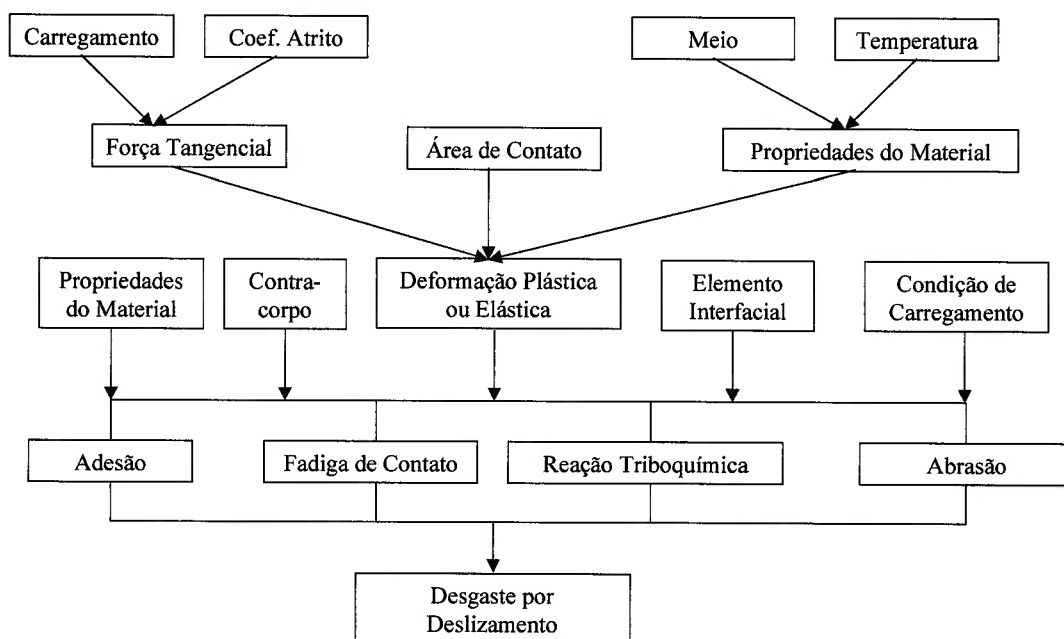


Figura 2.22: Fatores que influenciam o mecanismo de desgaste durante contato deslizante (Zum Gahr, 1987).

2.5.1 Desgaste Adesivo

Conforme citado no item 2.2.2, sabe-se que quando duas superfícies se tocam, a área de contato real é muito menor do que a área aparente; na realidade, uma quantidade pequena de asperezas chega a interagir, considerando-se a rugosidade das superfícies.

Ao aplicar estaticamente uma carga normal, a pressão local nas asperezas torna-se extremamente elevada. O limite de escoamento é então excedido e as asperezas deformam-se plasticamente, até que a área real de contato aumente de forma a suportar o carregamento.

As asperezas podem aderir e, caso a resistência ao cisalhamento das “microsoldas” seja alta, poderá ocorrer a deformação plástica de um dos materiais, ou ambos. A ruptura na região das soldas geralmente transfere material de uma superfície para outra (Collins, 1993). Essa transferência pode não causar retirada de material instantaneamente, mas partículas podem ser removidas da superfície em movimentos relativos subsequentes, como ilustrado na Fig. 2.23.

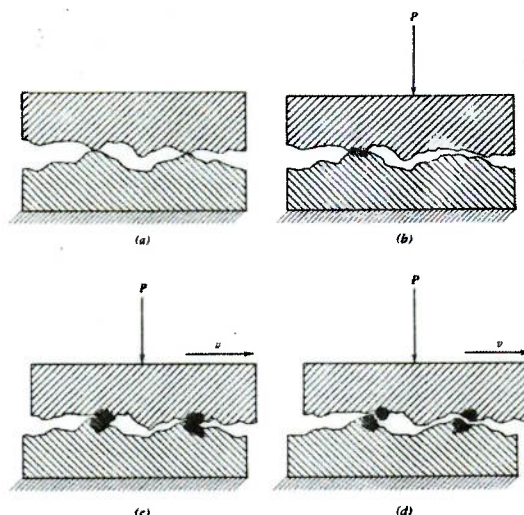


Figura 2.23: Contato entre dois corpos sólidos e a transferência de uma partícula por desgaste adesivo. (a) Superfícies em contato sem carregamento. (b) Aplicação de carga P ocasiona deformação plástica e solda a frio. (c) Movimento de deslizamento e carga produzem um aumento de tensão. (d) Partículas são transferidas pela ruptura das asperezas na junção (Collins, 1993).

O desgaste adesivo é mais freqüente em condições de atrito seco, ou não-lubrificado, onde as duas superfícies de contato estão expostas. O desgaste adesivo pode ocorrer em condições de contato lubrificado, mas em intensidade mais reduzida do que na ausência de lubrificação.

2.5.2 Fadiga de Contato

Este mecanismo pode ser observado durante o deslizamento e/ou rolamento entre superfícies, ou durante o impacto de sólidos e/ou líquidos contra uma outra superfície. O carregamento e descarregamento cíclicos ao qual está exposto um material podem induzir a formação de trincas sub-superficiais que se propagam paralelamente à superfície. O encontro de trincas pode levar a um destacamento de material. Geralmente, o processo de delaminação/destacamento ocorre devido à ação conjunta de adesão e fadiga superficial (Farias, 1999).

Na Fig 2.24 tem-se um esquema da formação de trincas (t1), sua propagação (t2) e o destacamento de material (t3).

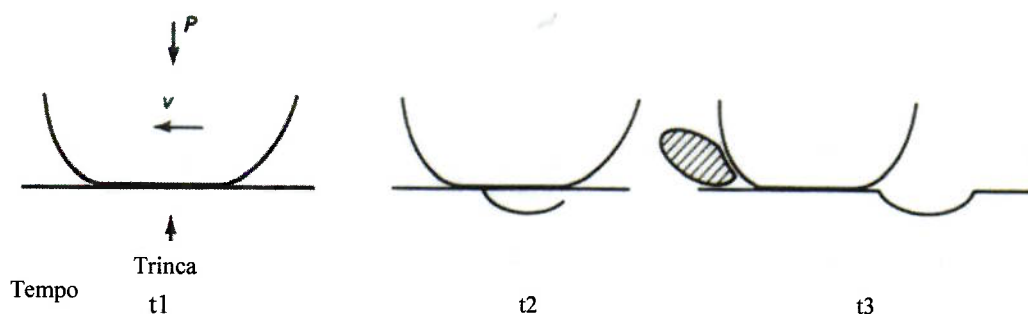


Figura 2.24: Mecanismo de Desgaste por Fadiga Superficial (t1) formação da trinca, (t2) propagação da trinca, (t3) destacamento de material (Bayer, 1997).

2.5.3 Reação Triboquímica

O desgaste por reação triboquímica ocorre durante o contato entre duas superfícies sólidas, as quais reagem com o meio (gasoso ou líquido). Inicialmente, o contato entre as asperezas de ambas superfícies leva à remoção de metal devido ao mecanismo da adesão. Logo após este pequeno período de desgaste adesivo, os metais em contato reagem com o meio, originando a formação de camadas protetoras nas superfícies, que reduzem o contato metal-metal. As grandes pressões no contato entre asperezas, ou a microfadiga, provocam o trincamento das camadas protetoras, levando à formação de partículas de desgaste não metálicas. Na presença de uma atmosfera de oxigênio, as partículas de desgaste são constituídas fundamentalmente por óxidos. As partículas de desgaste formadas podem provocar a abrasão das superfícies em contato. Este processo de desgaste por reação triboquímica prossegue mediante uma remoção e ressurgimento das camadas protetoras nas superfícies de contato (Zum Gahr, 1987). A Fig. 2.25 ilustra o mecanismo de formação e remoção da camada de óxido. No momento t_1 há a remoção da partícula de óxido, no instante t_2 existe a formação de uma nova camada e no instante t_3 ocorre nova interação entre as asperezas.

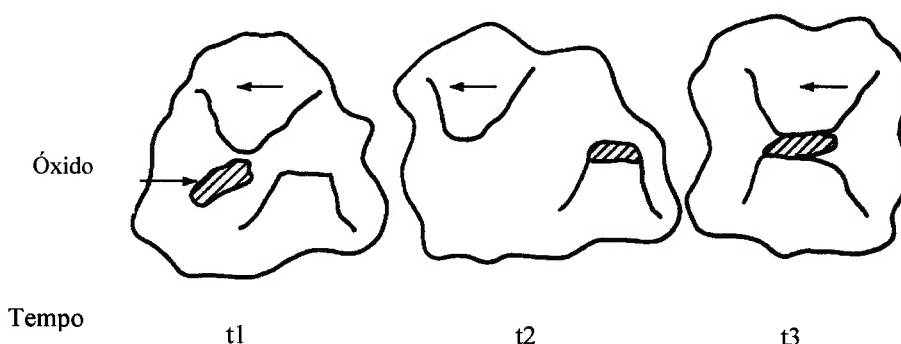


Figura 2.25: Mecanismo de Desgaste Oxidativo (t_1) remoção da partícula de óxido, (t_2) formação de nova camada de óxido, (t_3) interação entre asperezas (Bayer, 1997)

2.5.4 Desgaste Abrasivo

No desgaste abrasivo, o material é removido da superfície do corpo por partículas duras entre os corpos ou, algumas vezes, por protuberâncias duras na superfície do contra-corpo (Hutchings, 1992). O desgaste abrasivo pode ser classificado como abrasão a dois corpos ou abrasão a três corpos. No caso de desgaste abrasivo provocado pela ação de asperezas duras em uma das superfícies na outra, o desgaste é denominado abrasão a dois corpos. Quando partículas abrasivas estão presentes entre as duas superfícies, a abrasão é denominada abrasão a três corpos.

Em alguns casos, o desgaste é causado por partículas duras que atingem a superfície, após serem carregadas por um fluido. Neste caso, o desgaste é denominado erosão. A Fig. 2.26 ilustra os diferentes tipos de abrasão (Hutchings, 1992).

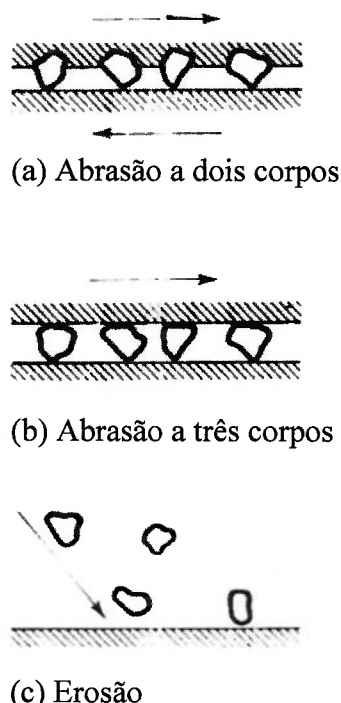


Figura 2.26: Mecanismo de Abrasão: (a) abrasão a dois corpos, (b) abrasão a três corpos, (c) erosão (Hutchings, 1992).

Quando as partículas abrasivas não são fraturadas durante o processo, o desgaste é considerado de baixas tensões, caracterizado pelo riscamento da superfície; ao contrário do que ocorre no desgaste sob altas tensões, onde as partículas abrasivas são fraturadas e a superfície apresenta um riscamento mais intenso (Collins, 1993).

2.5.5 Desgaste em Mancais de Deslizamento

Segundo Davis (1994), o potencial para dano por desgaste em um mancal de deslizamento está intimamente relacionado às interações entre as seguintes características de operação do sistema:

- magnitude do carregamento
- natureza do carregamento (cíclico ou constante, unidirecional ou reversível)
- rotação
- temperatura de operação
- alinhamento e rigidez

O desempenho de uma bronzina pode ser substancialmente afetada pelo lubrificante e pelas características do sistema de lubrificação (regimes de lubrificação).

Segundo Duarte (2001), o desgaste em mancais de deslizamento pode ser observado e classificado de duas maneiras:

- Nível microscópico: na prática, o desgaste de componentes se dá pela combinação de diferentes micromecanismos que, para serem identificados, precisam de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Dessa forma, a análise de desgaste torna-se demorada e de alto custo. Por exemplo, se partículas oriundas do micromecanismo de delaminação (resultado de fadiga de contato, por exemplo) riscarem a superfície do mancal, ocorre o desgaste abrasivo. No entanto, partículas soltas (sujeira) riscando o mancal gera um

micromecanismo que recebe o nome de microcorte. A diferenciação de um micromecanismo do outro não é possível com a análise a olho nu.

- Nível macroscópico: esta classificação do desgaste deve levar em conta o caráter prático dos testes de vida e de desgaste. A partir de alterações na forma, nos materiais ou lubrificantes, espera-se avaliar a extensão ou grau de severidade nos componentes de um mancal, sem a necessidade de aprofundamento no nível de micromecanismos (Duarte, 2001).

Através da análise macroscópica, que geralmente é feita a olho nu, ou com o aumento de no máximo cinco vezes (lupa), em geral, diferenciam-se apenas quatro tipos de desgaste em bronzinas (Duarte, 2001):

- Adesão

Em bronzinas, a superfície desgastada por adesão apresenta aspecto rugoso com pouco brilho. Nos casos leves, ou seja, com pouca adesão, as marcas são descontínuas e espaçadas, e, nos intensos, as marcas são contínuas ocupando áreas extensas. A Fig. 2.27 mostra um exemplo de ocorrência de desgaste adesivo numa bronzina. Na Fig. 2.28, a análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostra a superfície de um eixo virabrequim de ferro fundido nodular, com presença de alumínio em sua superfície, advinda da camada antifricção de uma bronzina, devido à transferência de material característica de um engripamento. A Fig. 2.29 apresenta a análise de EDS (Sistema de Análise por Dispersão de Energia) feita com o auxílio do MEV das partículas encontradas no eixo virabrequim, similar à análise apresentada por Fukuoka et al (1983).



Figura 2.27: Engripamento na superfície de uma bronzina.

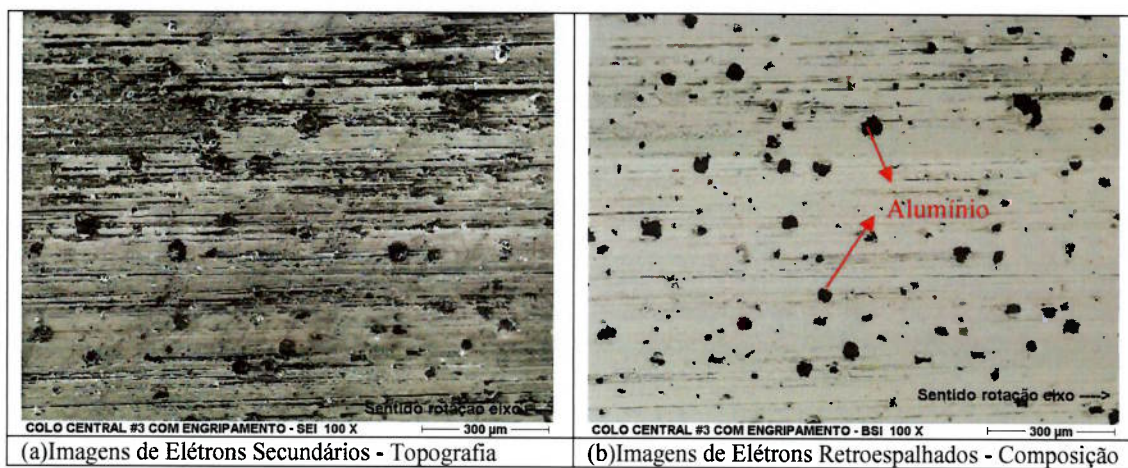


Figura 2.28: Imagens de MEV – Superfície eixo virabrequim após ocorrência de engripamento.

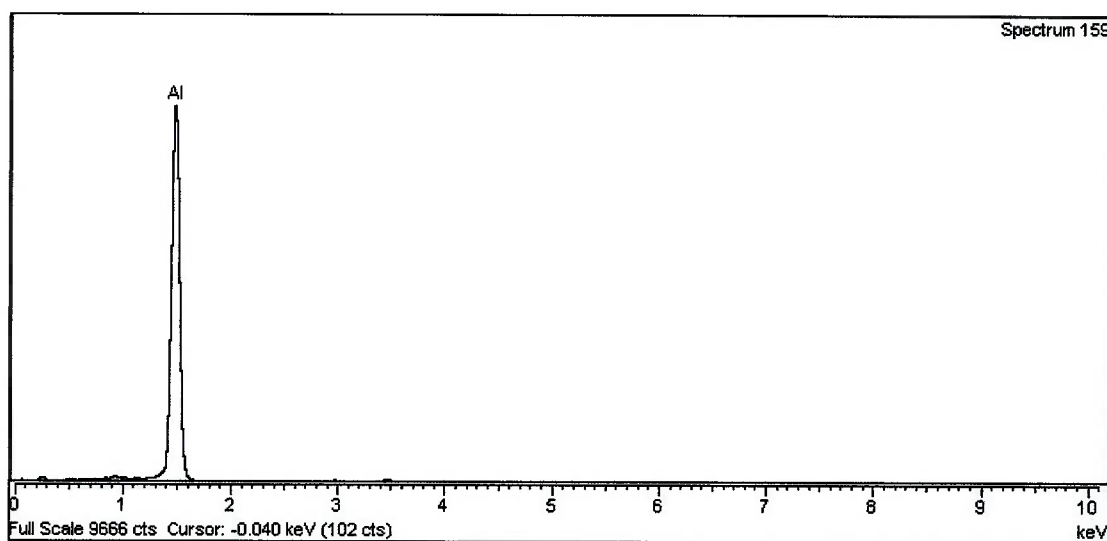


Figura 2.29: Análise de EDS (MEV) – Colo do Virabrequim

- Riscamento

Riscamento é uma forma de desgaste abrasivo a três corpos: o mancal mais uma partícula. É provocado por rebarba de usinagem fixa a um dos componentes do mancal, ou ainda, por partículas livres como: limalha, sujeiras, etc. As marcas deixadas no mancal são contínuas e retas; um exemplo é mostrado na Fig. 2.30. De todos os tipos de desgaste este é o de mais fácil visualização.



Figura 2.30: Riscamento na superfície de uma bronzina.

Na Fig. 2.31 é mostrada uma partícula de ferro que pode ter causado o risco na superfície de uma bronzina.

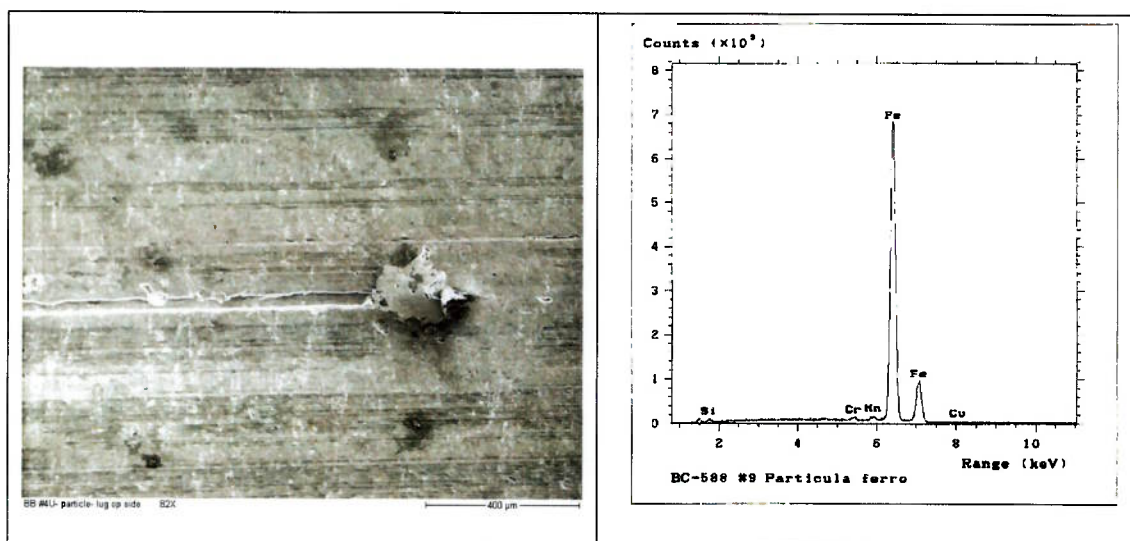


Figura 2.31: Presença de partícula de Fe na superfície de uma bronzina.

- Polimento

Polimento é o resultado da eliminação das asperezas da superfície do mancal, gerando um brilho na superfície. A Fig. 2.32 ilustra o contraste entre áreas com e sem polimento na superfície de uma bronzina após teste em motor.

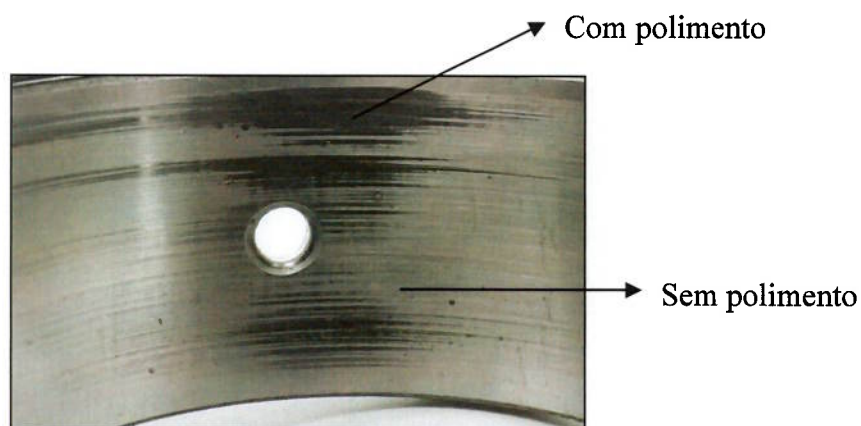


Figura 2.32: Polimento na superfície de uma bronzina.

- Fadiga de Contato

Na Fig. 2.33 é possível identificar região na pista de rolamento de uma bronzina com destacamento de liga devido à fadiga de contato.



Figura 2.33: Fadiga de contato na superfície de uma bronzina – Destacamento de liga.

2.6 Acabamento superficial

A rugosidade das superfícies é um fator importante na avaliação de desempenho de bronzinas, particularmente com o projeto de desenvolvimento de novos materiais (Massey et al, 1990), no qual se busca uma maior capacidade de carga através da modificação de materiais e de acabamento superficial.

O acabamento superficial foi originalmente considerado como um dos fatores mais importantes no que se refere à resistência ao desgaste; costumava-se imaginar que quanto mais fino o acabamento superficial, melhor a resistência ao desgaste (Eston, 1966). Mas, com o desenvolvimento de teorias sobre o mecanismo de desgaste adesivo e atrito, esta busca por acabamentos mais finos foi abandonada (Peterson, 1980). Bayer (1994) sugere a utilização de rugosidades intermediárias no projeto de mancais de deslizamento, pois superfícies muito lisas podem levar ao desgaste adesivo e superfícies muito rugosas ao desgaste abrasivo.

Ainda segundo Peterson (1980), o acabamento superficial é muito importante quando os materiais do tribossistema têm durezas muito diferentes, já que uma aspereza mais alta num material mais duro poderá ocasionar danos na superfície do material mais mole.

Provavelmente, o papel mais importante do acabamento superficial em desgaste por deslizamento lubrificado é a formação do filme de fluido lubrificante (Peterson, 1980). Com a obtenção do acabamento superficial apropriado, pode-se reduzir o contato metal-metal, mesmo nas condições de maiores carregamentos e menores velocidades.

Processos de manufatura podem deixar relevos característicos de picos e vales na superfície das peças produzidas, denominados textura superficial. A textura superficial produzida pelo processo de remoção de material geralmente possui componentes de rugosidade e ondulação. Os mesmos são, às vezes, superpostos a desvios da forma geométrica pretendida, tais como planicidade, circularidade, cilíndricidade, etc. (Duarte, 2001).

Basicamente, a geometria de uma superfície pode ter dois efeitos: o de ajudar a gerar e manter o filme de fluido lubrificante entre as superfícies, ou o de contribuir

para a redução ou destruição do filme. Fazendo uma simplificação, pode-se considerar a rugosidade como uma ondulação curta, que pode ser aleatória ou periódica, e que pode estar em duas direções em relação ao movimento relativo entre os elementos em contato, transversal ou longitudinal (Whitehouse, 1994).

Em bronzinas pode-se ter os dois tipos de acabamento superficial:

- Transversal, no qual a orientação da rugosidade é transversal ao movimento do eixo. Este tipo de acabamento pode ser obtido através de brochamento. Sendo assim, deste ponto em diante, bronzinas produzidas com este tipo de processo de manufatura serão denominadas bronzinas brochadas. A Fig. 2.34 ilustra este tipo de bronzina.

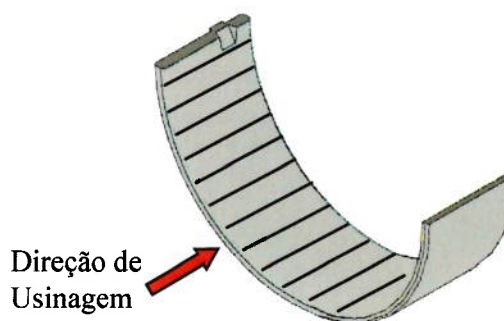


Figura 2.34: Bronzina Brochada – Acabamento Transversal

- Longitudinal, no qual a orientação da rugosidade é paralela ao movimento do eixo. Este tipo de acabamento é obtido através do processo de fabricação mandrilamento. Bronzinas produzidas por este tipo de processo de manufatura serão denominadas bronzinas mandriladas. A Fig.2.35 ilustra este tipo de bronzina.

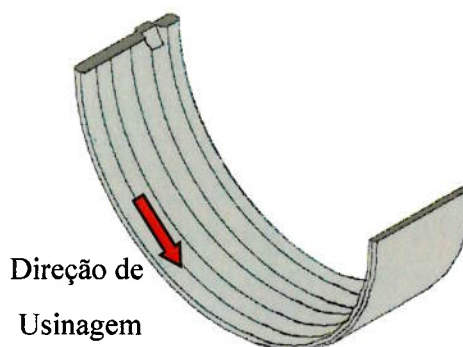


Figura 2.35: Bronzina Mandrilada – Acabamento Longitudinal

Segundo Zhang e Qiu (1997), a rugosidade superficial tem a mesma ordem de grandeza que a espessura mínima do filme de óleo em bronzinas dinamicamente carregadas. Com o intuito de melhorar a precisão na previsão do comportamento das bronzinas, os efeitos da rugosidade devem ser bem entendidos.

O efeito da orientação da rugosidade na lubrificação foi estudado por outros autores. Christensen e Tonder (1973) usaram um modelo estocástico para checar a influência de um acabamento puramente longitudinal ou transversal. Patir e Cheng (1978) propuseram uma equação de Reynolds modificada, levando em conta a orientação da rugosidade.

Neste caso, a pressão hidrodinâmica média (\bar{p}) entre duas superfícies rugosas pode ser determinada pela Equação Média de Reynolds (Eq. 13).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\phi_x \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\phi_y \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \right] = \frac{U_1 + U_2}{2} \frac{\partial \bar{h}_T}{\partial x} + \frac{U_1 + U_2}{2} \sigma \frac{\phi_s}{\partial x} + \frac{\partial \bar{h}_T}{\partial t} \quad (13)$$

Onde:

ϕ_x : fator de fluxo de pressão na direção x

ϕ_y : fator de fluxo de pressão na direção y

ϕ_s : fator de fluxo de cisalhamento

\bar{h}_T : espessura média de filme de óleo

μ : viscosidade absoluta

U_1, U_2 : velocidade das superfícies 1 e 2

σ : rugosidade média quadrática composta = $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$

Os fatores de fluxo são obtidos através de simulação numérica do fluxo com uma superfície rugosa aleatoriamente gerada. ϕ_x e ϕ_y são dependentes de h/σ (espessura de filme de óleo nominal/rugosidade rms composta) e o parâmetro de superfície γ , que pode ser interpretado pelo quociente entre comprimento e largura de uma aspereza. Acabamentos puramente transversal, isotrópico e longitudinal

apresentam valores de γ igual a 0, 1 e ∞ respectivamente, conforme mostrado na Fig. 2.36. Diferentes padrões de textura ou acabamento superficial apresentam diferentes fatores de fluxo.

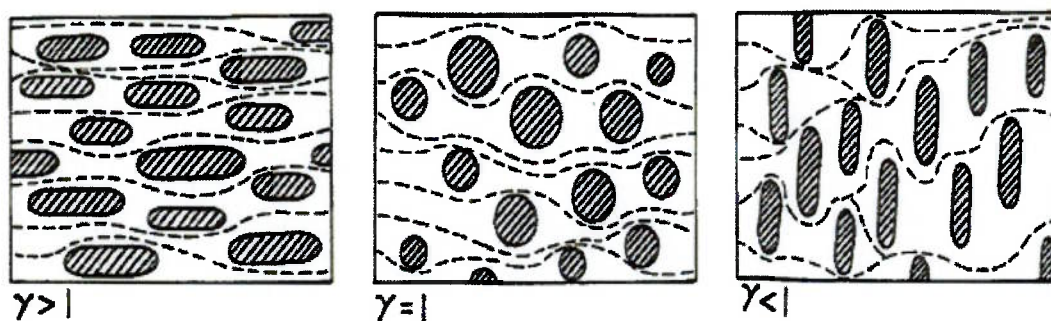


Figura 2.36: Área de Contato Típica para superfícies orientadas longitudinal ($\gamma > 1$), isotrópica ($\gamma = 1$) e transversal ($\gamma < 1$) – (Patir e Cheng, 1978a)

O objetivo do trabalho de Zhang e Qiu (1997) era investigar a combinação destes 3 tipos de textura (isotrópica, transversal e longitudinal) no desempenho de bronzinas em regime hidrodinâmico. Foi verificado que a rugosidade isotrópica sempre diminui a mínima espessura de filme de óleo nominal. A rugosidade transversal (brochada) afeta o mínimo filme de óleo insignificadamente e sempre aumenta a máxima pressão do filme de óleo. Por outro lado, a rugosidade longitudinal pode aumentar ou diminuir a espessura do filme de óleo, dependendo das condições de largura/ diâmetro e folga diametral.

O efeito da folga é óbvio somente para o caso longitudinal, onde, aumentando a folga, haverá uma diminuição da espessura mínima do filme de óleo.

O efeito da rugosidade na pressão máxima é notável. A maioria dos casos de rugosidade longitudinal aumenta p_{max} . A rugosidade transversal sempre aumenta p_{max} .

Segundo Whitehouse (1994), considerando-se que a pressão do fluido lubrificante é consequência deste ser empurrado entre as duas superfícies com movimento relativo entre elas, deve-se levar em conta a direção do acabamento superficial para que a pressão gerada seja mantida sem que haja o escape de óleo. A estrutura transversal irá invariavelmente contribuir para o atraso do fluxo de lubrificante na direção circunferencial, pois todo o lubrificante deve ultrapassar

barreiras causadas pelos picos de rugosidade. Devido a estas barreiras, apenas uma parte do lubrificante consegue ultrapassar os picos da rugosidade e outra parte tende a ser expulsa pela lateral da peça (Fig. 2.36).

No caso de peças de largura menor, para evitar a perda de lubrificante do sistema pelas laterais, pode-se optar por uma rugosidade no sentido longitudinal da peça. Segundo Whitehouse (1994), isto leva à conclusão de que rugosidade transversal tem maior capacidade de carga para bronzinas largas, enquanto que rugosidade longitudinal tem maior capacidade de carga para bronzinas mais estreitas.

2.7 Resistência ao Engripamento

Segundo Wang (1997), o engripamento em elementos de contato é uma falha catastrófica do sistema tribológico. O engripamento pode ser definido como a parada do movimento relativo como resultado do atrito interfacial (Williams, 1994). Embora engripamento possa ocorrer tanto em arranjos de contato conforme e não-conforme, é mais provável que ocorra no contato conforme, particularmente em mancais de deslizamento.

Ni e Cheng (1996a) mencionam que a resistência ao engripamento de um sistema bronzina-virabrequim é influenciada pelas propriedades dos materiais em contato, pelas condições de acabamento superficial do eixo e da bronzina e pelas propriedades do lubrificante.

Wang (1997) acrescenta que a temperatura na área de contato é um fator importante a ser considerado no projeto de bronzinas. O engripamento em bronzinas confeccionadas em liga de Al-Sn ocorre devido à fusão do estanho, enquanto que em bronzinas de Al-Si, ocorre devido à propagação de micro-engripamentos em pontos localizados de aquecimento.

A perda de folga devido a deformações térmicas também pode ser considerada como condição que favorece a ocorrência de engripamento (Wang, 1997). Com isto, pode-se concluir que a temperatura no sistema bronzina x virabrequim é um fator importante a ser considerado no projeto do sistema. O engripamento está intimamente relacionado ao aumento de temperaturas nas interfaces de elementos em contato do tribossistema.

As maiores causas de engripamento em bronzinas podem ser classificadas nas seguintes categorias (Wang, 1997):

- perda de folga devido a expansão térmica do eixo e da bronzina
- perda de folga devido ao acúmulo de debris
- contato metal-metal
- variação da geometria da superfície e das propriedades dos materiais devido a reações triboquímicas na interface

2.8 Influência do Acabamento no Desempenho das Bronzinas

Diversos autores estudaram a influência do acabamento superficial no desempenho de bronzinas de motores de combustão interna. O principal objetivo é o de determinar para certa condição de trabalho, qual o melhor acabamento superficial, a fim de aperfeiçoar o sistema bronzina x virabrequim, principalmente a resistência ao engripamento.

Sorab e Korcek (1998) verificaram que o acabamento superficial das bronzinas tem um impacto na capacidade de carga da bronzina, e na transição do regime de lubrificação. Nas Fig. 2.37 e 2.38, o efeito da redução de rugosidade no desempenho de bronzinas de biela é ilustrado. Na Fig. 2.37 a temperatura na parede da bronzina foi avaliada durante um teste de bancada e observa-se uma queda na temperatura com acabamentos mais finos. O efeito é particularmente significativo a baixas rotações, na qual a condição de lubrificação mista é dominante.

A tendência da temperatura na Fig.2.37 é explicada pela medição de atrito, apresentada na Fig.2.38. Bronzinas com acabamento superficial mais fino ($R_a = 0,21\mu\text{m}$ e $0,26\mu\text{m}$) tendem a exibir uma curva de atrito mais suave com poucas evidências de ocorrência de lubrificação mista em condições de baixa rotação, nas quais bronzinas com acabamento mais rugoso ($R_a = 0,63\mu\text{m}$) apresentam um contato de asperezas significativo.

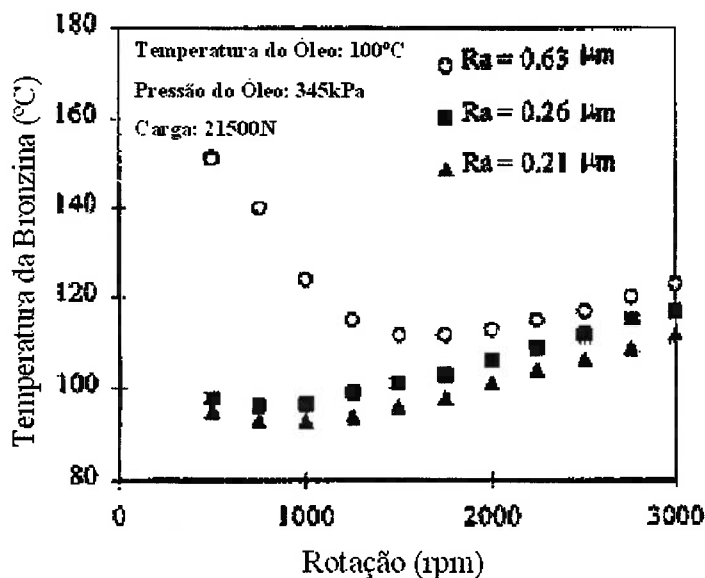


Figura 2.37: Efeito do Acabamento Superficial da Bronzina na Temperatura (Sorab e Kocek, 1998)

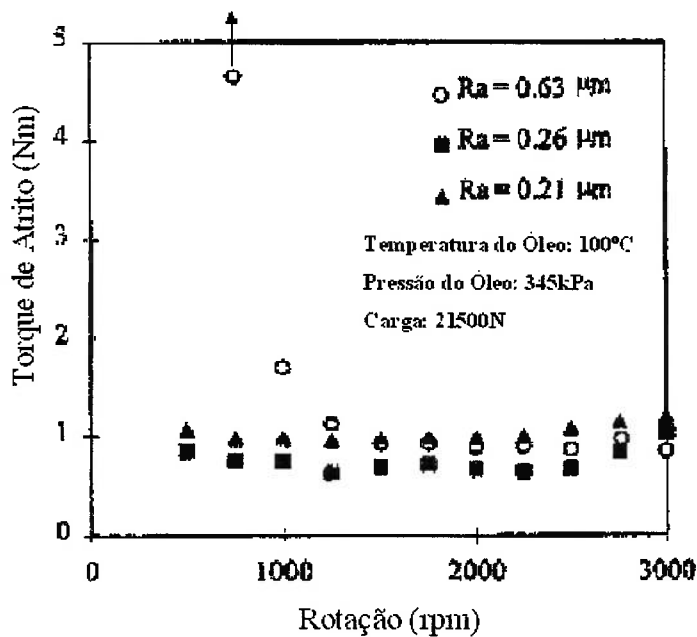


Figura 2.38: Efeito do Acabamento Superficial da Bronzina no Atrito (Sorab e Kocek, 1998)

Os dados apresentados no trabalho de Sorab e Kocek (1998) mostram que o atrito em bronzinas pode ser substancialmente reduzido e a capacidade de carga melhorada, através da utilização de aditivos no lubrificante e adotando melhorias na

superfície da bronzina, mas não mencionam o sentido em que a rugosidade foi avaliada, nem o tipo de acabamento superficial (transversal ou longitudinal).

2.8.1 Desempenho de Bronzinas Mandriladas x Brochadas

A fim de avaliar a resistência ao engripamento, Ni e Cheng (1996a) testaram em bancada diferentes ligas AlPbSi. A Fig. 2.39 mostra um esquema do equipamento utilizado. A peça de teste é montada numa biela e é aplicado um carregamento estático através de um acionador pneumático. Os parâmetros de teste estão descritos na Tabela 2.3.

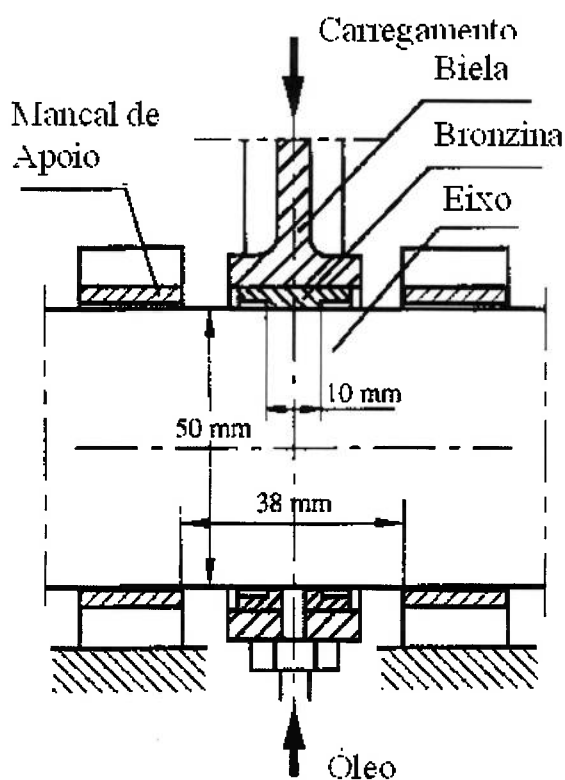


Figura 2.39: Esquema do Equipamento de Teste de Bancada (Ni e Cheng, 1996a).

| | |
|-------------------------------------|------------|
| Diâmetro da Bronzina (mm) | 50,025 |
| Largura da Bronzina (mm) | 10,0 |
| Folga Diametral (mm) | 0,042 |
| Espessura da Bronzina (mm) | 1,5 |
| Rotação do eixo (rpm) | 3000 |
| Temperatura de entrada do óleo (°C) | 135 |
| Pressão de entrada do óleo (kPa) | 1,7 |
| Óleo Lubrificante | SAE 10W-30 |

Tabela 2.3: Parâmetros de Teste (Ni e Cheng, 1996a)

Foram testadas bronzinas designadas por AL1, AL2 e AL3 (AL1 e AL2 tem mesma composição, mas sofreram tratamentos térmicos diferentes); a composição química das peças é mostrada na Tabela 2.4.

| Elementos (%) | AL1 e AL2 | AL3 |
|---------------|-------------|-----------|
| Al | Restante | Restante |
| Pb | 4,0 – 8,0 | 6,5 – 9,0 |
| Si | 3,25 – 4,75 | 3,5 – 4,5 |
| Sn | 0,25 – 1,25 | 1,0 – 1,6 |
| Cu | 0,05 – 0,15 | 0,5 – 1,0 |

Tabela 2.4: Composição Química das Ligas Testadas (Ni e Cheng, 1996a)

Foram testadas as seguintes configurações de peças:

AL1: brochada (BCH) e mandrilada (BRD)

AL2: brochada (BCH)

AL3: mandrilada (BRD)

Bronzinas AL1 com acabamento brochado e mandrilado foram testadas, o acabamento superficial das peças é descrito na Tabela 2.5.

| Peça AL1 | Rugosidade Transversal | Rugosidade Longitudinal |
|------------------|------------------------|-------------------------|
| Brochada (BCH) | 0,2 – 0,3 | 0,35 – 0,45 |
| Mandrilada (BRD) | 0,1 | 0,08 |

Tabela 2.5: Rugosidade Ra (μm) das Peças AL1 Testadas (Ni e Cheng, 1996a)

Como material do eixo foi utilizado o ferro fundido nodular, com mesma composição química, mas com estruturas metalúrgicas diferentes, denominados NC1 e NC2, e com dois tipos de acabamento diferentes denominados F1 e F2.

Nota-se que neste trabalho foram testadas bronzinas com materiais e acabamentos diferentes, e eixos em materiais e acabamentos diferentes, mas não foram feitos testes de todas as combinações possíveis.

A Fig.2.40 mostra um gráfico típico do teste com carregamento incremental. Nota-se que no início de cada carregamento há um aumento da temperatura e do atrito e depois um decréscimo rápido, o que faz com que haja a formação de um pico nos gráficos. Este fenômeno foi relacionado ao re-amaciamento devido ao novo carregamento (Ni e Cheng, 1996a). Mas, um elevado pico destes pode estar indicando a ocorrência de engripamento. Com bronzinas brochadas, se a máquina fosse desligada logo após a ocorrência de um pico, mesmo que não houvesse indícios de falha por engripamento, notou-se uma marca de engripamento localizada.

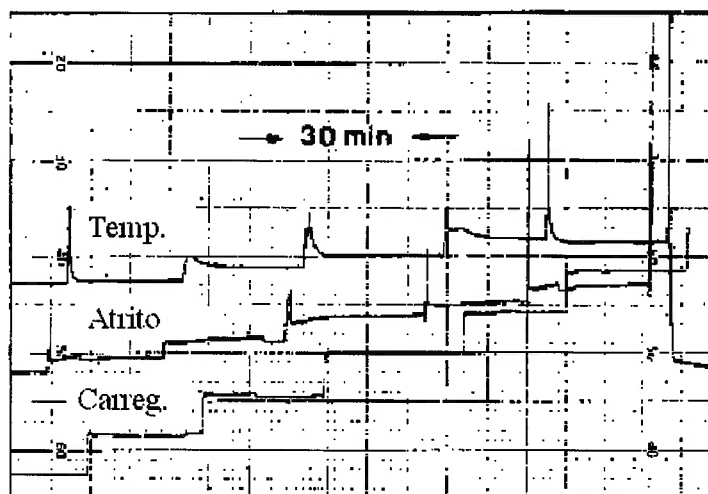


Figura 2.40: Ensaio de Engripamento – Gráfico Típico Durante Aumento Gradual de Carregamento (Ni e Cheng, 1996a).

Diferentes tipos de bronzinas podem tolerar níveis diferentes de temperatura e atrito antes da ocorrência da falha por engripamento.

O controle de desligamento do sistema foi determinado pela temperatura, pois algumas vezes o atrito poderia ter um aumento, mas a bronzina se recuperava, enquanto que poderia ocorrer uma falha catastrófica se a temperatura estivesse acima de determinado limite.

Na Fig. 2.41, estão comparados os resultados das peças AL1 (destacados no gráfico). Nota-se que as bronzinas mandriladas (identificadas pela sigla BRD - bored) apresentaram maior resistência ao engripamento do que as bronzinas brochadas (identificadas pela sigla BCH - broached). Esta tendência permaneceu mesmo com a utilização de eixos NC2 com acabamentos diferentes (F1 e F2).

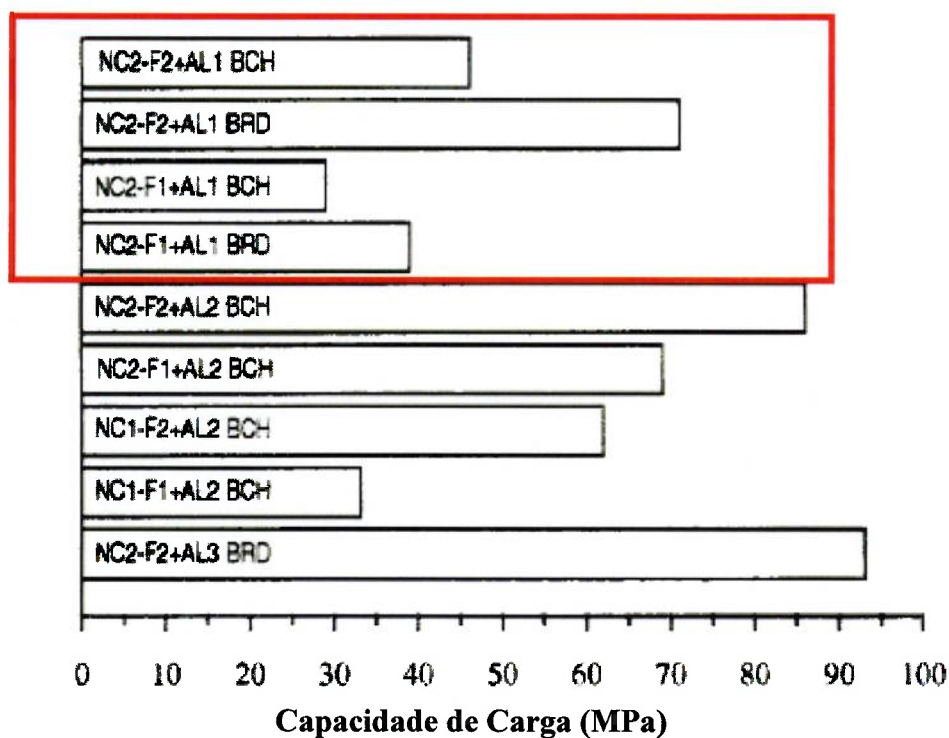


Figura 2.41: Resultados Teste de Bancada – Resistência ao Engripamento (Ni e Cheng, 1996a).

Como descrito no item 2.6, as propriedades de rugosidade das superfícies podem ser descritas pelo parâmetro de superfície γ , segundo Patir e Cheng (1978a). A Fig.2.42 mostra um outro resultado de Ni e Cheng (1996a), onde a capacidade de carga de peças com $\gamma = 9$ e $0,11$ foi comparada com $\gamma = 1$, numa condição de $\lambda = h_{\min}/\sigma = 2$. Pode-se notar que quando o valor de B/D (largura/diâmetro) é igual a $0,195$, bronzinas com rugosidade na direção axial ou longitudinal têm a mesma capacidade de carga.

No caso das peças estudadas por Ni e Cheng (1996a), o quociente entre a largura da bronzina e o diâmetro é igual a $0,2$, o que, segundo o gráfico da Fig. 2.43, não geraria muita diferença entre peças mandriladas e brochadas. Portanto, deveria haver outra explicação para a diferença de comportamento das bronzinas mandriladas e brochadas.

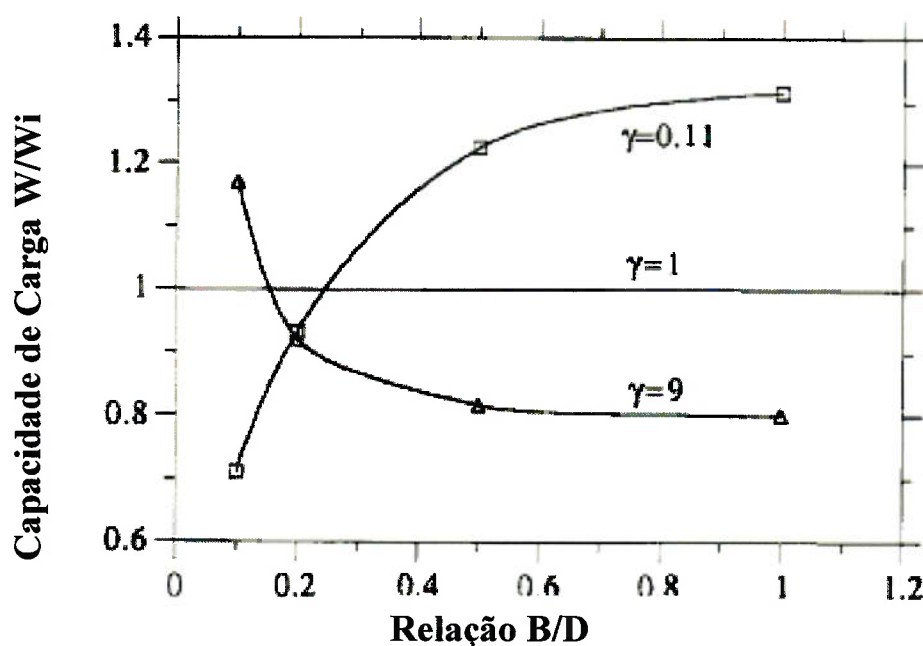


Figura 2.42: Capacidade de Carga de Bronzinas com rugosidades $\gamma=9$ e $0,11$ comparada com superfície com rugosidade isotrópica (Ni e Cheng, 1996a).

Comparando os resultados obtidos para as bronzinas mandriladas AL3 (Fig. 2.43), nota-se que houve uma diferença de rugosidade $R_a = 0,35$ axial e $0,09$ longitudinal. As peças AL3 apresentavam rugosidade maior no sentido axial que peças AL1, e houve uma diferença com relação à resistência ao engripamento. Mas, comparando a temperatura das peças, não se nota uma substancial diferença entre AL1 e AL3 mandriladas (Fig. 2.43). Conclui-se, portanto, que há uma diferença maior entre as peças com acabamento brochado e mandrilado do que entre as duas peças com acabamento mandrilado.

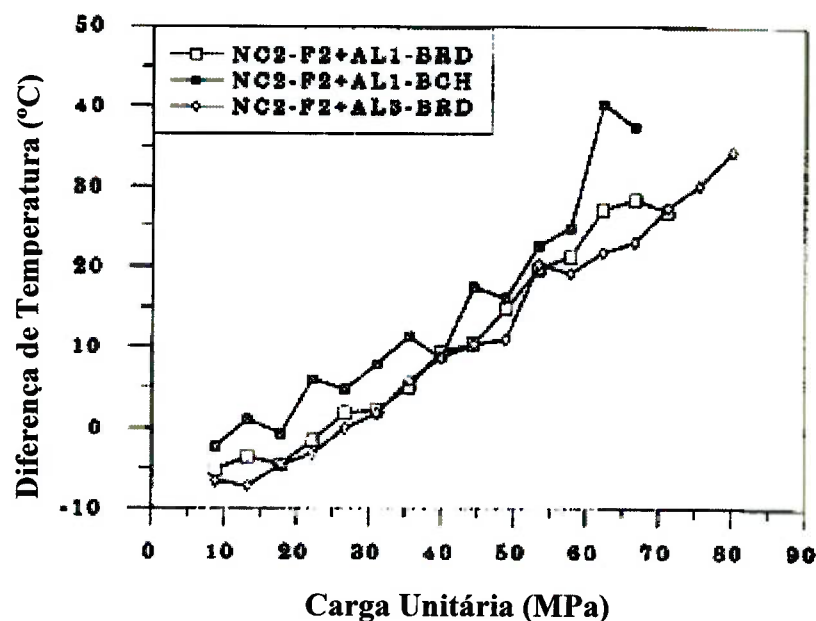


Figura 2.43: Diferença de Temperatura nas Costas das Bronzinas Comparada com a Temperatura do Óleo do Teste (Ni e Cheng, 1996a)

Segundo Ni e Cheng (1996a) após a ocorrência de microsoldas (Fig. 2.23), os debris gerados podem ser transportados pelos microcanais na superfície de uma bronzina mandrilada, devido à direção da rugosidade e ao movimento do eixo. Isto evita a propagação do microsoldas para regiões adjacentes na transversal. Com o aumento do carregamento, há certo ponto em que não é possível evitar o contato de asperezas adjacentes no sentido axial, então ocorre o engripamento.

Já no caso de bronzinas brochadas, quando ocorre a formação de debris após a ocorrência de micro-soldas, as partículas geradas ficam “presas” entre uma área de contato e outra, não sendo possível sua passagem juntamente com o fluxo de óleo. Devido ao contato ser maior no sentido axial, é mais fácil a propagação da micro-solda e a ocorrência do engripamento devido ao movimento de rotação do eixo. Portanto, conclui-se que é mais fácil a ocorrência de micro-soldas em bronzinas com acabamento brochado do que em peças com acabamento mandrilado, o que justifica os resultados obtidos nos testes de bancada das peças AL1 (Fig. 2.41).

Em outro trabalho, Ni e Cheng (1996b) testaram bronzinas trimetálicas e bimetálicas com diferentes acabamentos, no mesmo tipo de bancada que foi descrito

anteriormente. Novamente, foi aplicado um carregamento compressivo; foram avaliados o carregamento, o atrito e a temperatura nas costas da peça (lado do aço), a fim de avaliar a resistência ao engripamento de três diferentes materiais:

- Liga de CuPb (BCL) com overlay de PbSnCu. Neste caso, foi informado que o acabamento superficial da liga foi brochado, o que não é importante, pois uma camada de overlay foi eletrodepositada sobre a liga, o que encobriu a textura superficial pré-existente.
- Liga de alumínio (BA1), SAE 793 (AlSn), com acabamento mandrilado. A rugosidade Ra no sentido transversal da peça foi Ra=0,35µm
- Liga de alumínio (BA2), SAE 788 (AlSnSi) com acabamento mandrilado com rugosidade Ra transversal igual a 0,39µm. Esta liga continha partículas de Si da ordem de 5 – 10 µm.

Foram utilizados dois materiais de eixos diferentes NC1 e NC2, com duas formas de acabamentos distintas F1 e F2.

Os acabamentos são listados na Tabela 2.6 abaixo, avaliados no sentido axial de cada uma das peças:

| Bronzina | Ra (µm) | Eixo | Ra (µm) | Eixo | Ra (µm) |
|-----------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|
| BA1 | 0,35 | NC1 – F1 | 0,10 | NC2 – F1 | 0,08 |
| BA2 | 0,39 | NC1 – F2 | 0,09 | NC2 – F2 | 0,07 |

Tabela 2.6: Acabamento superficial das bronzinas e eixos testados por Ni e Cheng (1996b) – Avaliado no sentido axial

A Fig.2.44 mostra os resultados obtidos em termos da resistência ao engripamento. Pode-se notar que bronzinas BA1 apresentaram boa resistência ao engripamento com o eixo NC2-F2. A inclusão de partículas de silício na liga fez com que a resistência ao engripamento diminuísse. Já a bronzina trimetálica, BCL, apresentou a maior resistência ao engripamento com o eixo NC2-F2 e uma baixa resistência ao engripamento com o eixo NC2-F1.

Novamente Ni e Cheng (1996b) não avaliaram todas as combinações de testes possíveis entre variações de material e acabamento de eixos e bronzinas.

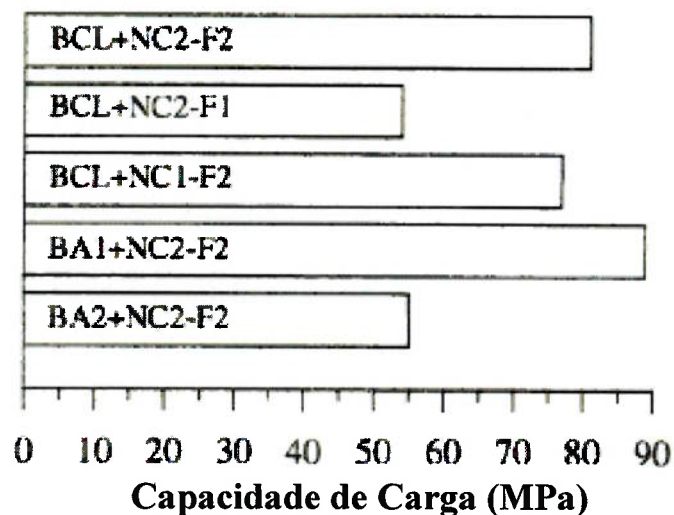


Figura 2.44: Testes de Bancada - Resistência ao Engripamento (Ni e Cheng, 1996b).

Nos testes com as peças CuPb (BCL) a temperatura e o atrito aumentaram diretamente a cada aumento de carga durante o teste. A Fig. 2.45 mostra um gráfico típico de temperatura e carga para as peças trimetálicas. Nota-se que somente um pequeno pico de temperatura foi detectado quando houve um aumento de carga. Isto demonstra as boas propriedades tribológicas da camada eletrodepositada. Em um determinado carregamento, a temperatura e o atrito começam a apresentar flutuações, e o engripamento ocorreu entre os dois próximos aumentos de carga.

Quando ocorreu o engripamento houve um aumento súbito de temperatura e atrito.

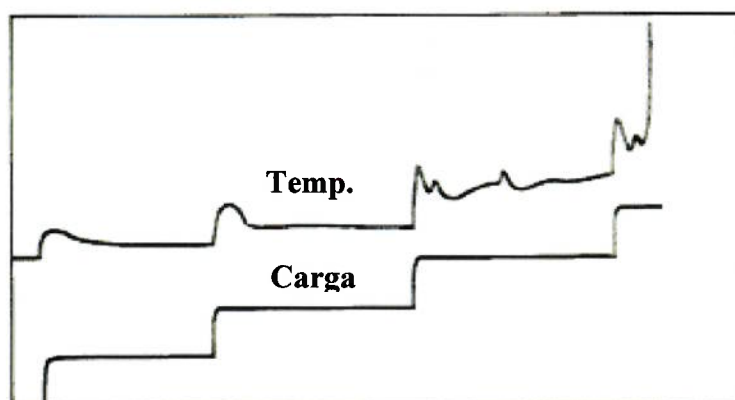


Figura 2.45: Gráfico Típico – Ensaio de Bronzinas CuPb (Ni e Cheng, 1996b).

Bronzinas AlSn (BA1) apresentaram boa resistência ao engripamento quando testadas contra os eixos NC2-F2, apesar de Fukuoka et al (1983) reportarem que bronzinas de AlSn não apresentam boa compatibilidade com eixos de ferro fundido. As maiores diferenças encontradas foram a quantidade de ferrita presente no eixo analisado neste trabalho e o tipo de acabamento (muito fino) utilizado neste teste.

No teste de Ni e Cheng (1996b), a cada aumento na carga aplicada, havia um aumento correspondente na temperatura e no atrito. Isto mostra que as fases de estanho na liga funcionam como um bom lubrificante sólido. Mas, num certo carregamento, a temperatura e o atrito começam a sofrer flutuações (Fig. 2.46), se o carregamento fosse aumentado novamente a amplitude da flutuação seria maior. Neste momento, ainda não ocorreu o engripamento, mas nota-se que a rotação do eixo tende a diminuir até que o atrito tenha um aumento muito grande, quando foi então detectado o engripamento.

Os autores apresentam algumas hipóteses para explicar este comportamento das bronzinas AlSn. A temperatura da bronzina aumenta com o aumento da carga. Quando a temperatura máxima da superfície alcança o ponto de fusão do estanho, a fase Sn começa a se fundir e, devido ao movimento do eixo, é espalhada sobre a superfície da bronzina. Sem a proteção do estanho nesta determinada região, começa a acontecer o mecanismo de adesão entre o Al e o material do eixo, fazendo com que haja um aumento do atrito e da temperatura. O Al é então desgastado e o Sn da camada imediatamente inferior é exposto fazendo com que a temperatura diminua. Com isto, a área de contato vai aumentando cada vez mais, e a amplitude da temperatura fica cada vez maior até que haja a falha da bronzina e a parada do teste.

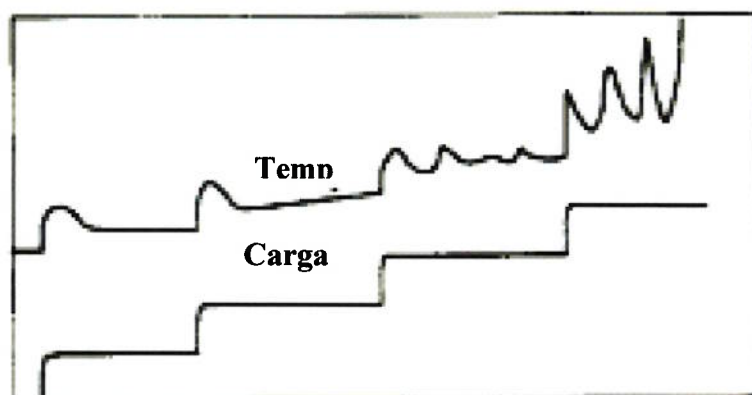


Figura 2.46: Gráfico Típico – Ensaio de Bronzinas AlSn - BA1 (Ni e Cheng, 1996b).

Nos testes com a liga BA2 os resultados não foram conforme esperado. Esperava-se que a adição de partículas de Si aumentasse a resistência ao engripamento. Mas, neste caso, notou-se que as peças em BA2 apresentaram maiores picos de temperatura e atrito do que as peças BA1, mesmo durante o período de amaciamento, no início do teste. Em alguns casos foi possível recuperar a temperatura e o atrito, e um próximo carregamento pôde ser aplicado; em outros casos, houve a falha da peça.

Como foi notado, grandes picos de atrito e temperatura indicaram a ocorrência de micro-soldas localizadas, mas que puderam vir a desenvolver um engripamento, devido à propagação do calor pela liga na superfície da peça. Partículas grandes na liga geralmente proporcionam este tipo de ocorrência. A ocorrência de grandes picos de temperatura e atrito indica que as partículas de silício presentes na liga BA2 eram muito grandes.

Se partículas de Si são muito grandes, existe a ocorrência de engripamento (micro-soldas) localizado nestas partículas, ou ao seu redor, devido ao aumento de temperatura. Uma partícula grande pode ser a causadora do engripamento localizado, provocando o aumento de temperatura e atrito, mas um engripamento generalizado pode ser consequência do aumento de temperatura e da fusão do estanho ao redor da partícula de Si.

Por outro lado, partículas muito pequenas de Si podem não ser suficientes para polir a superfície do eixo e impedir o desenvolvimento de desgaste adesivo entre o alumínio e o material do eixo (Ni e Cheng, 1996b). Deve existir um tamanho ótimo de partículas que seja suficiente para polir o eixo e não causar o engripamento.

2.8.2 Desempenho de Bronzinas Microperfiladas x Brochadas

Watanabe et al (2000) desenvolveram um estudo baseado na modificação do perfil de bronzinas. Foi proposta a análise de uma bronzina com microperfilamento circunferencial (Fig.2.47a). Watanabe et al (2000) compararam bronzinas microperfiladas com bronzinas brochadas (Fig. 2.47b) por simulação numérica EHL (elastohidrodinâmica). Neste tipo de simulação são levadas em consideração as deformações elásticas da bronzina e de seu alojamento (veja item 2.3).

Nota-se que o perfil das bronzinas microperfiladas apresenta uma superfície trapezoidal e não triangular, a fim de facilitar a simulação numérica, ou seja, apresenta um perfil já desgastado.

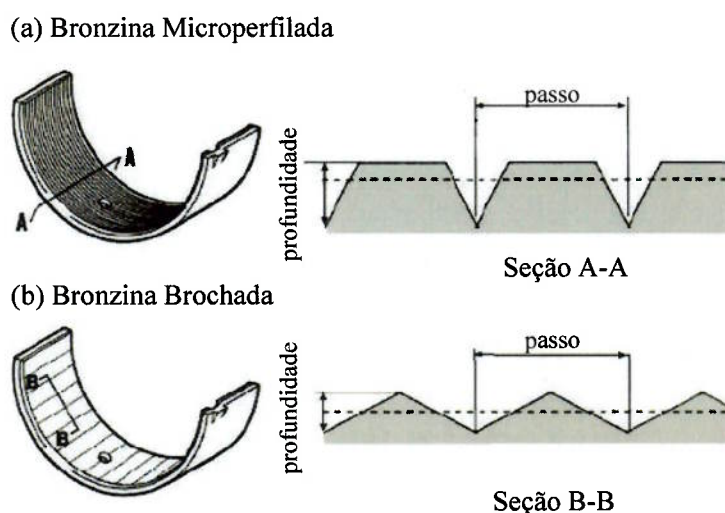


Figura 2.47: Superfície de Bronzina (a) Microperfilada (b) Brochada

(Watanabe et al, 2000)

Foram verificados a espessura mínima do filme de óleo, o fluxo de óleo e o torque de atrito (resistivo). A Tabela 2.7 apresenta as condições de cálculo.

| | |
|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Motor | 1,6L, 4 cilindros, gasolina |
| Rotação | 6000 rpm |
| Máxima Pressão de Combustão | 6,8 MPa |
| Diâmetro do Eixo | 42 mm |
| Largura da Bronzina | 16,5 mm |
| Folga Diametral | 20, 30 e 40 μ m |
| Viscosidade do Lubrificante | 3,3 m.Pa.s |
| Módulo de Elasticidade | 210 GPa |
| Coefficiente de Poisson | 0,3 |
| Acabamento Microperfilado (considerando o perfil desgastado) | Profundidade: 1,5 μ m Passo: 0,20mm |
| Acabamento Brochado | Profundidade: 1,0 μ m |

Tabela 2.7: Condições de Cálculo (Watanabe, 2000)

A espessura mínima do filme de óleo em função da folga diametral do sistema para bronzinas microperfiladas foi maior que para bronzinas brochadas (Fig.2.48), quando se considerou regime EHL. Considera-se espessura mínima de filme de óleo a distância entre o pico mais alto da rugosidade de o eixo. Quanto maior a folga diametral, menor a espessura do filme de óleo. É importante checar a espessura mínima do filme de óleo para que se possa prevenir a ocorrência de engripamento nas bronzinas. A espessura do filme de óleo foi definida como a distância entre o topo do perfil da superfície da bronzina e a superfície do eixo.

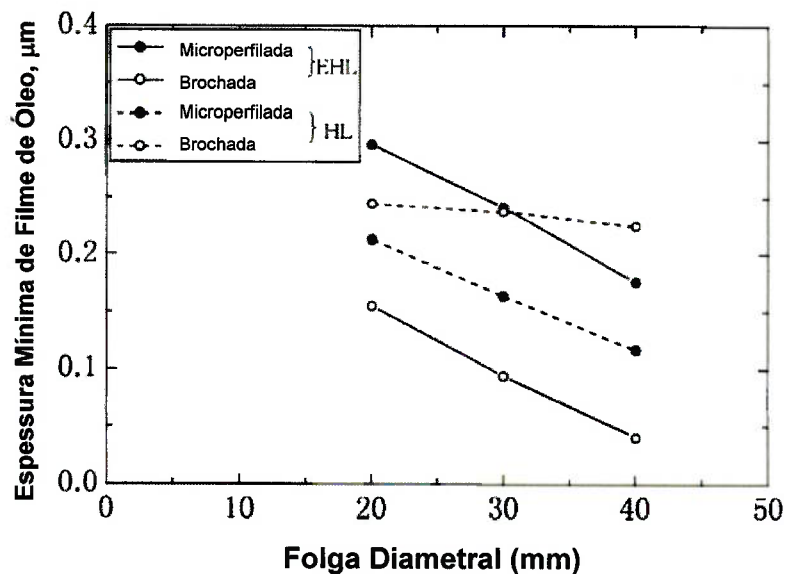


Figura 2.48: Espessura Mínima do Filme de Óleo (Watabane et al, 2000).

A Fig. 2.49 apresenta a variação da espessura do file de óleo ao longo da largura da bronzina, considerando folga de $40\mu\text{m}$. Nota-se que quando é feita a simulação em EHL, a espessura do filme de óleo varia em relação à largura da bronzina, devido às deformações do alojamento. Nota-se que somente na região central da bronzina, o filme de óleo para bronzinas microperfiladas é menor que para bronzinas brochadas, no caso da simulação EHL.

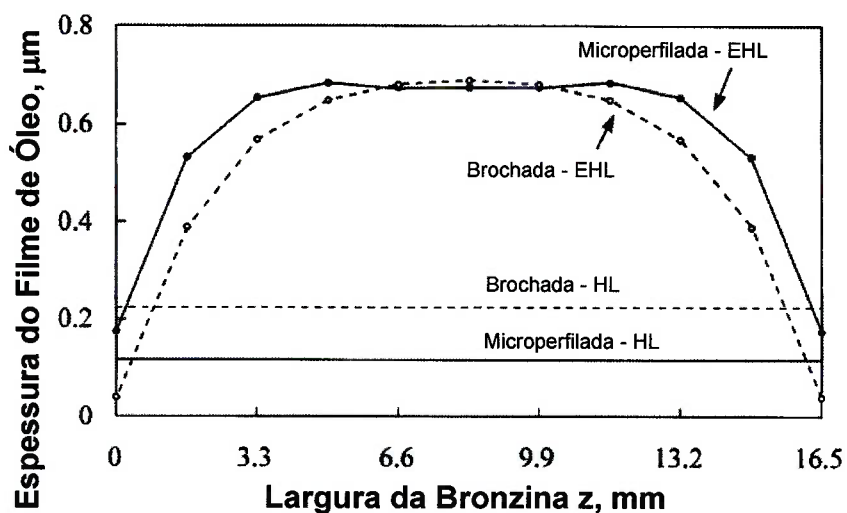


Figura 2.49: Espessura do filme de Óleo x Largura da Bronzina (Watanabe et al, 2000)

A Fig. 2.50 apresenta os resultados de avaliação da pressão do óleo ao longo da largura da bronzina, considerando-se uma folga diametral de $40\mu\text{m}$. Nota-se que, no caso EHL, as bronzinas microperfiladas apresentam uma pressão menor (cerca de 50MPa) que as bronzinas brochadas. Com isto os autores (Watanabe et al, 2000) consideram que as bronzinas microperfiladas terão maior resistência à fadiga.

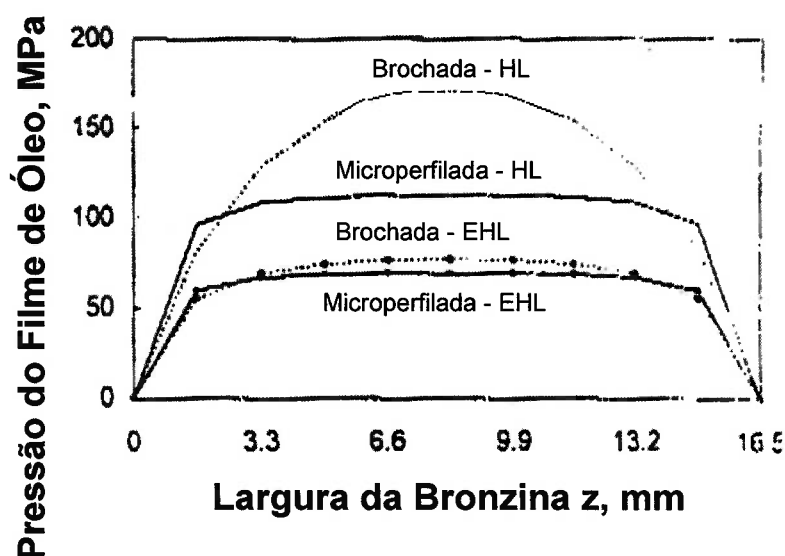


Figura 2.50: Pressão do Filme de Óleo x Largura da Bronzina (Watanabe et al, 2000)

Na simulação HL foi verificado que a máxima pressão do filme de óleo em bronzinas microperfiladas é menor que em bronzinas brochadas (Fig.2.51) e quanto maior a folga diametral, maior esta diferença. Mas, na simulação EHL, nota-se que não há grande diferença entre as bronzinas microperfiladas e brochadas, nem mesmo com a variação da folga diametral. Provavelmente, isto se deve a melhor distribuição de pressão na superfície da peça, quando se consideram as deformações da bronzina e do alojamento (item 2.3).

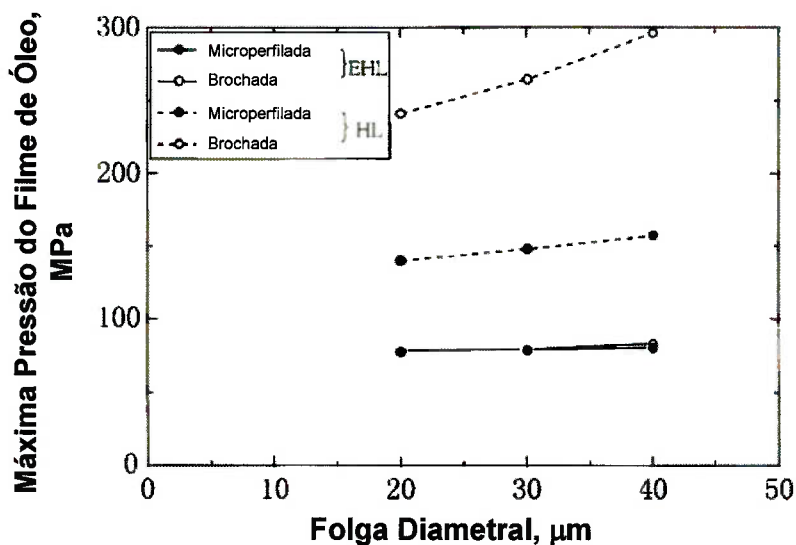


Figura 2.51: Máxima Pressão do Filme de Óleo (Watanabe et al, 2000)

Existe uma preocupação com relação ao fluxo de óleo nas bronzinas, que pode influenciar na resistência ao engripamento e à fadiga (Kumada et al, 2000). Na Fig. 2.52 é mostrada a comparação do fluxo de óleo tanto em bronzinas microperfiladas como brochadas, em função da folga diametral. Nos dois tipos de avaliações realizadas, nota-se uma pequena vantagem (cerca de 3%) da bronzina microperfilada em relação à bronzina com acabamento brochado.

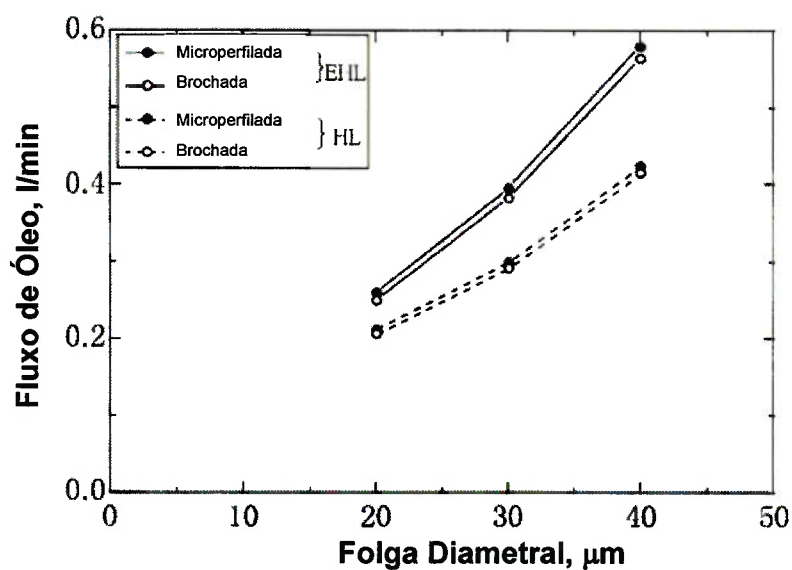


Figura 2.52: Fluxo de Óleo (Watanabe et al, 2000).

Watanabe et al (2000) mencionam que também é importante prever o torque gerado por atrito nas bronzinas durante a fase de projeto, pois a este torque estão associados aumentos de temperatura. Na Fig. 2.53 é possível notar que o torque de atrito calculado pela simulação em regime EHL é menor nas bronzinas microperfiladas do que nas bronzinas brochadas. No caso de simulação HL, com 20 μm de folga diametral, tem-se o torque de atrito menor para bronzinas microperfiladas, mas a 30 e 40 μm de folga, as bronzinas microperfiladas apresentam um torque de atrito maior que as bronzinas brochadas.

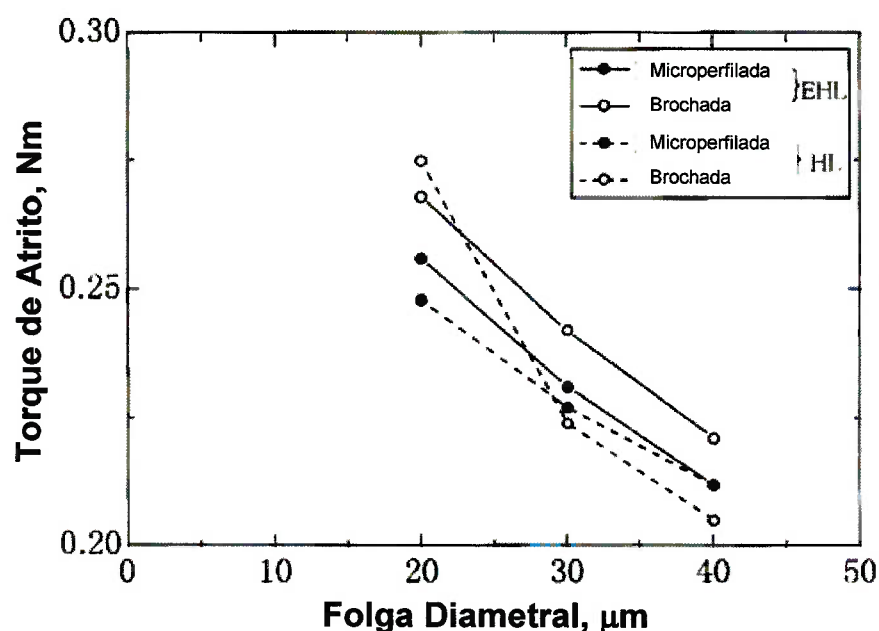


Figura 2.53: Torque de Atrito (Watanabe et al, 2000).

Através destes resultados, Watanabe et al (2000) concluíram que a durabilidade (resistência ao desgaste), bem como a resistência ao engripamento e à fadiga de contato, das bronzinas microperfiladas é superior à das bronzinas brochadas devido a:

- melhoria da conformabilidade obtida pela rápida deformação plástica e desgaste no topo do perfil,
- menor aumento de temperatura nas bronzinas,

A temperatura da bronzina, que pode influenciar na ocorrência do engripamento, e na fadiga, depende do balanço do calor gerado pelo atrito e o “transportado” pelo lubrificante e transmitido pelo eixo e pela bronzina. Segundo os autores Watanabe et al (2000), o aumento de temperatura em bronzinas microperfiladas é menor que em bronzinas brochadas, porque o calor gerado nestas bronzinas é menor que o gerado em bronzinas brochadas, pois o torque causado pelo atrito é menor. E também pode-se considerar que o calor transportado pelo óleo lubrificante é maior, devido ao maior fluxo de óleo.

Kumada et al (1996) realizaram experimentos comparando bronzinas brochadas e bronzinas microperfiladas. A Tabela 2.8 mostra as características de material e acabamento das bronzinas microperfiladas testadas por estes autores.

| | |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Material da Bronzina | Cu-24Pb-3Sn |
| Material da Cobertura | Pb-Sn-In |
| Espessura da Cobertura | 12 – 18 μm |
| Dureza da Cobertura | 9 – 12 HV (0,02N) |
| Características do Microperfilamento | Passo: 0,20 – 0,25mm Profundidade: 4,0 – 4,5 μm |

Tabela 2.8: Características das Bronzinas Microperfiladas Testadas (Kumada et al, 1996)

Foram realizados três tipos de experimentos a fim de comparar propriedades das bronzinas trimetálicas microperfiladas e brochadas. Apesar de Ni e Cheng (1996b) mencionarem que o acabamento superficial não tem grande influência quando se trata de bronzinas trimetálicas.

O coeficiente de atrito foi obtido através de um equipamento de carregamento estático sob diversas condições de operação. Adicionalmente, a mudança na temperatura das bronzinas em um motor de combustão interna foi medida em diferentes rotações, e igualmente determinou-se o tempo até a ocorrência de engripamento, após o corte do fornecimento de óleo.

Na Tabela 2.9 são descritas as condições do teste de carregamento estático para verificação do coeficiente de atrito nas bronzinas.

| | | |
|---------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|
| Condições Fixas | Diâmetro Interno da Bronzina | 42mm |
| | Largura da Bronzina | 17mm |
| | Material do Eixo | 0,45%C (aço carbono) endurecido por indução |
| | Dureza do Eixo | 500 – 600 HV (10N) |
| | Rugosidade do eixo | Ra: 0,07- 0,10 μm |
| | Folga diametral | 35 \pm 4 μm |
| | Óleo lubrificante | 3W – 30 SG |
| Condições Variáveis | Temperatura do óleo lubrificante | 30 – 80°C |
| | Carga Unitária | 10 – 50 MPa |
| | Rotação | 300 – 1300 rpm |

Tabela 2.9: Condições do Teste de Verificação do Coeficiente de Atrito (Kumada et al, 1996)

A Fig. 2.54 apresenta a diferença entre o torque de atrito avaliado para as bronzinas. Nota-se que os picos e flutuações do atrito indicam a presença de muitos contatos metal-metal, que ocorrem após a aplicação de maior carregamento por um certo tempo, e depois há um decréscimo, indicando o re-estabelecimento de um regime hidrodinâmico de lubrificação. Kumada et al (1996) relatam que a altura dos picos é semelhante para os dois tipos de bronzinas, mas o tempo até que o torque de atrito se estabilize é menor para as bronzinas microperfiladas. Nota-se na Fig. 2.54 que a duração é menor que um minuto para as bronzinas microperfiladas, e leva cerca de cinco minutos para as bronzinas brochadas. Isto mostra que as bronzinas microperfiladas voltam ao regime de lubrificação hidrodinâmico mais rapidamente que as bronzinas brochadas, devido a sua superior conformabilidade, causada pelo desgaste e deformação dos picos de rugosidade. Este resultado é similar ao que foi obtido nos testes de bancada de Ni e Cheng (1996b) com bronzinas trimetálicas (Fig.2.45).

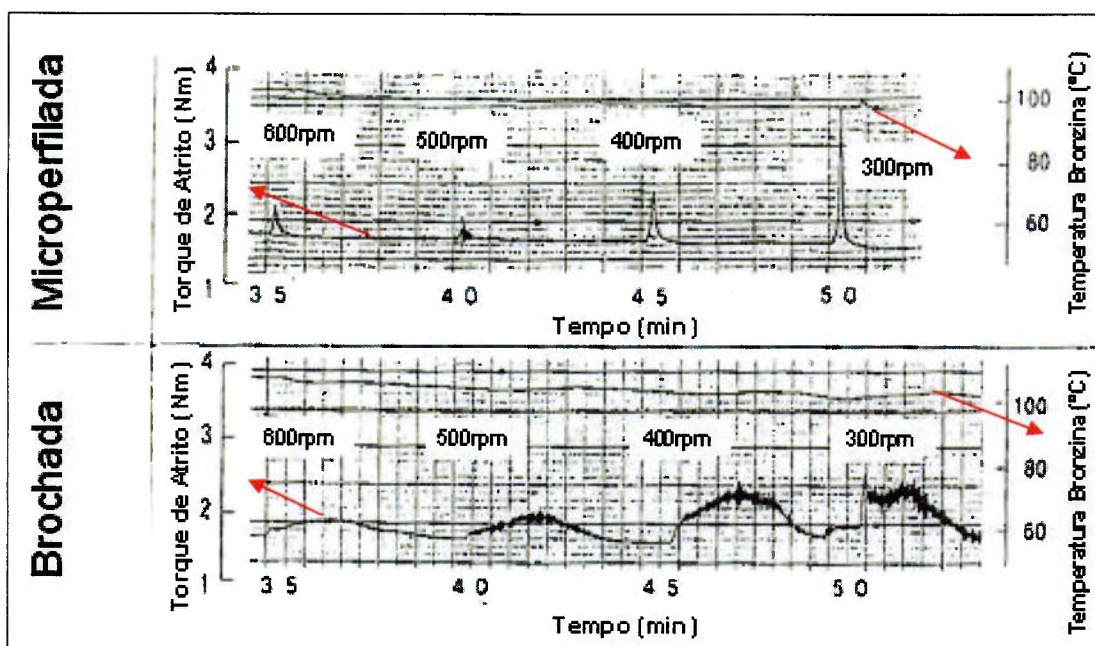


Figura 2.54: Resultados Típicos de Atrito – Bronzinas Microperfiladas e Brochadas (Kumada et al, 1996).

Segundo Kumada et al (1996), a remoção do calor gerado por atrito é essencial em bronzinas de alta-velocidade. Para o aumento da refrigeração por convecção pelo óleo lubrificante folgas maiores são melhores, mas folgas menores são necessárias para a geração de pressão hidrodinâmica para suportar os carregamentos maiores. Uma solução para este tipo de conflito pode ser encontrada nas bronzinas microperfiladas.

Kumada et al (1996) realizaram um experimento para determinar a temperatura na parte posterior de bronzinas centrais (lado do aço) em um motor de combustão interna. Um termopar foi fixado no mancal central de um motor e a temperatura foi monitorada em diferentes rotações do motor. A Tabela 2.10 mostra as condições do sistema.

| | |
|--------------------------------|---------------------------------------------|
| Motor | 2,0 litros – L6 gasolina |
| Diâmetro Interno da Bronzina | 55 mm |
| Largura da Bronzina | 19 mm |
| Material do Eixo | 0,5%C aço carbono endurecido por indução |
| Dureza do Eixo | 500 – 600 HV (10N) |
| Rugosidade do Eixo | Ra: 0,03 – 0,05 μm |
| Folga diametral | 48 \pm 2 μm |
| Óleo Lubrificante | 7,5W-30SE |
| Temperatura de entrada do óleo | 130 \pm 1°C |
| Máxima Carga Unitária | 40,6 MPa (7700 rpm) |
| Máxima Rotação | 7700 rpm |

Tabela 2.10: Condições do Experimento para Verificação da Temperatura em Bronzinas (Kumada et al, 1996)

Como mostra a Fig. 2.55, quando utilizada como bronzina central em motores de combustão interna a gasolina, a temperatura da bronzina aumenta com o quadrado da rotação. Após teste, bronzinas microperfiladas demonstraram menor aumento de temperatura. Isto foi explicado pelo maior efeito de resfriamento, pelo aumento do fluxo de óleo nestas peças.

Uma terceira série de experimentos foi conduzida por Kumada et al (1996) para checar a propriedade de retenção de óleo das bronzinas microperfiladas e brochadas. O equipamento utilizado é mostrado na Fig. 2.56. No início do teste existia fornecimento de óleo para as bronzinas, mas, após um certo tempo, o suprimento de óleo foi cortado, fechando-se uma válvula. Os autores avaliaram o tempo que as peças suportavam sem que ocorresse o engripamento. Após 50 minutos, se não houvesse ocorrência de engripamento o teste era finalizado.

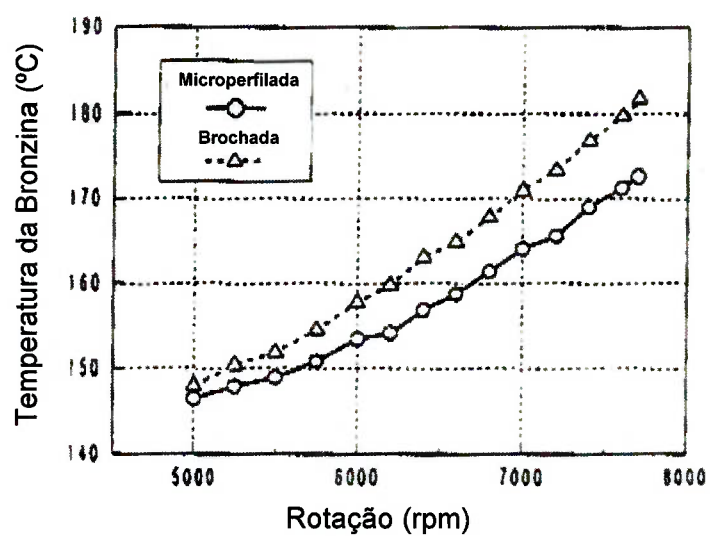


Figura 2.55: Variação da Temperatura x Rotação (Kumada, 1996)

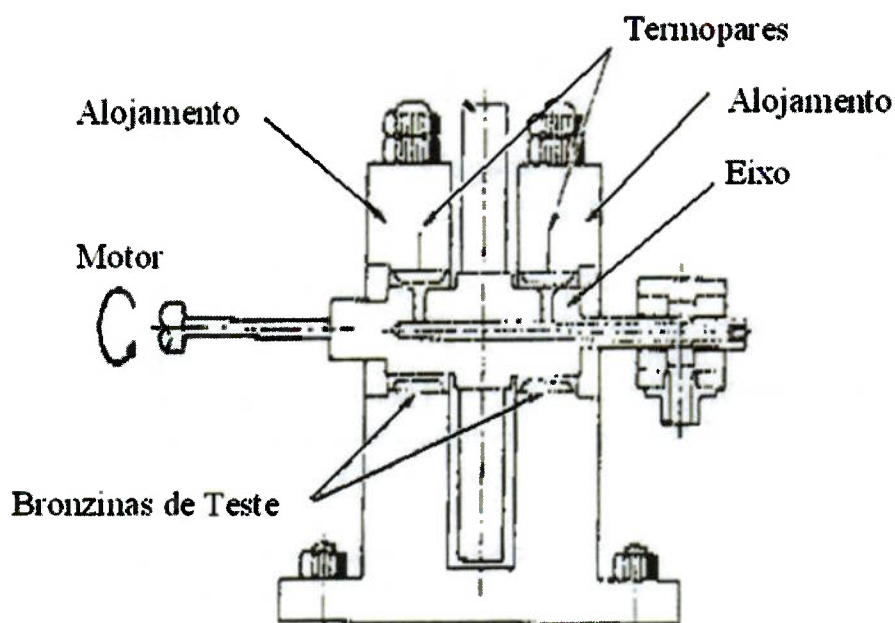


Figura 2.56: Esquema Equipamento – Avaliação de Resistência ao Engripamento (Kumada et al, 1996)

A Tabela 2.11 mostra as condições em que foi realizado o teste de retenção de óleo.

| | |
|------------------------------|-------------------------------------------------|
| Diâmetro Interno da Bronzina | 42 mm |
| Largura da Bronzina | 17 mm |
| Material do Eixo | 0,45% C (aço carbono) endurecido por indução |
| Dureza do Eixo | 500 – 600 HV (10N) |
| Rugosidade do Eixo | Ra: 0,05 – 0,08 μm |
| Folga Diametral | 75 \pm 4 μm |
| Óleo Lubrificante | 7,5W – 30 SE |
| Temperatura do Óleo | 80 \pm 1°C |
| Carga Unitária | 11,3MPa |
| Rotação | 5000 rpm |

Tabela 2.11: Condições do Experimento de Retenção de Óleo (Kumada et al, 1996).

O tempo de funcionamento sem ocorrência de engripamento, após corte do suprimento de óleo, foi maior para bronzinas microperfiladas, e não houve nenhuma ocorrência de falha (Fig. 2.57). Isto sugere uma maior retenção de óleo pelas bronzinas microperfiladas.

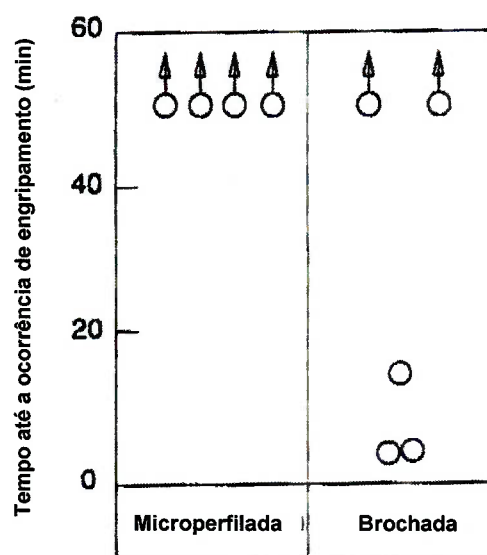


Figura 2.57: Resistência ao Engripamento – Bronzina Microperfilada x Brochada (Kumada et al, 1996).

2.8.3 Compatibilidade Bronzina x Virabrequim

Onogawa et al (1988) verificaram que a combinação de materiais entre bronzina e virabrequim é muito importante para prevenir a ocorrência de engripamento e desgaste. Os principais materiais de eixo utilizados são ferro fundido nodular e aço. Para bronzinas, como mencionado anteriormente, utilizam-se ligas de bronze (CuPb) com overlay e ligas de alumínio (AlSn ou AlSnSi).

Nesse trabalho, Onogawa et al (1988) verificaram que existem certas combinações que apresentam melhores resultados, ou seja, melhor compatibilidade entre o material da bronzina e do virabrequim. Através da verificação da temperatura do colo do virabrequim, foi constatado que:

- Para eixos em ferro fundido nodular, as temperaturas em que o engripamento ocorre para ligas de alumínio (bimetálica) é cerca de 30°C maior que para bronzinas em bronze com overlay (trimetálica).
- Para eixos em aço, a temperatura na qual ocorre o engripamento em ligas CuPb (trimetálica) é cerca de 50°C maior que para ligas de alumínio (bimetálica).

Outro fator importante a ser considerado na compatibilidade entre bronzina e virabrequim é o acabamento superficial, pois o mesmo pode influenciar na transição entre lubrificação mista e limite. O efeito do acabamento superficial do virabrequim na capacidade de carga da bronzina foi verificado através de um experimento realizado por Sorab e Korcek (1998). Foi observado que colos de virabrequim com rugosidade mais fina ($R_a=0,1\mu\text{m}$) reduziram a incidência de contato de asperezas, o que proporciona uma redução no atrito (Fig. 2.58). Isto ocorre devido ao aumento da capacidade de carga (Fig. 2.59). A diminuição do atrito, e o correspondente aumento da capacidade de carga são mais significativos a baixas rotações, que são mais propensas à ocorrência de lubrificação mista. Os dados da Fig. 2.58 sugerem que uma melhoria no acabamento superficial do colo do virabrequim tende a estender a transição para a lubrificação mista a baixas rotações.

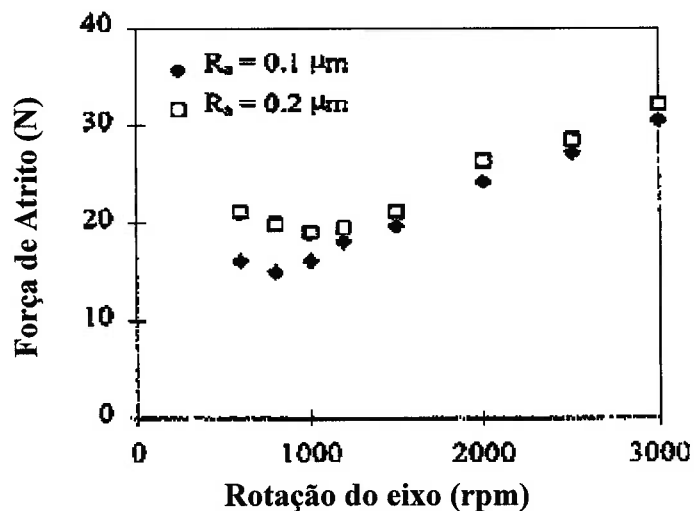


Figura 2.58: Influência do Acabamento do Eixo na Força de Atrito (Sorab e Korcek, 1998).

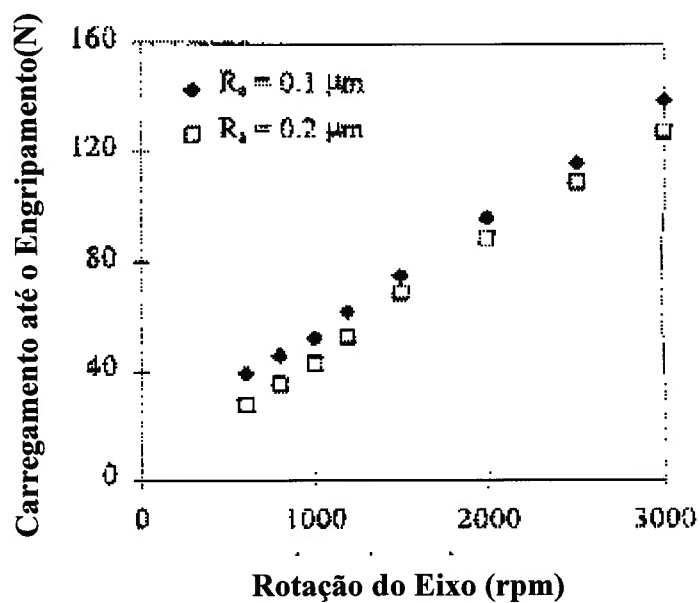


Figura 2.59: Influência do Acabamento Superficial do Eixo no Carregamento Suportado até o Engripamento (Sorab e Korcek, 1998)

No trabalho de Massey et al (1991), verificou-se que o aumento da rugosidade (R_a) dos eixos resultou em uma significativa redução no carregamento em que ocorre o engripamento.

Nos trabalhos de Ni e Cheng (1996a e 1996b), também se verificou que eixos com acabamento mais fino proporcionavam um aumento da capacidade de carga das bronzinas até a ocorrência do engripamento.

Apesar de ser o parâmetro mais comum de avaliação de rugosidade, Ra (rugosidade média quadrática) não é um parâmetro muito preciso para caracterizar uma superfície, pois superfícies com mesmo Ra podem apresentar perfis de rugosidade completamente diferentes (Tomanik, 1992). A Fig. 2.60 apresenta diversos perfis diferentes com o mesmo valor de Ra.

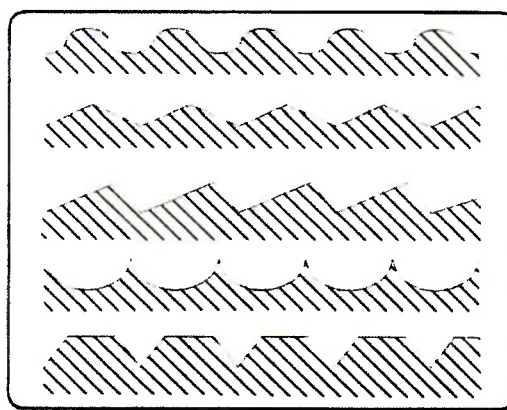


Figura 2.60: Perfis de Rugosidade Diferentes com Mesmo Valor de Ra
(Chavarria,1995)

2.9 Tendências

Neste item pretende-se mostrar alguns desenvolvimentos em andamento, com relação ao desenvolvimento de modificações nas superfícies que podem vir a contribuir para um melhor desempenho de bronzinas.

A rugosidade superficial claramente tem um efeito significativo no comportamento tribológico do sistema bronzina virabrequim. Nenhum dos parâmetros propostos até o momento é suficiente para caracterizar a superfície satisfatoriamente. A utilização de uma técnica tridimensional (3D) aliada a uma 4ª dimensão, tempo, está sendo utilizada para criar um melhor entendimento do efeito da rugosidade na interação entre estas peças. Alguns autores começaram a utilizar tal procedimento, como, por exemplo, Tomanik (2005) que mostra uma forma de analisar as superfícies em um modelo de contato tridimensional. Na Fig. 2.61 é

mostrado um exemplo de uma análise de superfície de bronzina microperfilada pelo método 3D através de um Interferômetro de Luz Branca (WLI – White Light Interferometer).

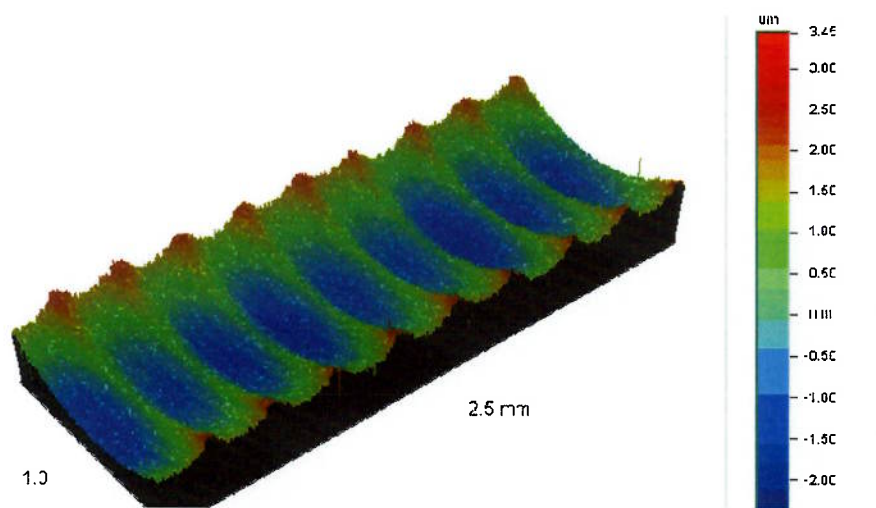


Figura 2.61: Análise 3D de Superfície de Bronzina Microperfilada (WLI) – 2,5X

No modelo proposto por Tomanik (2005), é possível, através da utilização de um programa de computador, Summits (desenvolvido e de propriedade da empresa Mahle Metal Leve), fazer a análise da área de contato entre a superfície a ser avaliada e uma superfície completamente plana. A Fig. 2.62 mostra a análise de uma superfície de bronzina mandrilada convencional e outra microperfilada supondo a existência de um filme de óleo mínimo de $0,5\mu\text{m}$ entre elas e a superfície plana.

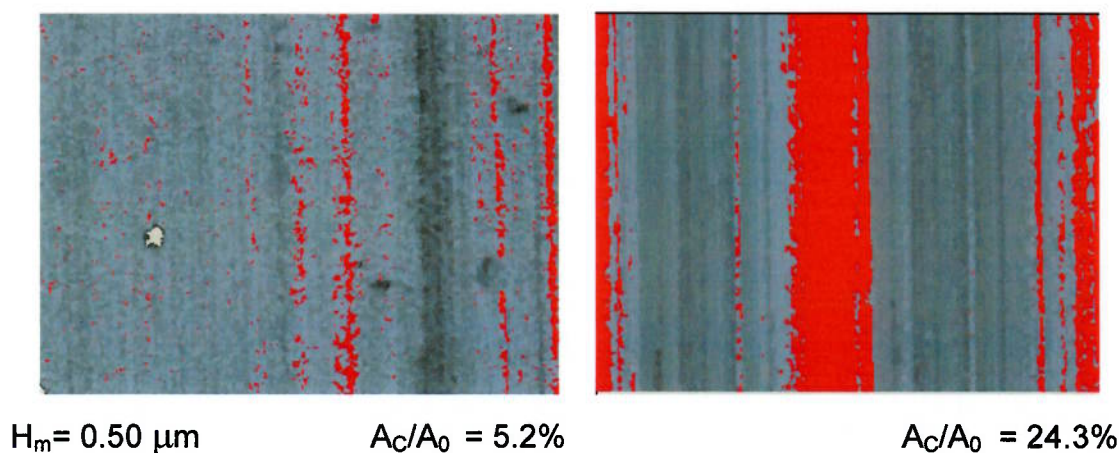


Figura 2.62: Comparativo – Área de Contato – Bronzina Convencional x Microperfilada

Nota-se que na bronzina microperfurada a área de contato é maior (regiões em vermelho). Neste trabalho não será realizado este tipo de avaliação; tem-se apenas a intenção de mostrar quais os tipos de análise superficial que têm sido desenvolvidas.

Segundo Basshuysen e Schäfer (2004), as maiores tendências para novos desenvolvimentos de bronzinas incluem:

- Aumento da capacidade de carga, devido ao aumento da pressão de combustão dos motores,
- Custos (bronzinas multi-camadas são mais caras), ver Fig. 2.63
- Legislações ambientais (não utilização de metais pesados como chumbo, limpeza, processos de manufatura).

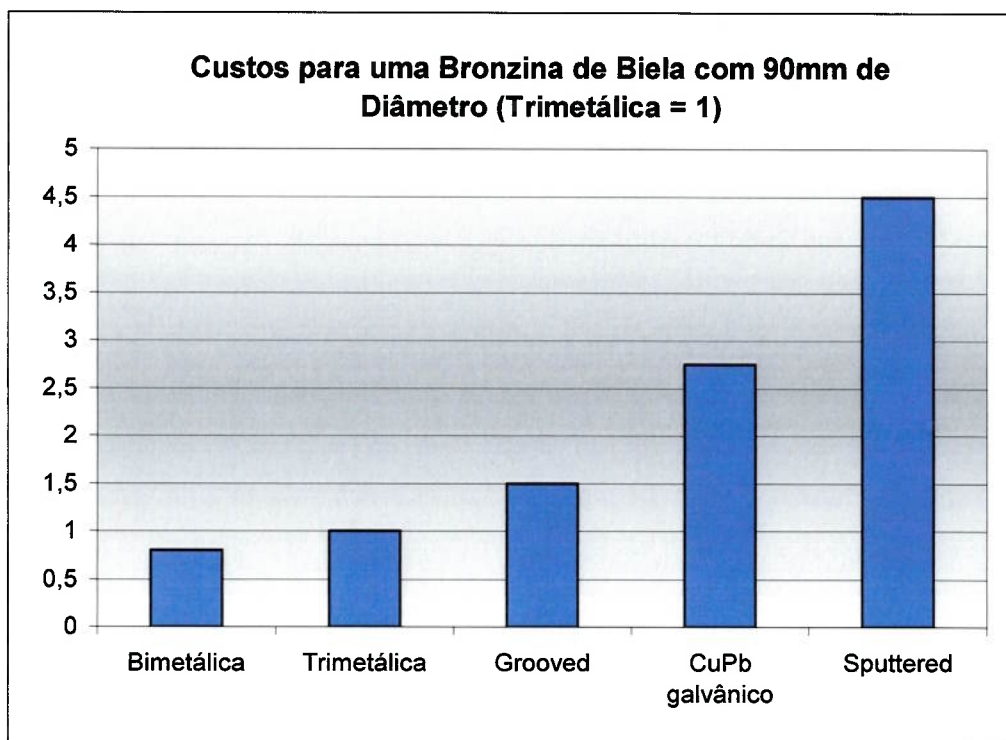


Figura 2.63: Custo para Bronzinas de Mesmo Diâmetro (Basshuysen e Schäfer 2004)¹

¹ Nas Fig. 2.57, 2.58 e 2.59, são denominadas grooved, bronzinas trimetálicas com material base microperfurado.

Por razões econômicas, o uso de bronzinas sem overlay é um objetivo a ser alcançado para utilização em altos carregamentos. Por isso, a grande maioria dos desenvolvimentos na área de materiais visa a obtenção de ligas com maior capacidade de carga (Basshuysen e Schäfer 2004). Os desenvolvimentos estão sendo realizados nas seguintes áreas:

- Aumento da capacidade de carga de bronzinas bimetálicas, para que seja possível a substituição de algumas aplicações de bronzinas trimetálicas. Isto é realizado através do desenvolvimento de novas ligas de alumínio (Basshuysen e Schäfer 2004).

- Aumento da resistência ao desgaste e durabilidade de overlays eletrodepositados, através de novos materiais, de preferência sem chumbo, e, por outro lado, um aumento de dureza dos overlays através da adição de partículas cerâmicas microscópicas. Visa-se com isso uma melhoria das peças trimetálicas (Fig. 2.64).

Muitos desenvolvimentos vêm sendo realizados e estão próximos ao desenvolvimento de produção em massa. Com certeza estes novos tipos de bronzinas vão alcançar um nível de desempenho melhor que o das bronzinas atuais, e, mesmo não chegando ao nível de bronzinas sputtered, vão prover um complemento para áreas não completamente atendidas hoje em dia (Basshuysen e Schäfer 2004), veja Fig. 2.65.

Bronzinas sputtered são bronzinas trimetálicas que recebem o overlay por um processo PVD (Physical Vapor Deposition), aplicado dentro de uma câmara especial a vácuo. A camada de deslizamento é composta por uma liga de alumínio estanho sendo que o elemento estanho fica disperso na matriz de alumínio. Esta camada possui excelentes propriedades tribológicas como alta resistência ao desgaste e ao engripamento além da resistência mecânica à fadiga necessária para aplicação em motores de combustão interna de alta sollicitação mecânica como Diesel rápido para aplicação veicular (carros de passageiros) e aplicação pesada (caminhões).

O depósito obtido por este processo possui como características principais à alta compactação da liga de alumínio estanho e a conseqüente dureza elevada. As bronzinas obtidas por este processo possuem grandes vantagens sobre as bronzinas

trimetálicas convencionais com camadas eletrodepositadas quanto à resistência ao desgaste, fadiga e capacidade de carga muito superior, mas devido ao seu processo de fabricação, torna-se um produto mais caro.

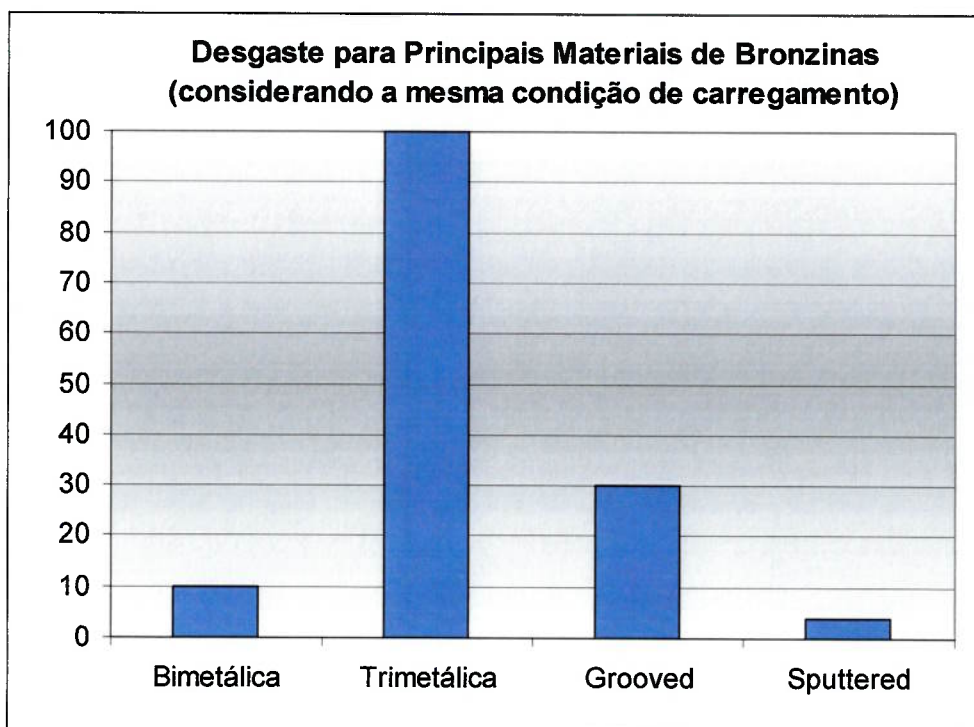


Figura 2.64: Taxa de Desgaste de Bronzinas¹ (Basshuysen e Schäfer 2004).

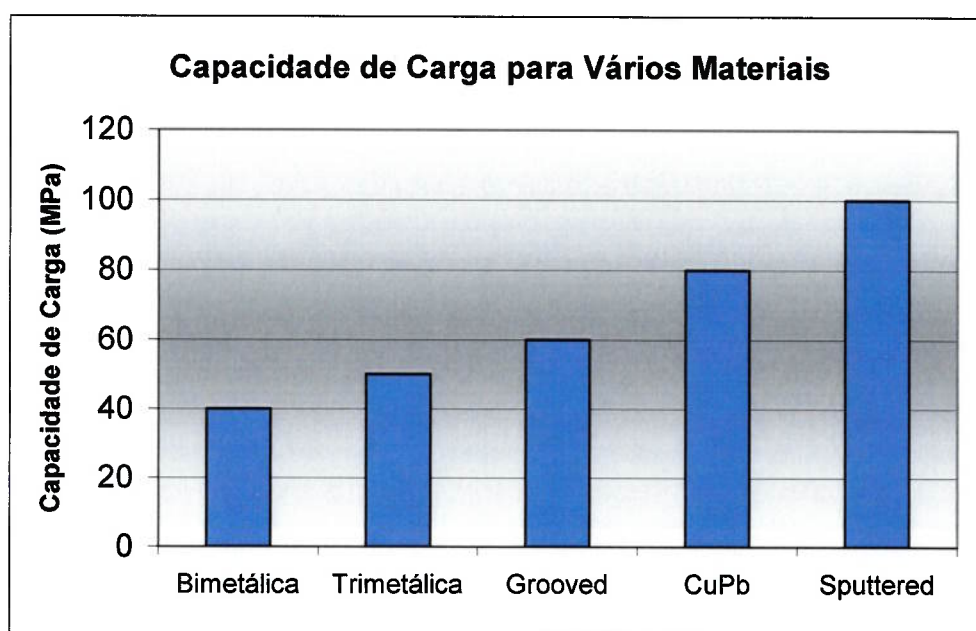


Figura 2.65: Capacidade de Carga para Diferentes Materiais de Bronzinas¹ (Basshuysen e Schäfer 2004).

O aumento na capacidade de carga pode ser igualmente obtido através do desenvolvimento de novas ligas, ou mudança no acabamento superficial (Sorab e Korcek,1998). Além do desenvolvimento de bronzinas microperfiladas, outros pesquisadores, como Hsu (2004), estão procurando formas de combinar texturização com filmes finos, a fim de criar uma nova tecnologia que possa minimizar o atrito e o desgaste dos componentes de motores. Entende-se como texturização de superfícies um meio físico de modificar a interface de contato a fim de obter:

- aprisionamento de partículas de desgaste (minimizar a abrasão)
- criar reservatórios de óleo (para situações de trabalho a altas cargas e altas temperaturas)
- geração de lubrificação hidrodinâmica em condições de alta velocidade e baixa carga

A Fig. 2.66 apresenta alguns tipos de texturização, que começaram a ser estudados em ensaios pino-contra-disco. Os estudos do NIST (National Institute of Standards and Technology) concluíram que o tamanho e a forma da texturização influenciam no atrito e no desgaste; a orientação das características também tem grande efeito. Detalhes do mecanismo de atrito ainda não foram completamente entendidos e ainda existe a necessidade de desenvolver um modelo que possa explicar este efeito.

Outro exemplo de estudo de texturização é mostrado na Fig. 2.67. Nesta figura, são mostrados os comportamentos de diferentes texturas em relação a espessura do filme de óleo (h^*) e o fator de fluxo de pressão (ϕ_p). Nota-se que todas as texturas apresentam a mesma porcentagem de área texturizada (11%) e o valor de γ (parâmetro de superfície) está descrito sobre cada um dos tipos de texturização (Lagemann, 2000). A maior diferença entre as texturizações ocorre com filme de óleo entre 1 e 4 μm .

| | Padrão e Direção de Deslizamento | Dimensões (μm) | Profundidade (μm) | Passo (μm) | Área (μm^2) | Densidade de Área (%) |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Círculo |  | 150 | 8 | 500 | 17671 | 7 |
| Elipse |  | 300/75 | 8 | 500 | 17671 | 7 |
| Triângulo |  | 187 | 8 | 500 | 17671 | 7 |

Figura 2.66: Exemplo de Texturização em estudo no NIST (Hsu, 2004).

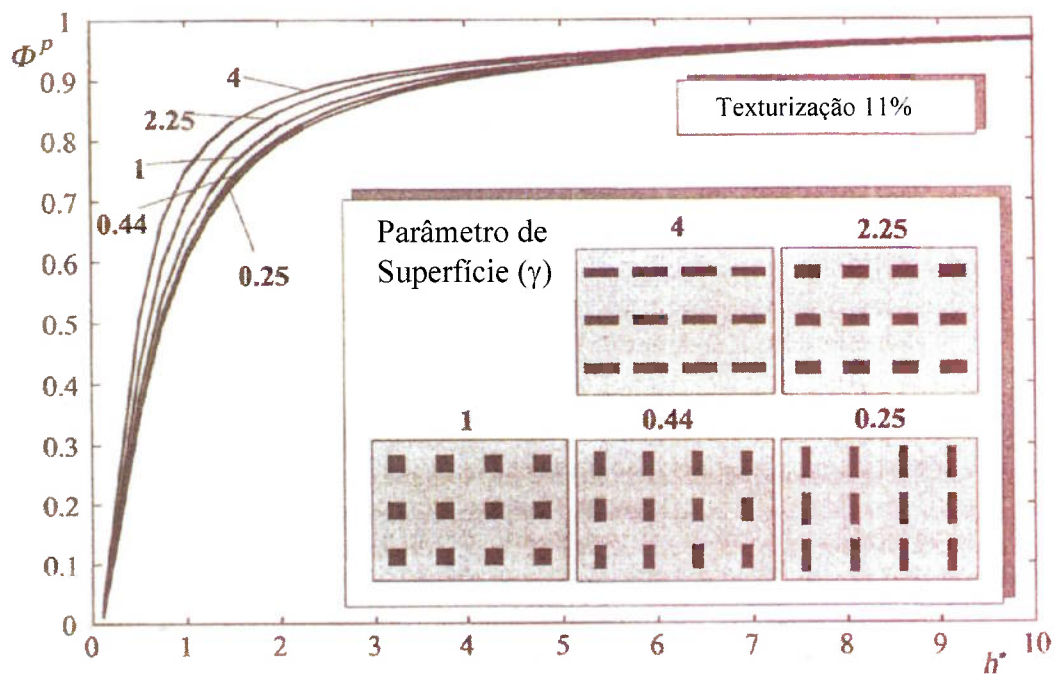


Figura 2.67: Variação do Fator de Fluxo de acordo com a espessura do filme de óleo e da texturização (Lagemann, 2000).

3 OBJETIVOS

A Tabela 3.1 apresenta um resumo dos testes realizados nas referências bibliográficas, e seus principais resultados.

O gráfico da Fig. 3.1 posiciona estes trabalhos em termos de rotações e tamanho das peças avaliadas. Nota-se que a maior parte dos testes foi realizada em rotações acima de 1000 rpm, e que em altas rotações geralmente o torque de atrito e, conseqüentemente, a temperatura diminuem. Os testes de bancada indicam que quando há um aumento de carregamento, geralmente é observada uma instabilidade na temperatura ou atrito.

| Ref. | Teste | Rotação | Bronzina | Acabamento | Eixo | B | D | B/D | Carga unitária | Resultados |
|--------------|-------------------------------|------------|-------------|-------------------------------------------------------------------|-------------|----|----|------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kumada, 1996 | Bancada | 300 - 1300 | Trimetálica | Brochada x Microperfilada (4-4,5µm) x (0,20 - 0,25mm) | Aço carbono | 17 | 42 | 0,40 | 10 - 50MPa | Picos de atrito na microperfilada. Perfil ondulado na brochada Melhor conformabilidade microperfilada Atrito maior em baixas rotações |
| | Motor | 7700 | | | | 19 | 55 | 0,35 | 40,6 | Temperatura varia com o quadrado da rotação. Microperfilada apresentou menor temperatura, diferenças aumentam com o aumento da rotação |
| | Retenção Óleo - Bancada | 5000 | | | | 17 | 42 | 0,40 | 11,3 | Microperfilada sem falhas, maior retenção de óleo, sem ocorrência de engripamento |

| Ref. | Teste | Rotação | Bronzina | Acabamento | Eixo | B | D | B/D | Carga unitária | Resultados |
|----------------------|---------|---------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----|----|-----|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ni e Cheng, 1996a | bancada | 3000 | AL1, AL2 AL3 | AL1: mandrilada e brochada AL2: brochada AL3: mandrilada | Ferro fundido NC1 e NC2 Acabamentos F1 e F2 | 10 | 50 | 0,2 | | Bronzinas mandriladas apresentaram maior resistência ao engripamento – NC2 (F1 e F2) Picos nos gráficos de temperatura indicam ocorrência de microsoldas e re- amaciamento |
| Ni e Cheng, 1996b | bancada | 3000 | Bimetálicas (AlSn e AlSnSi) e Trimetálicas | BCL – trimetálica BA1 – Ra 0,35µm BA2 – Ra 0,39µm | Ferro fundido NC1 e NC2 Acabamentos F1 e F2 | 10 | 50 | 0,2 | | BCL: temperatura e atrito aumentam com carregamento BA2 apresentaram maiores picos de temperatura que BA1, partículas de Si muito grandes. Esperava-se resultado oposto |

| Ref. | Teste | Rotação | Bronzina | Acabamento | Eixo | B | D | B/D | Carga unitária | Resultados |
|----------------------|--------------------|------------|----------|----------------------------------------------------------------------------|------|------|----|-----|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sorab e Korcek, 1998 | bancada | 500 a 3000 | ? | Ra = 0,21µm Ra=0,26µm Ra=0,63µm Não define o sentido de avaliação | ? | ? | ? | 0,6 | 21500N | Temperatura e atrito menores com menor rugosidade. Diferença maior a baixas rotações. |
| Watanabe, 2000 | Simulação numérica | 6000 | ? | Brochada (Rz: 1,0µm) x Microperfilada (Rz: 1,5µm; Sm: 0,20mm) | ? | 16,5 | 42 | 0,4 | ? | MOFT maior que pra brochadas Fluxo de óleo maior nas microperfiladas Torque de atrito menor para microperfilada Efeito do MOFT melhora durabilidade da peça (menos contato) Menor aumento de temperatura, devido a menor geração de calor e maior dissipação nas microperfiladas |

Tabela 3.1: Comparação dos Resultados das Referências Bibliográfica

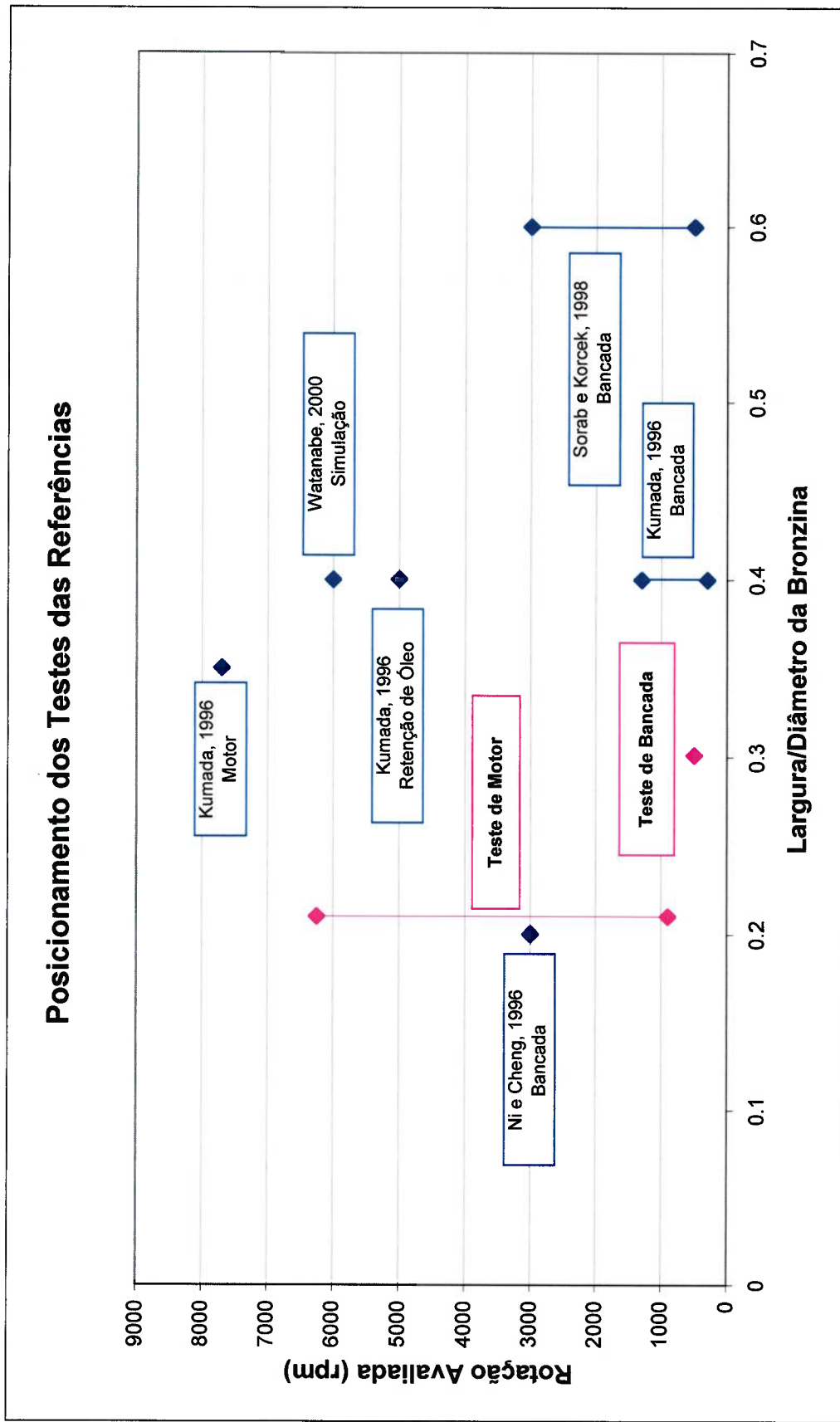


Figura 3.1: Posicionamento dos Testes Realizados nas Referências Bibliográfica

A Tabela 3.2 apresenta o resumo dos materiais de bronzinas e acabamentos testados.

| Referência | Material | Acabamento |
|----------------------|-----------------|-----------------------------|
| Kumada, 1998 | Trimetálica | Brochada x Microperfilada |
| Ni e Cheng, 1996a | Bimetálica | Brochada x Mandrilada |
| Ni e Cheng, 1996b | Bimetálica | Mandrilada 1 x Mandrilada 2 |
| | Trimetálica | Brochada |
| Sorab e Korcek, 1998 | não definido | Ra sentido não definido |
| Watanabe, 2000 | não definido | Brochada x Microperfilada |

Tabela 3.2: Comparação dos Materiais e Acabamentos Testados.

Através da análise das referências bibliográficas, notou-se que houve uma diferença de caracterização do acabamento das peças. Muitas peças têm a descrição de terem acabamento mandrilado, mas o acabamento só foi descrito através de Ra, e sabe-se que Ra, apesar de ser muito utilizado, não é um dos melhores parâmetros para caracterização de superfícies.

Notou-se, também, que os experimentos de Kumada (1996) foram realizados comparando bronzinas trimetálicas com acabamento brochado e microperfilado, mas segundo Ni e Cheng (1996b), o acabamento microperfilado acaba sendo encoberto pela deposição do overlay.

Os trabalhos de Ni e Cheng (1996a e b) chegaram a comparar dois tipos de acabamento mandrilado, mas apenas caracterizado por Ra. Apesar disso, notou-se uma diferença de comportamento, bem como no trabalho de Sorab e Korcek (1998).

Foi observada a inexistência da comparação de bronzinas bimetalicas mandriladas vs microperfiladas com uma melhor caracterização superficial.

O objetivo deste trabalho é comparar o desempenho de bronzinas bimetalicas (AlSnSiCu) com dois tipos de acabamentos longitudinais diferentes, um denominado

convencional e outro microperfilado, produzidos pelo mesmo processo de fabricação, mandrilamento.

Pretende-se através de ensaios de bancada e teste de motor investigar a influência do acabamento superficial no desempenho de uma bronzina bimetálica com dois acabamentos longitudinais distintos contra um virabrequim de material e acabamento conhecidos.

Serão avaliados:

- capacidade de carga até o engripamento
- temperatura
- desgaste (avaliação de marcação e rugosidade)

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Teste de bancada

Foram realizados ensaios em bancada a fim de comparar a capacidade de carga e a temperatura em bronzinas com acabamento microperfilado e convencional.

4.1.1 Descrição do Equipamento

Os testes de bancada foram realizados no equipamento Mautus, desenvolvido pela empresa Mahle Metal Leve, para testes de bronzinas. Este equipamento permite o teste de bronzinas de várias dimensões (largura e diâmetro), através da utilização de alojamentos apropriados e de eixos confeccionados em diâmetro que permita simular as condições de operação do sistema bronzina x virabrequim em motor de combustão interna.

O carregamento é aplicado no alojamento através de um acionador hidráulico, perpendicular ao eixo da máquina. Neste equipamento também é possível monitorar a temperatura no lado posterior da bronzina (lado aço), através de um termopar fixado na parte inferior do alojamento. A Fig. 4.1 mostra o equipamento utilizado.

Na Fig. 4.2 são mostrados o alojamento de testes e os mancais que suportam o eixo de teste.

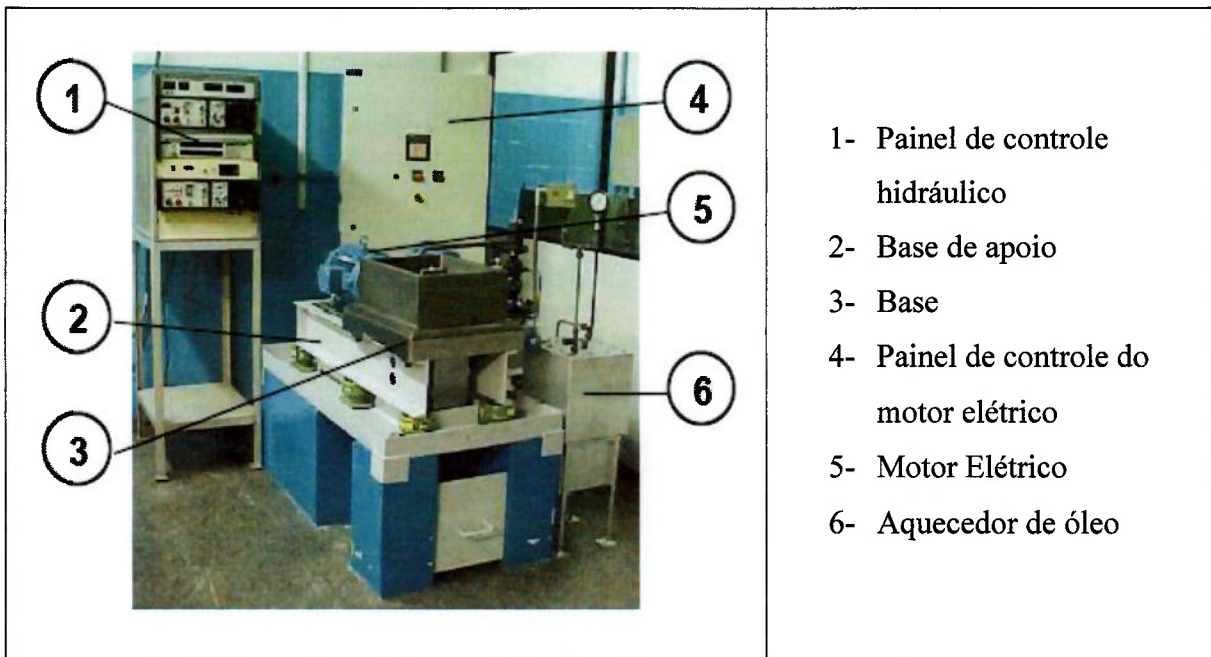


Figura 4.1: Equipamento Utilizado

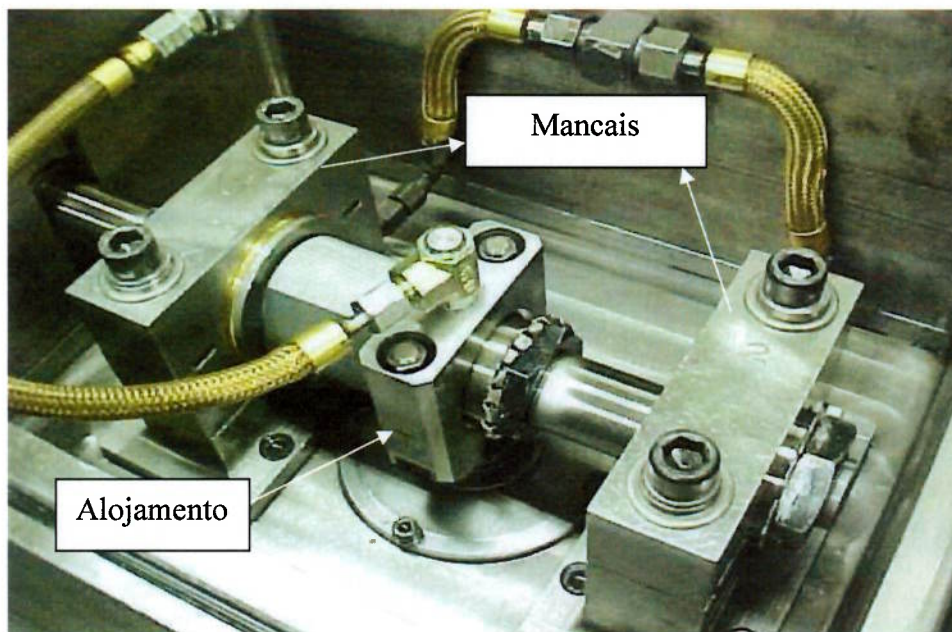


Figura 4.2: Detalhe do equipamento utilizado

A Fig. 4.3 representa o esquema de aplicação de carga no equipamento Mautus.

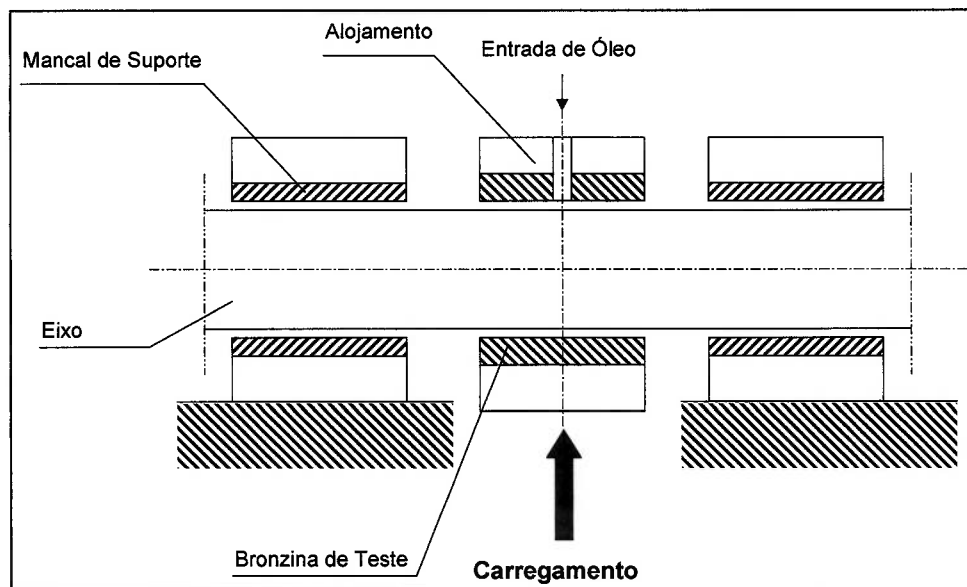


Figura 4.3: Esquema de Aplicação de Carga - Equipamento Mautus.

4.1.2 Procedimento de Teste

Para este ensaio foram aplicados incrementos de carregamento de 5kN a cada 10 minutos, até que fosse observado o engripamento. A parada do motor elétrico ocorre automaticamente quando a corrente do mesmo atinge o valor de 23A; critério baseado em testes realizados anteriormente, que confirmaram a ocorrência de engripamento nesta condição. Sabe-se que a corrente elétrica do motor está relacionada ao torque de atrito, quanto maior a corrente, maior o torque. A Fig. 4.4 mostra o diagrama de aplicação de carga durante o ensaio.

Na Tabela 4.1 são apresentadas as condições do teste de bancada.

| | |
|---------------------|---------------------------|
| Rotação | 500 rpm |
| Temperatura do Óleo | 50° C ± 5 |
| Carregamento | 5kN / 10 min |
| Material do Eixo | Aço microligado (38MnVS5) |
| Acabamento do eixo | Ra: 0,10µm – 0,15µm |

Tabela 4.1: Condições de Teste de Bancada

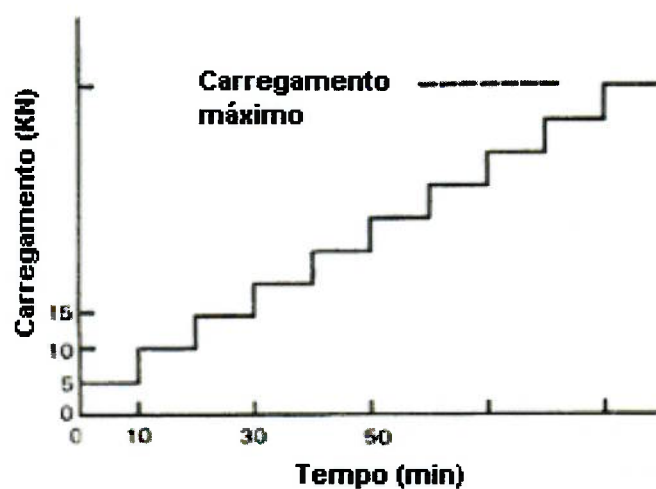


Figura 4.4: Diagrama de carregamento – Ensaio de Bancada

4.1.3 Caracterização das Amostras

A fim de verificar diferença de capacidade de carga e temperatura na parte posterior das bronzinas, foram realizados ensaios de bancada em amostras com dois tipos de acabamento superficial: convencional e microperfilado.

As características das peças são apresentadas na Tabela 4.2.

| | |
|-------------------|----------------|
| Liga (bimetálica) | AlSn10Si4Cu2 |
| Diâmetro | 59,6 mm |
| Largura | 18,5 mm |
| Folga Diametral | 0,01 – 0,05 mm |
| Espessura Total | 1,8 mm |
| Espessura do Aço | 1,3 – 1,5 mm |

Tabela 4.2: Características das Peças Testadas em Bancada

A Tabela 4.3 apresenta a descrição do acabamento superficial das peças testadas. Pode-se considerar o Rz das peças microperfiladas como se fosse a profundidade, e Sm como o passo do perfil, pois o perfil é constante.

| Acabamento | Ra(μm) | Rz(μm) | Sm(mm) |
|----------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| Convencional | $0,14 \pm 0,01$ | $0,92 \pm 0,04$ | Não disponível |
| Microperfilada | $0,84 \pm 0,01$ | $3,35 \pm 0,08$ | $0,265 \pm 0,001$ |

Tabela 4.3: Características do Acabamento Superficial – Microperfilada x Convencional

As Fig. 4.5 e 4.6 mostram o perfil típico de rugosidade das peças antes de serem ensaiadas em teste de bancada.

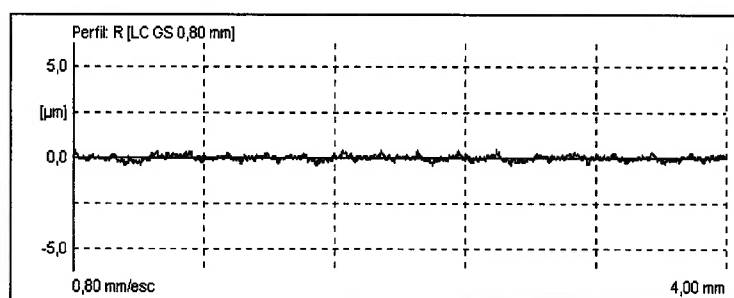


Figura 4.5: Perfil de rugosidade típico – Acabamento Convencional

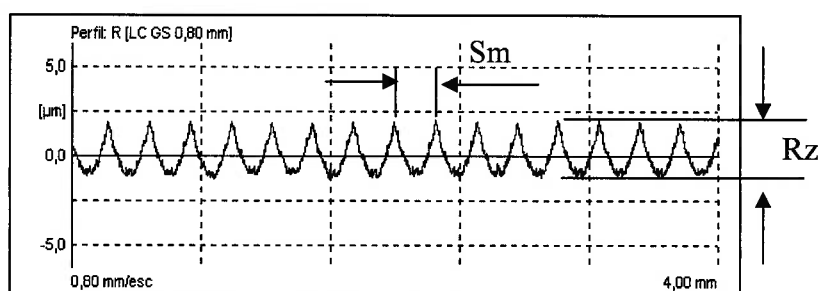


Figura 4.6: Perfil de rugosidade típico – Acabamento Microperfilado

As Fig. 4.7 e 4.8 mostram a seção transversal típica do material bimetálico utilizado. Pode-se notar o sentido de laminação da peça, devido ao posicionamento dos alinhamentos da fase de estanho (cinza escuro) que servirão como lubrificante sólido. O Si e o Cu são responsáveis pelo aumento de dureza do material.

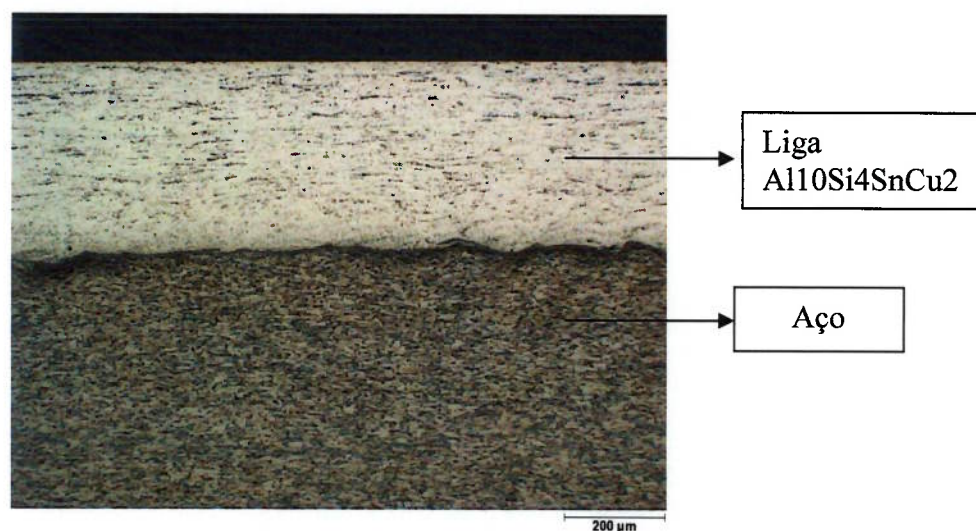


Figura 4.7: Seção Transversal Material Bimetálico.

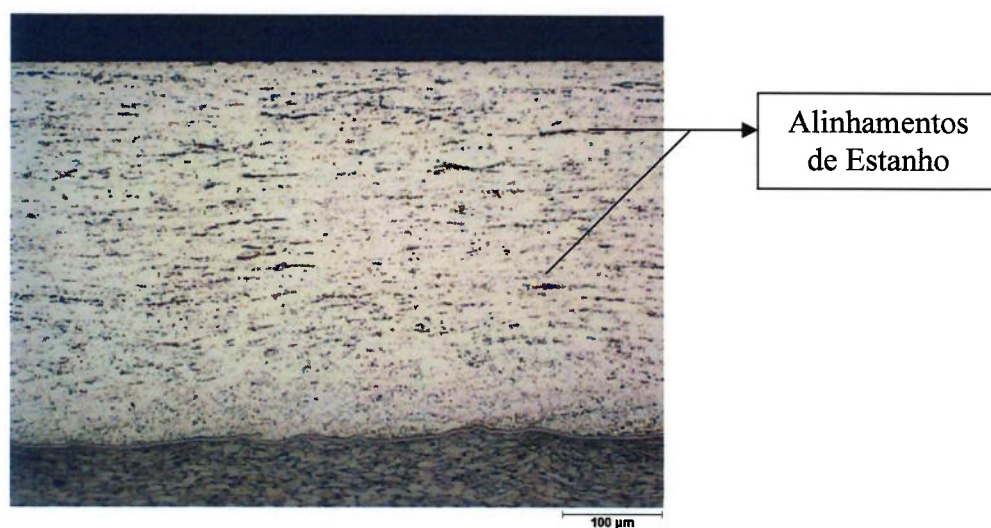


Figura 4.8: Seção Transversal Material Bimetálico.

O Si também está presente na liga para promover um aumento da resistência ao desgaste. As Fig. 4.9 e 4.10 mostram com detalhe o tamanho e a localização das partículas de Si na liga. As partículas de Si estão presentes nos alinhamentos de Sn, são partículas mais escuras, com formato poligonal, com tamanho variando entre 2,0 e 3,0 μm .

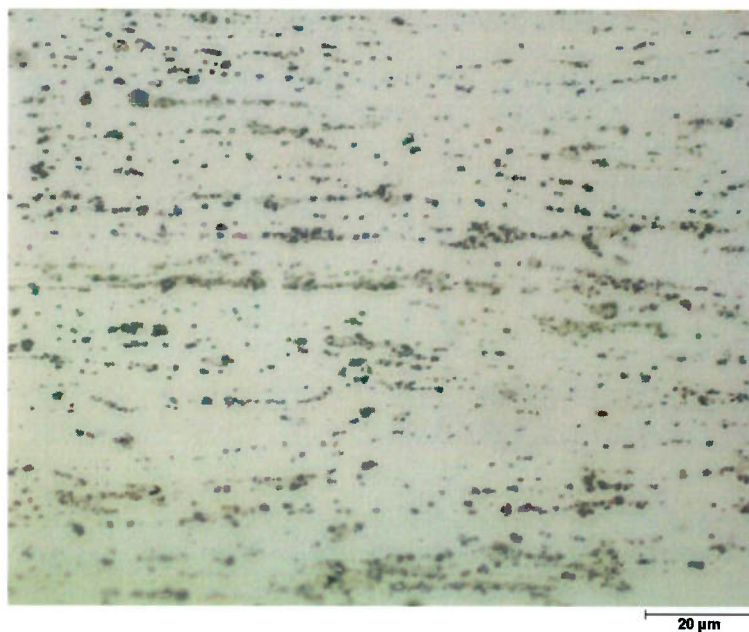


Figura 4.9: Seção Transversal Material Bimetálico

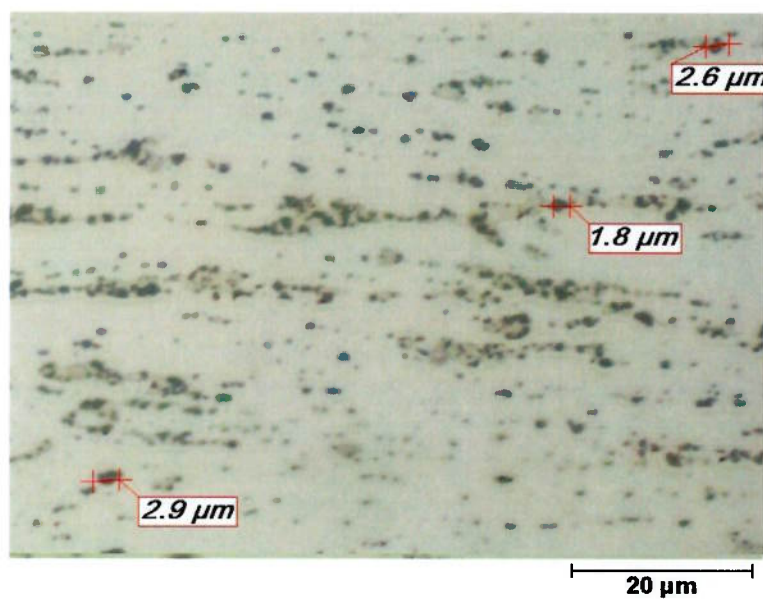


Figura 4.10: Avaliação do Tamanho das Partículas de Si na Liga

4.2 Testes de Motor

4.2.1 Descrição do Teste

Com o intuito de comparar o desgaste de peças com acabamento convencional e microperfilado em teste de motor, foi realizado um teste segundo o procedimento “Cordwood” (procedimento PT – F068, Anexo I). Neste tipo de teste, o motor trabalha 85% do tempo em rotação máxima e 15% do tempo em marcha lenta. O tempo total de ensaio é de 3 horas e 30 minutos. Trata-se de um teste curto para avaliar bronzinas em relação à marcação (aspecto visual) e resistência ao engripamento.

A Tabela 4.4 apresenta as características do motor utilizado.

| | |
|----------------------------------|-------|
| Ciclo | Otto |
| Número de Cilindros | 4 |
| Diâmetro do Cilindro (mm) | 70 |
| Curso (mm) | 64,9 |
| Volume (dm ³) | 0,999 |
| Máxima Potência (kW) | 50 |
| Rotação em Máxima Potência (rpm) | 5700 |
| Torque Máximo (Nm) | 94 |
| Rotação em Torque Máximo (rpm) | 4000 |
| Potência Específica (kW/L) | 50 |
| Pressão de Combustão (MPa) | 7 |

Tabela 4.4: Características do motor utilizado para teste.

A Tabela 4.5 mostra a configuração das peças no teste, durante o qual foram somente testadas bronzinas de biela.

| Bronzina | Biela | | | |
|----------|--------------|--------------|----------------|----------------|
| | #1 | #2 | #3 | #4 |
| Superior | convencional | convencional | microperfilada | microperfilada |
| Inferior | | | | |

Tabela 4.5 : Configuração das bronzinas de biela em teste de motor.

4.2.2 Caracterização das amostras

A fim de verificar diferenças de marcação e, eventualmente, de resistência ao engripamento, foram realizados ensaios de bancada em amostras com dois tipos de acabamento superficial: convencional e microperfilado.

As características das peças são apresentadas na Tabela 4.6. O material da bronzina é o mesmo que foi utilizado no teste de bancada, caracterizado pelas Figs. 4.7 a 4.10.

| | |
|-------------------|----------------|
| Liga (bimetálica) | AlSn10Si4Cu2 |
| Diâmetro | 41,1 mm |
| Largura | 19 mm |
| Folga Diametral | 0,02 – 0,06 mm |
| Espessura Total | 1,5 mm |
| Espessura do Aço | 1,2 – 1,3 mm |
| Carga Unitária | 34,5 MPa |

Tabela 4.6: Características das Bronzinas – Teste de Motor

A Tabela 4.7 apresenta a descrição do acabamento superficial das peças testadas. Pode-se considerar o Rz das peças microperfiladas como se fosse a profundidade, e Sm como o passo do perfil, pois o perfil é constante.

| Acabamento | Ra(μm) | Rz(μm) | Sm(mm) |
|----------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| Convencional | $0,19 \pm 0,01$ | $1,38 \pm 0,10$ | Não disponível |
| Microperfilada | $0,60 \pm 0,01$ | $3,15 \pm 0,01$ | $0,259 \pm 0,001$ |

Tabela 4.7: Caracterização das superfícies – amostras testadas.

As Fig. 4.11 e 4.12 mostram o perfil típico de rugosidade das peças antes de serem ensaiadas em teste de motor.

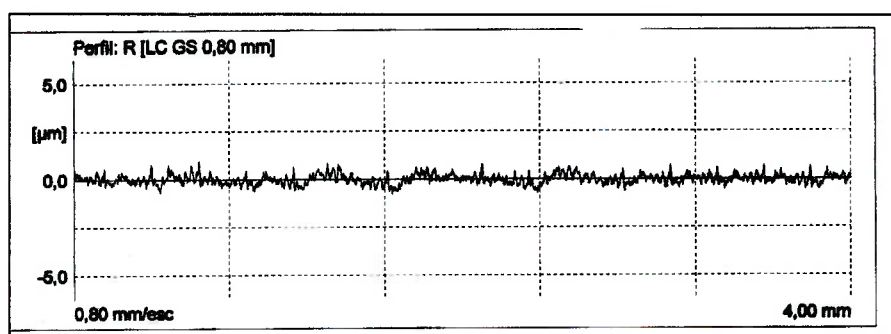


Figura 4.11: Perfil de rugosidade típico – Acabamento Convencional

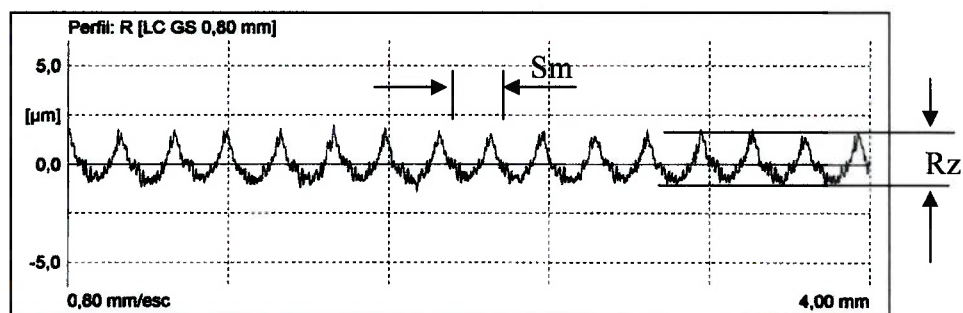


Figura 4.12: Perfil de rugosidade típico – Acabamento Microperfilado

Na Fig. 4.13 é apresentado um perfil típico do diâmetro interno de uma de bronzina utilizada neste teste de motor, avaliado com a peça fixada no alojamento.

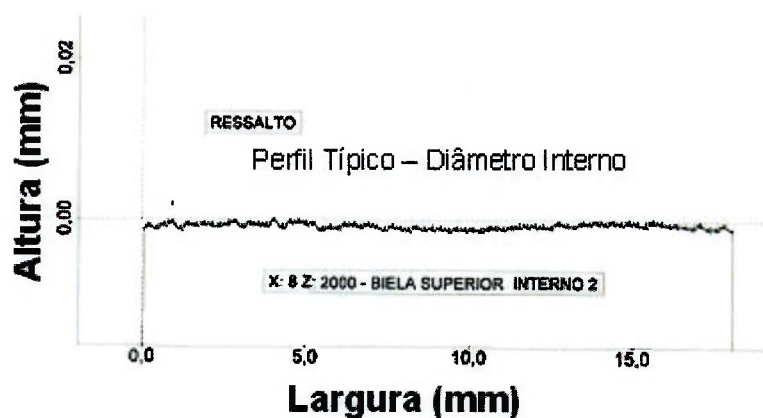


Figura 4.13: Perfil Típico de Bronzina – Diâmetro Interno (liga).

4.2.3 Caracterização do Virabrequim

A Fig. 4.14 apresenta o perfil típico de rugosidade de um colo de biela. A Tabela 4.8 exibe os valores de rugosidade dos colos de biela do virabrequim utilizado no teste de motor.

O material do virabrequim foi ferro fundido nodular. Pode-se notar que todos os colos de biela estavam com o valor de rugosidade dentro do especificado pelo fabricante, ou seja, R_a máximo de $0,3\mu\text{m}$.

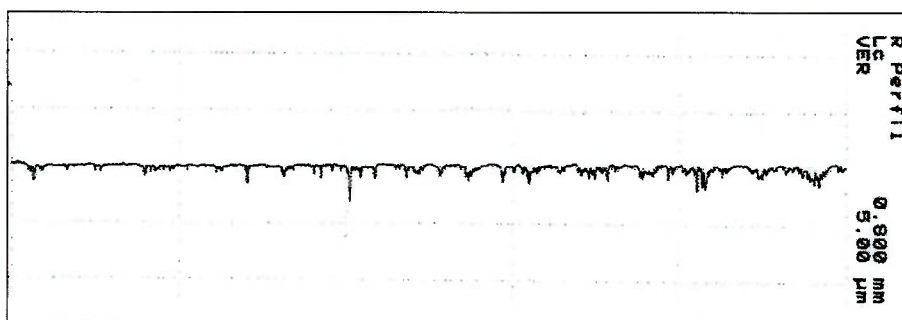


Figura 4.14: Colo de Biela – Perfil Típico de Rugosidade.

| Colo | Ra (μm) | Rz(μm) | Rmax(μm) |
|--------|----------------------|---------------------|-----------------------|
| #1 | 0,25 | 2,35 | 3,54 |
| #2 | 0,07 | 1,04 | 1,54 |
| #3 | 0,10 | 0,87 | 1,01 |
| #4 | 0,11 | 2,13 | 3,65 |
| média | 0,13 | 1,60 | 2,44 |
| desvio | 0,08 | 0,75 | 1,36 |

Tabela 4.8: Avaliação de Rugosidade – Colos de Biela.

A Fig. 4.15 apresenta o perfil típico de um colo de biela. Nota-se que estes colos têm como característica um raio nas suas extremidades.

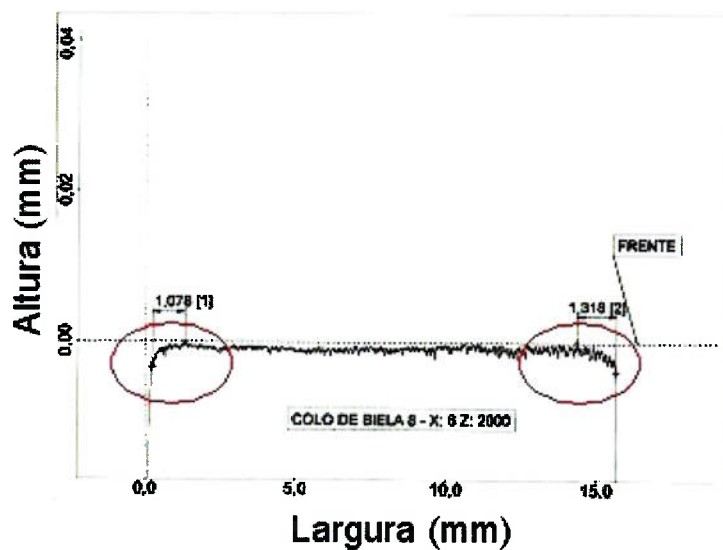


Figura 4.15: Perfil Típico de Colo de Biela.

4.2.4 Avaliação de Rugosidade das Peças Após Teste

Definiu-se que o melhor parâmetro de rugosidade para comparar a superfície das peças após teste seria o T_p (%), que é definido, segundo Tomanik (1992), como perfil de apoio em relação ao comprimento medido a uma profundidade de corte C .

Profundidade de corte C é a distância entre uma linha de corte avaliada e uma linha de referência selecionada. Durante as avaliações de T_p deve-se determinar uma linha de referência e a mesma deve ser indicada. Linha de referência (C_{ref}) é aquela na qual considera-se profundidade zero, geralmente é assumida não como o pico mais alto, mas com uma certa porcentagem de apoio, usualmente de 2 a 5%, a fim de desconsiderar pequenas asperezas que podem alterar o valor de T_p , mas têm pouca ou nenhuma influência funcional (DIN / ISO 4287 e ASME B46.1).

A curva de fração de contato (curva de Abbott) indica a quantidade de material T_p em relação ao nível de corte C . Por exemplo, um T_p de 60% a $2\mu\text{m}$ significa que fazendo um corte imaginário abaixo da linha de referência, haverá 60% do comprimento total em contato.

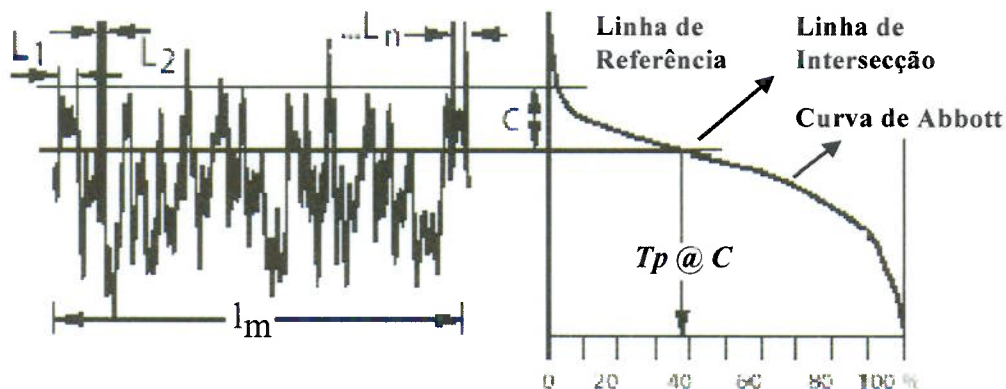


Figura 4.16: Representação da Curva de Fração de Contato (DIN / ISO 4287).

A Eq. 14 mostra como é calculado o valor de T_p a um determinado nível de corte C . No caso dos experimentos realizados, foi considerado como linha de referência um C_{ref} igual a 0,5%.

$$T_p @ C = \frac{1}{l_m} (L_1 + L_2 + \dots L_n) \cdot 100 [\%] \quad (14)$$

5 RESULTADOS

5.1 Teste de Bancada

5.1.1 Avaliação de Temperatura

Foi realizada a avaliação de temperatura em um ponto nas costas de cada bronzina testada. Os gráficos de acompanhamento de temperatura no decorrer dos testes realizados são apresentados nas Fig. 5.1 e 5.2. Em ambos os casos a temperatura aumenta com o aumento do carregamento (escalonado).

Na Fig. 5.1 nota-se que as peças #2 e #5 apresentaram picos de temperatura, muito provavelmente devido à ocorrência de engripamento, especificamente na peça #2 nota-se a presença de dois picos de temperatura. Muito provavelmente, após a ocorrência do primeiro pico, não foi registrado um aumento grande na corrente do motor, mas a peça deve ter sofrido um micro-engripamento e se recuperou, e depois, quando houve um novo aumento de carga, foi observado um aumento na corrente do motor. Os gráficos de todas as peças apresentam um decréscimo da temperatura após o último pico, o que se deve ao fato do termopar do equipamento continuar registrando a temperatura, mesmo após a suspensão de aplicação de carga. Já na Fig. 5.2, gráfico de temperatura das bronzinas microperfилadas estes picos não são notados, as peças #4 e #5 tiveram o teste suspenso antes que as outras, mas nota-se um comportamento mais homogêneo entre as peças.

Na Fig. 5.3 são apresentados os resultados de média de temperatura nas bronzinas convencionais e microperfилadas nos carregamentos de 5kN a 35kN. Nota-se que para todos os casos a temperatura nas bronzinas microperfилadas é menor que nas bronzinas convencionais. Adicionalmente cabe mencionar que a presença de picos de temperatura pode ter influenciado nos valores de média e desvio padrão das peças convencionais com carga de 35kN.

Na Tabela 5.1 são apresentados os resultados de temperatura obtidos para cada carregamento. As bronzinas convencionais apresentam temperaturas médias de 5% a 8% maiores que as bronzinas microperfилadas.

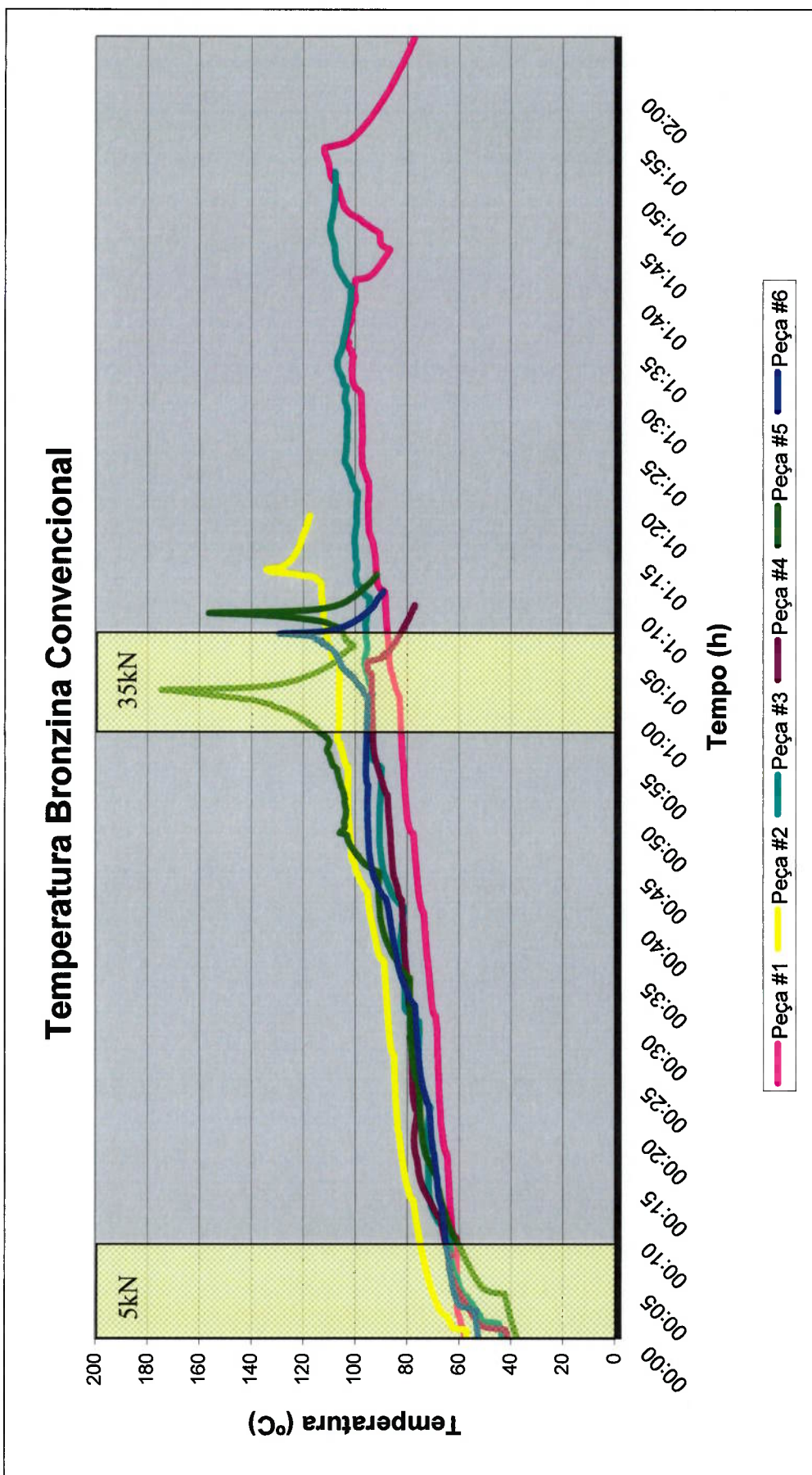


Figura 5.1: Avaliação de Temperatura – Bronzinas Convencionais.

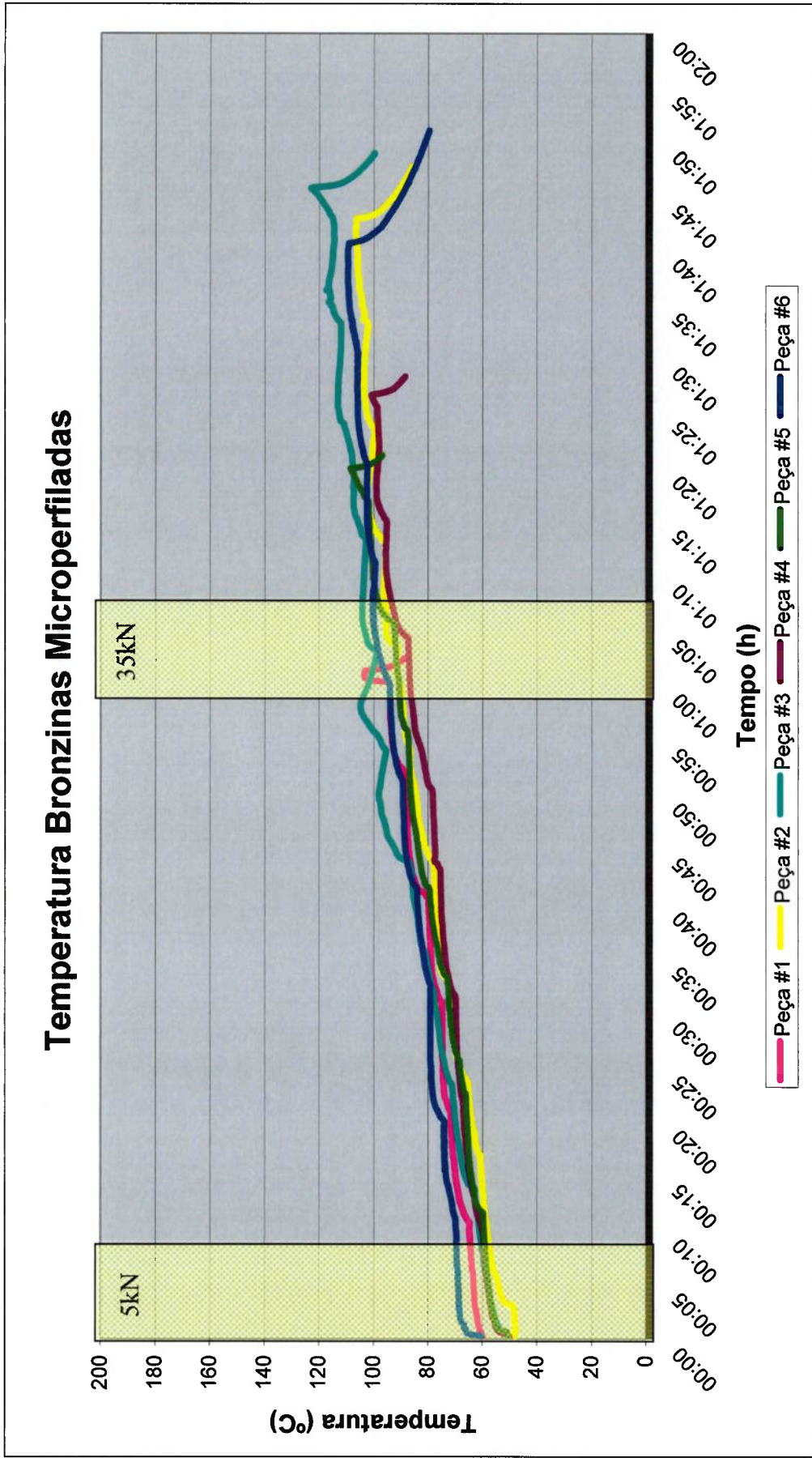


Figura 5.2: Avaliação de Temperatura– Bronzinas Microperfiladas

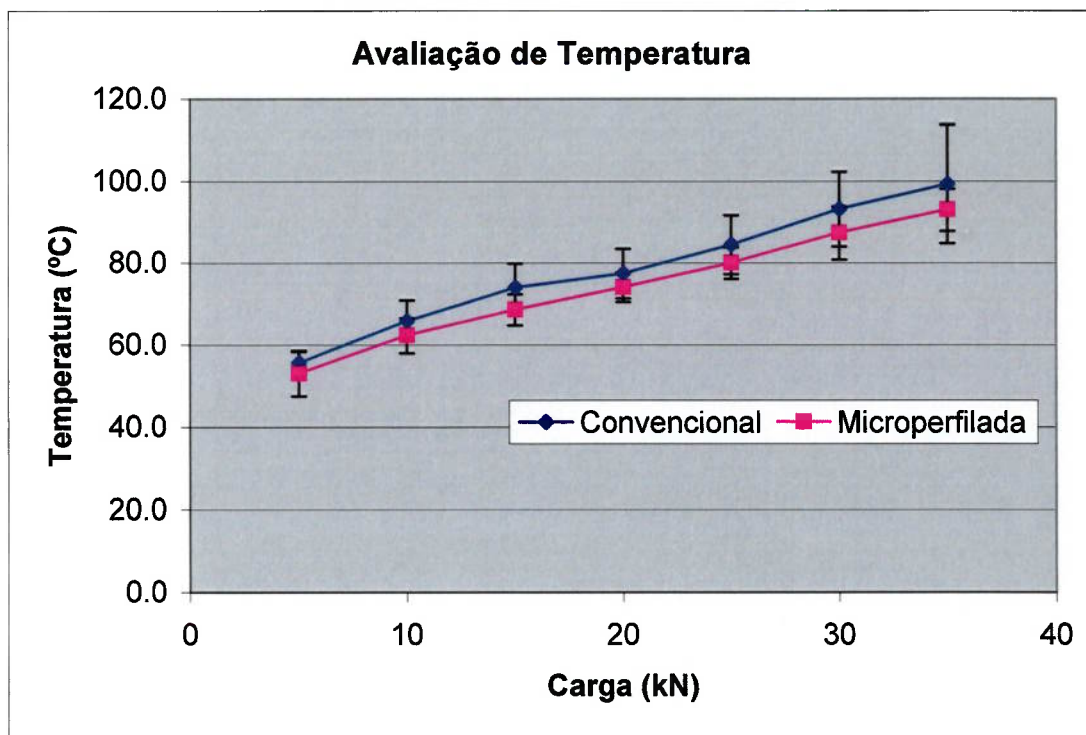


Figura 5.3: Avaliação da Temperatura nas Bronzinas.

| Carga (kN) | Convencional | | Microperfilada | |
|------------|--------------|--------|----------------|--------|
| | Média | Desvio | Média | Desvio |
| 5 | 55.7 | 2.9 | 53.0 | 5.4 |
| 10 | 65.9 | 5.0 | 62.3 | 4.3 |
| 15 | 74.0 | 5.8 | 68.6 | 3.8 |
| 20 | 77.4 | 6.0 | 74.0 | 3.5 |
| 25 | 84.4 | 7.2 | 79.9 | 3.9 |
| 30 | 93.2 | 9.2 | 87.3 | 6.5 |
| 35 | 99.3 | 14.6 | 93.0 | 5.2 |

Tabela 5.1: Avaliação de Temperatura nas Bronzinas (°C).

5.1.2 Avaliação da Capacidade de Carga

A Tabela 5.2 mostra os resultados individuais de carregamentos obtidos para cada tipo de acabamento.

| Teste | Peça | Acabamento | Carregamento (kN) | Média | Desvio Padrão |
|-------|------|----------------|-------------------|-------|---------------|
| 1 | 1 | Convencional | 50 | 42,5 | 8,8 |
| 2 | 2 | | 45 | | |
| 3 | 3 | | 55 | | |
| 4 | 4 | | 35 | | |
| 5 | 5 | | 35 | | |
| 6 | 6 | | 35 | | |
| 7 | 1 | Microperfilado | 35 | 46,7 | 8,2 |
| 8 | 2 | | 55 | | |
| 9 | 3 | | 55 | | |
| 10 | 4 | | 45 | | |
| 11 | 5 | | 40 | | |
| 12 | 6 | | 50 | | |

Tabela 5.2: Avaliação de Carregamento Máximo – Convencional x Microperfilada

A Fig. 5.4 ilustra a média e o desvio padrão de carregamento máximo obtido para cada tipo de acabamento. Nota-se que a média para peças com acabamento convencional é menor que das peças com acabamento microperfilado, mas existe uma sobreposição de valores quando se considera o desvio padrão dos resultados obtidos.

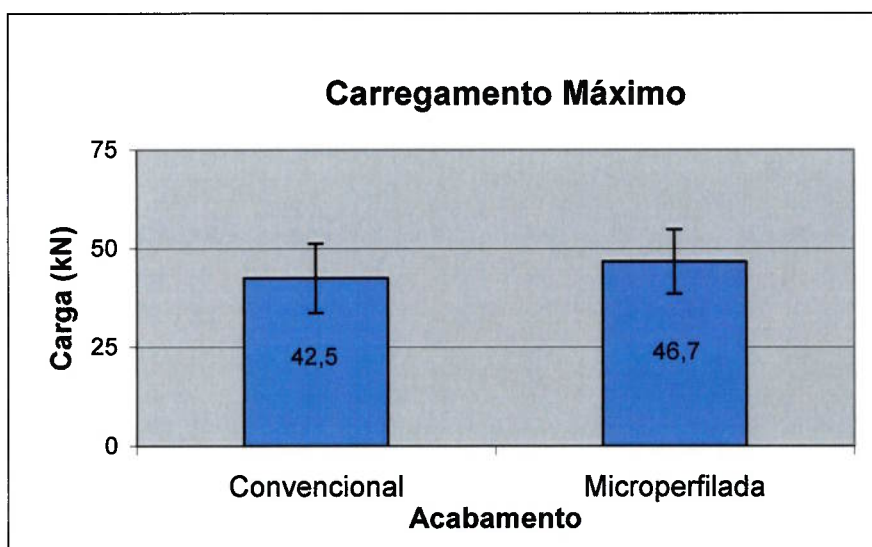


Figura 5.4: Carregamento Máximo – Convencional x Microperfilada.

Na Tabela 5.3 é apresentado o valor de capacidade de carga obtido nos testes de bancada. Nota-se que não foi encontrada muita diferença entre os valores para as bronzinas convencionais e microperfiladas.

| | Convencional | Microperfilada |
|---------------------------|---------------------|-----------------------|
| Carregamento Máximo (kN) | 46,7 | 42,5 |
| Capacidade de Carga (MPa) | 38,5 | 42,4 |

Tabela 5.3: Capacidade de Carga – Microperfilada x Convencional

5.1.3 Análise Visual das Peças Testadas

A Fig. 5.5 apresenta o conjunto de peças testadas com acabamento convencional. Nota-se que as peças #2 e #5 apresentaram maior marcação/dano superficial e justamente estas peças apresentaram maiores picos de temperatura antes da finalização do teste. Nota-se ainda, que houve uma tendência de marcação mais forte (polimento) nas bordas de todas as peças (retângulos tracejados). Possivelmente, devido ao chamado efeito de borda, devido à deflexão do eixo do equipamento. Também é possível observar a presença de riscos na superfície das peças, provavelmente, devido à presença de alguma partícula no óleo (setas).

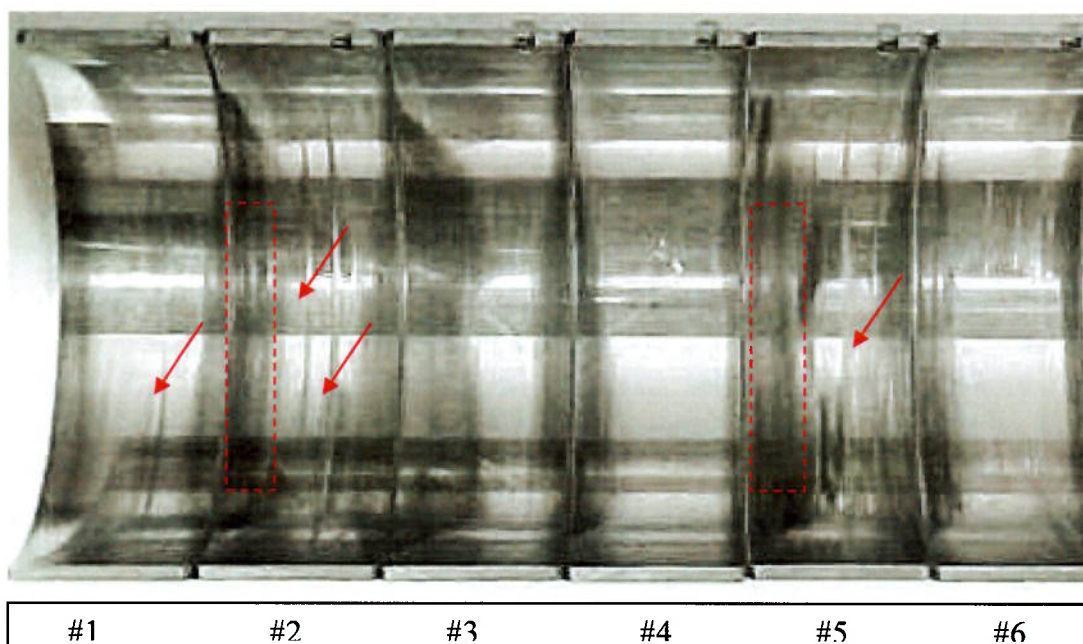


Figura 5.5: Bronzinas com acabamento Convencional após teste de Bancada.

Na Fig. 5.6 são apresentadas as peças com acabamento microperfilado após teste de bancada. Neste caso, nenhuma das peças apresentou dano na superfície de contato, somente nas bordas (retângulo) é possível visualizar umas marcações mais fortes (polimento), indicando também uma tendência de marcação nas bordas e alguns riscos (setas). Ao comparar as Fig. 5.6 com os dados do gráfico de temperatura é possível verificar que realmente nenhuma peça apresentou aumento súbito de temperatura ao final do teste, que caracterizaria a ocorrência de engripamento.

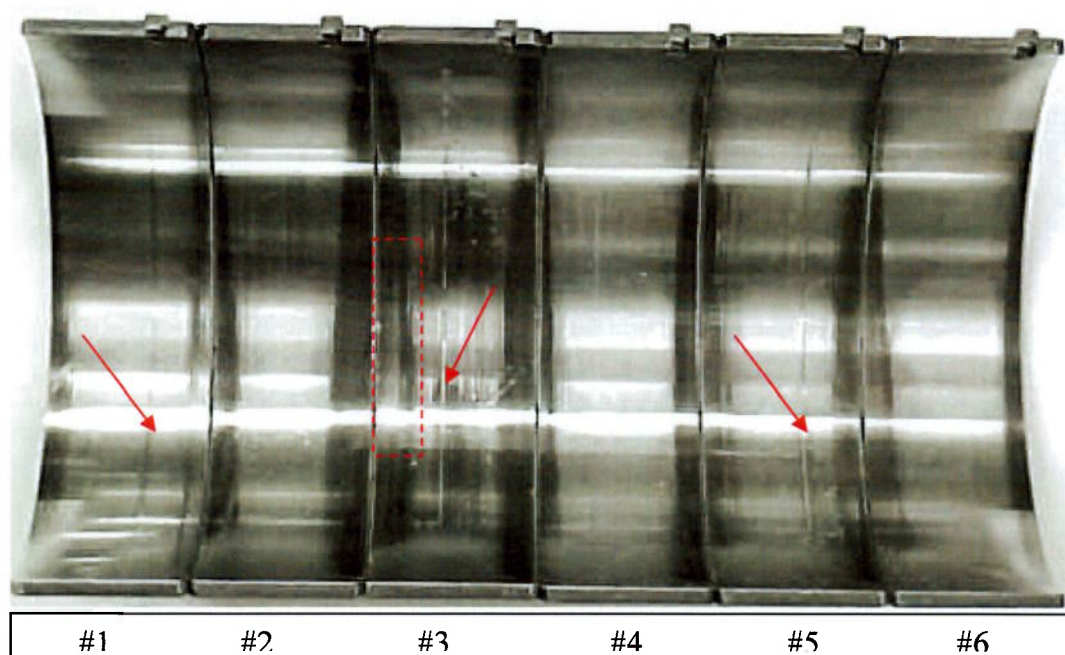


Figura 5.6: Bronzinas Microperfiladas após teste de Bancada.

5.1.3.1 Análise de Superfície – Bronzinas com Acabamento Convencional

Fazendo a análise visual mais cuidadosa de cada peça individualmente, constatou-se que, no caso das peças com acabamento convencional, somente as peças #2 e #5 apresentaram engripamento numa das bordas. As peças #1 e #3 foram as que tiveram maior capacidade de carga, e somente apresentaram forte marcação na lateral.

A Fig. 5.7 mostra uma visão da pista de rolamento da peça #5, onde nota-se que na borda superior da peça houve a ocorrência de engripamento. A Fig. 5.8

mostra a análise de MEV da borda da peça. Nota-se a presença de estanho deformado na superfície da peça (regiões brancas), indicando a ocorrência de engripamento e o relevo indica que houve transferência de material da bronzina para o eixo. As Fig. 5.9 e 5.10 mostram a região com um maior detalhe; na Fig. 5.11 é apresentado um espectro (EDS) da região mais clara, comprovando a presença de estanho na superfície da peça.



Figura 5.7: Visual Peça #5 – Acabamento Convencional
Ocorrência de Engripamento na Borda

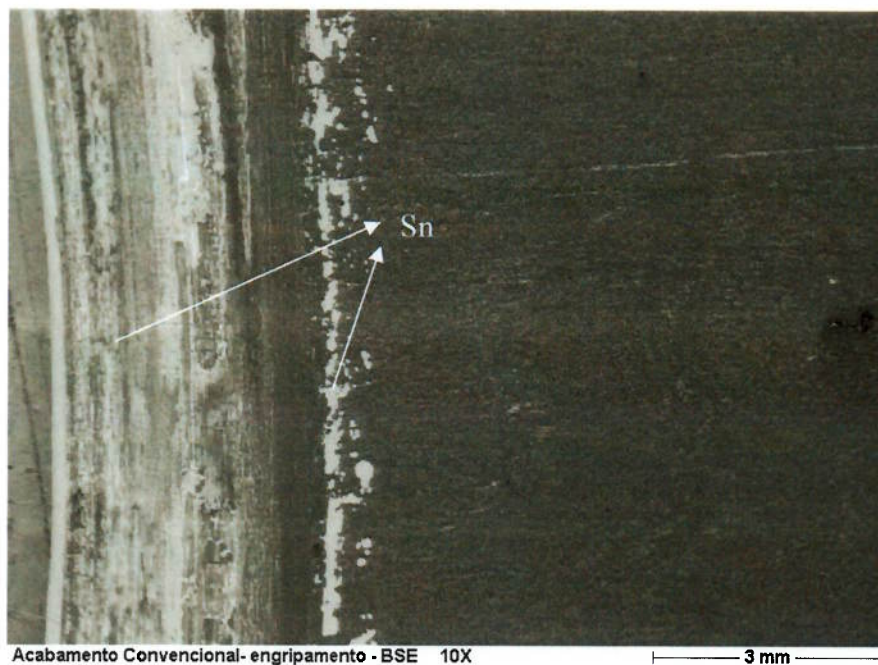


Figura 5.8: MEV/BSE - Peça Convencional – Região com Engripamento

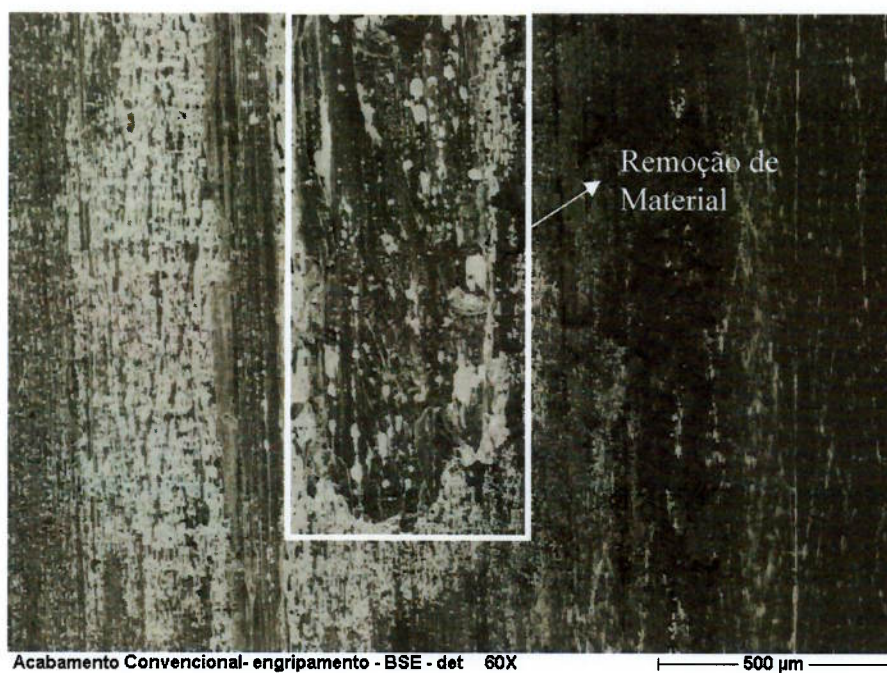


Figura 5.9: MEV/BSE - Peça Convencional – Região com Engripamento – Detalhe

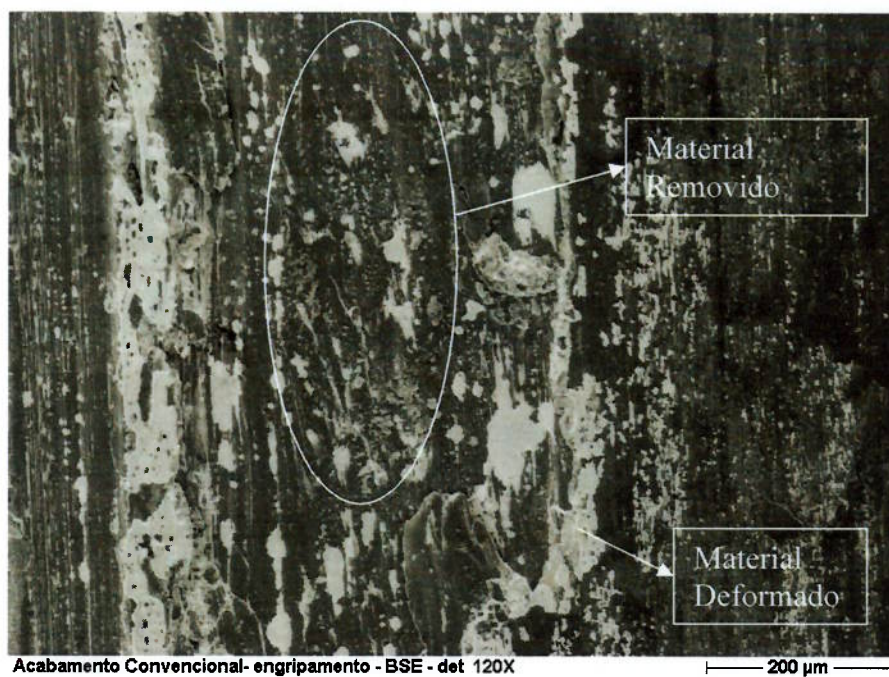


Figura 5.10: MEV/BSE - Peça Convencional – Região com Engripamento
Detalhe da Remoção de Material

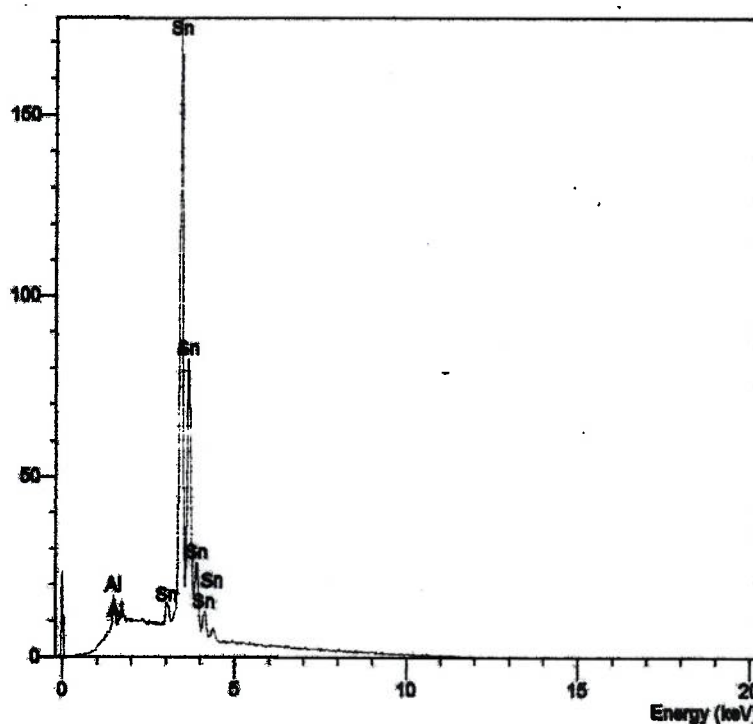


Figura 5.11: MEV/EDS – Região Clara na Superfície da Peça Convencional

A Fig. 5.12 mostra uma visão da pista de rolamento da peça #4; nota-se que a peça apresenta forte marcação somente nas bordas. A Fig. 5.13 mostra a análise de MEV da borda da peça. Não foi verificada a presença de estanho deformado na superfície da peça, mas de uma superfície mais lisa próxima da borda. Na Fig. 5.14, com um aumento maior, nota-se a presença de estanho na superfície, mostrando a característica de lubrificação emergencial, ou seja, presença de estanho na superfície da peça (fases claras), mas sem a ocorrência de engripamento, ou deformação do estanho na superfície.



Figura 5.12: Visual Peça #3 – Acabamento Convencional

Forte Marcação nas Bordas



Figura 5.13: MEV/BSE - Peça Convencional – Região com Forte Marcação

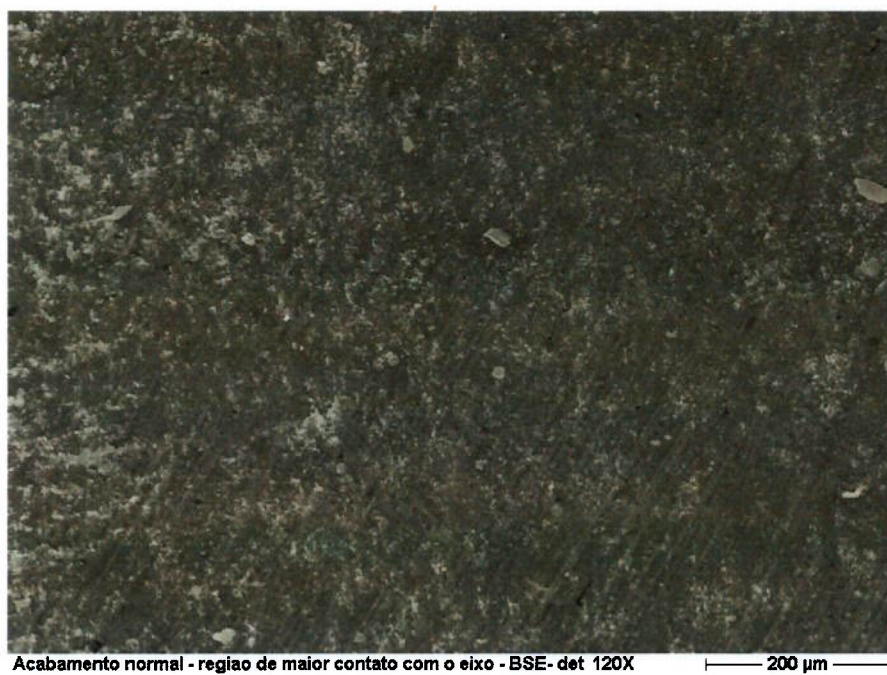


Figura 5.14: MEV/BSE - Peça Convencional – Região com Forte Marcação –
Detalhe

5.1.3.2 Análise de Superfície – Bronzinas com Acabamento Microperfilado

A Fig. 5.15 mostra uma visão da pista de rolamento da peça #3; peça que apresentou pior aspecto visual após teste. Nota-se que a peça apresenta somente marcação nas bordas, e alguns riscos na superfície de rolamento. A Fig. 5.16 mostra o visual da peça #4 que apresentou somente forte marcação nas bordas.

A Fig. 5.17 mostra a análise típica de MEV da borda da peça. Não foi verificada a presença de estanho deformado na superfície da peça. Na Fig. 5.18, com um aumento maior, nota-se a presença de estanho na superfície (fases claras), mostrando a característica de lubrificação emergencial da peça, mas sem a ocorrência de engripamento.



Figura 5.15: Visual Peça #3 – Acabamento Microperfilado
Forte Marcação nas Bordas



Figura 5.16: Visual Peça #4 – Acabamento Microperfilado
Forte Marcação nas Bordas

Região com Forte Marcação



Figura 5.17: MEV/BSE - Peça Microperfilada – Região com Forte Marcação



Figura 5.18: MEV/BSE - Peça Microperfilada – Região com Forte Marcação -
Detalhe

5.1.3.3 Análise de Superfície – Eixo

Na Fig.5.19 é apresentada a foto de um eixo que rodou um teste em que houve engripamento. Nota-se que a superfície apresenta fortes marcações, indicando a transferência de material da bronzina para o eixo, confirmada através da análise de MEV (Fig. 5.20).

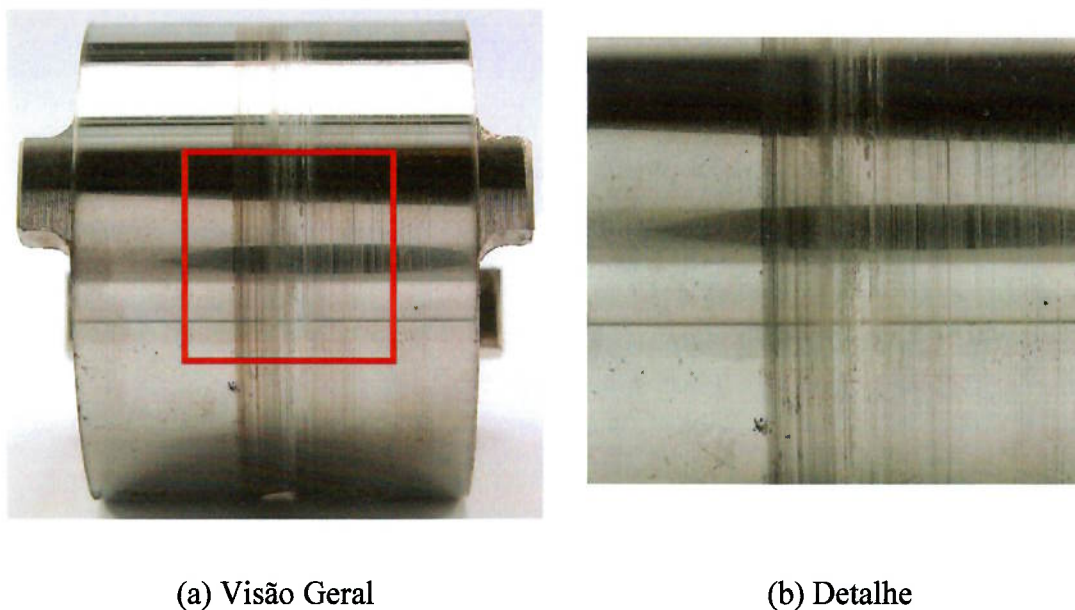


Figura 5.19: Superfície Eixo – Após Engripamento

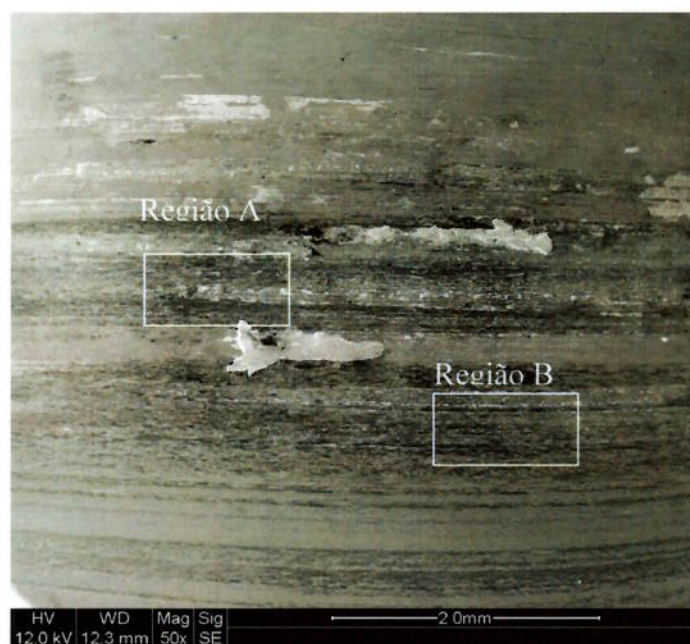


Figura 5.20: MEV/SEI – Superfície Eixo – Após Engripamento

Na Fig. 5.21 é apresentado um detalhe da região A com a presença de estanho (região mais clara), na superfície do eixo, comprovada pelo espectro da Fig. 5.22.



Figura 5.21: MEV/SEI – Superfície Eixo – Após Engripamento – Região A
Presença de Estanho

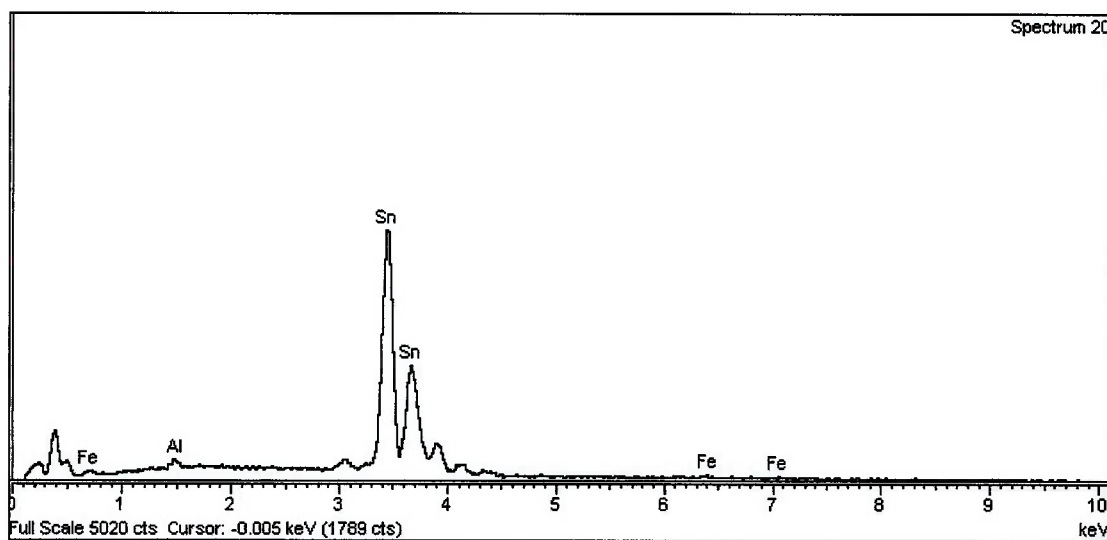


Figura 5.22: MEV/EDS – Estanho na Superfície do Eixo Após Engripamento

Na Fig. 5.23 é apresentado um detalhe da região B, que apresenta, conforme espectro da Fig. 5.24, alumínio na superfície do eixo após o teste de bancada.

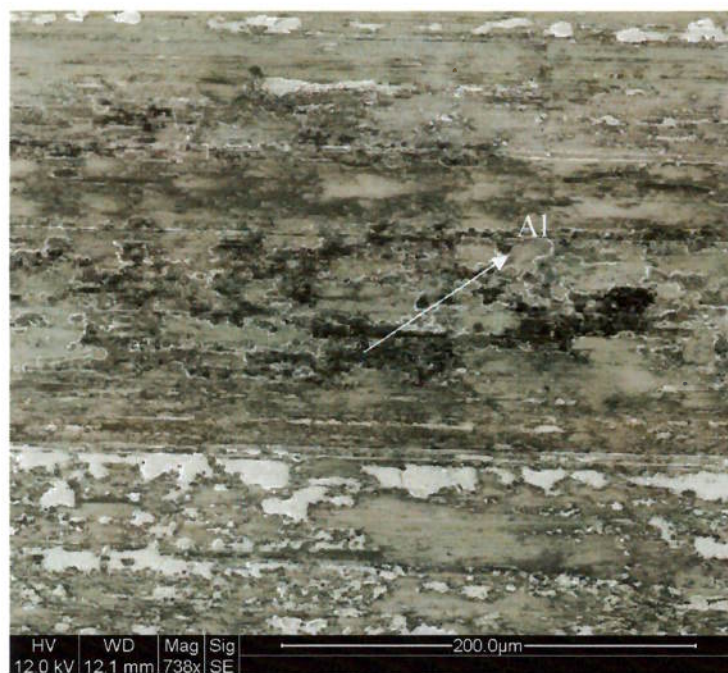


Figura 5.23: MEV/SEI – Superfície Eixo – Após Engripamento – Região B
Presença de Alumínio

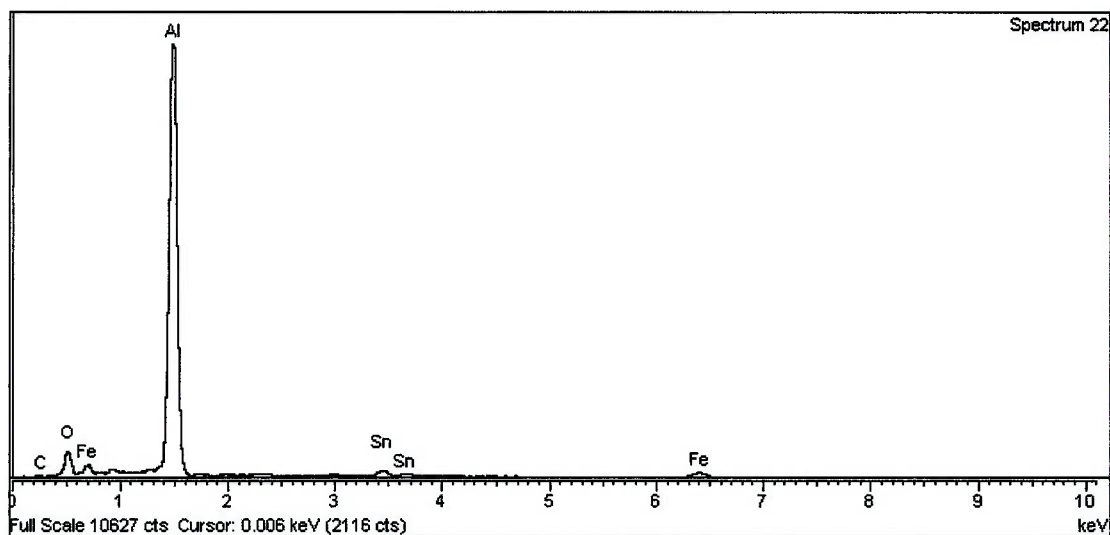


Figura 5.24: MEV/EDS – Alumínio na Superfície do Eixo Após Engripamento

A Fig. 5.25 apresenta o espectro da análise do material base do eixo (aço), nota-se que também foram detectadas a presença de alumínio e estanho, devido a ocorrência do engripamento.

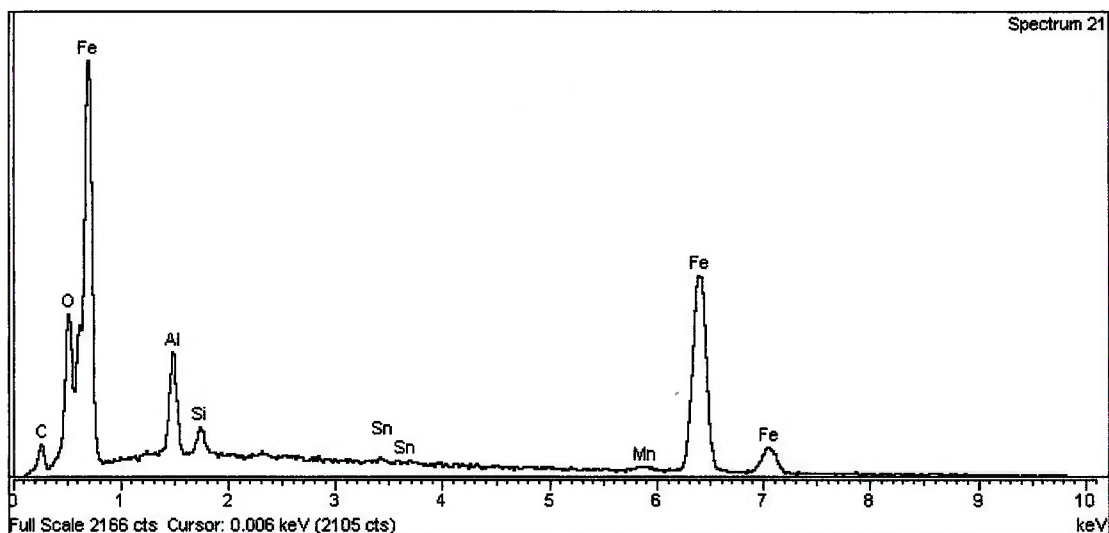


Figura 5.25: MEV/EDS – Superfície do Eixo – Material Base

A Fig. 5.26 apresenta o visual de um eixo que foi testado e não apresentou engripamento. Nota-se apenas a marcação das bordas da peça testada.

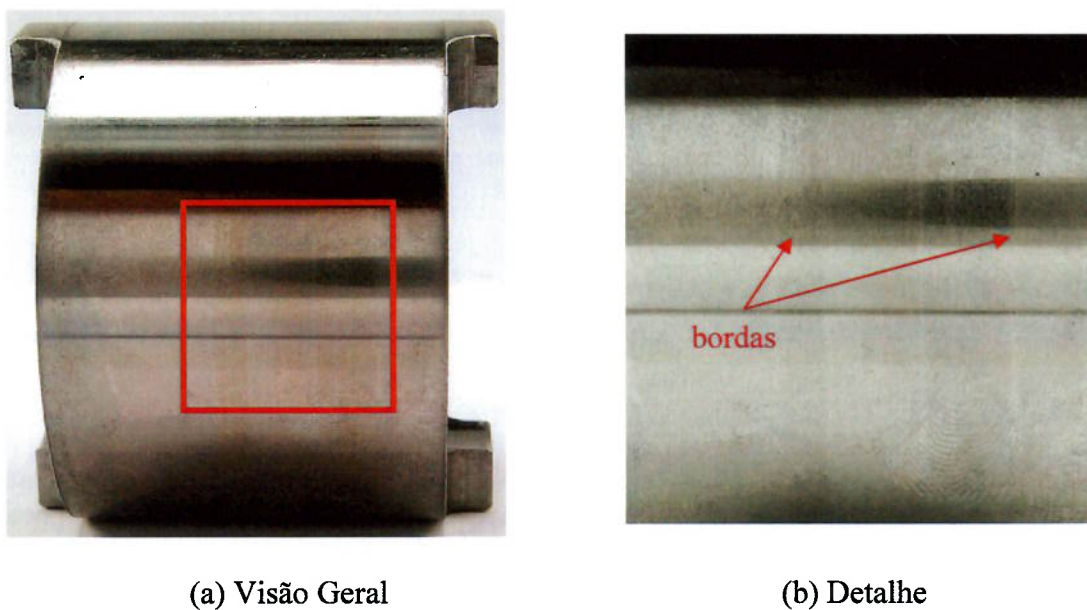


Figura 5.26: Superfície Eixo – Após Teste sem Engripamento

Na Fig. 5.27 e Fig. 5.28, respectivamente, são apresentadas as análises de MEV de elétrons secundários (SEI) e de elétrons retroespalhados (BSE), mostrando que, neste caso, não há material da bronzina sobre a superfície do eixo.



Figura 5.27: MEV/SEI – Superfície de Eixo sem Engripamento

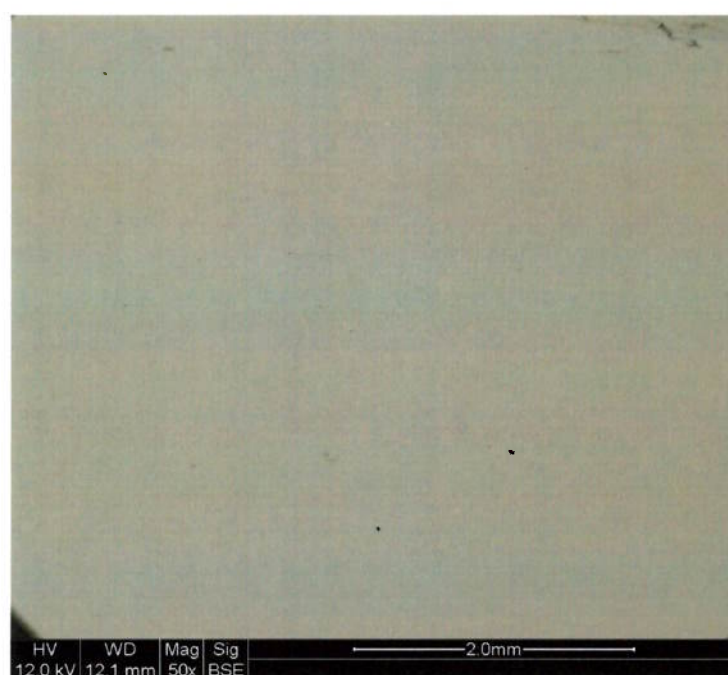


Figura 5.28: MEV/BSE – Superfície de Eixo sem Engripamento

5.2 Teste de Motor

5.2.1 Avaliação Visual

A Fig. 5.29 apresenta o aspecto visual das peças após o teste de motor. Pode-se notar que os dois tipos de acabamento não comprometeram a performance das peças. Não há sinais de engripamento nem fadiga.

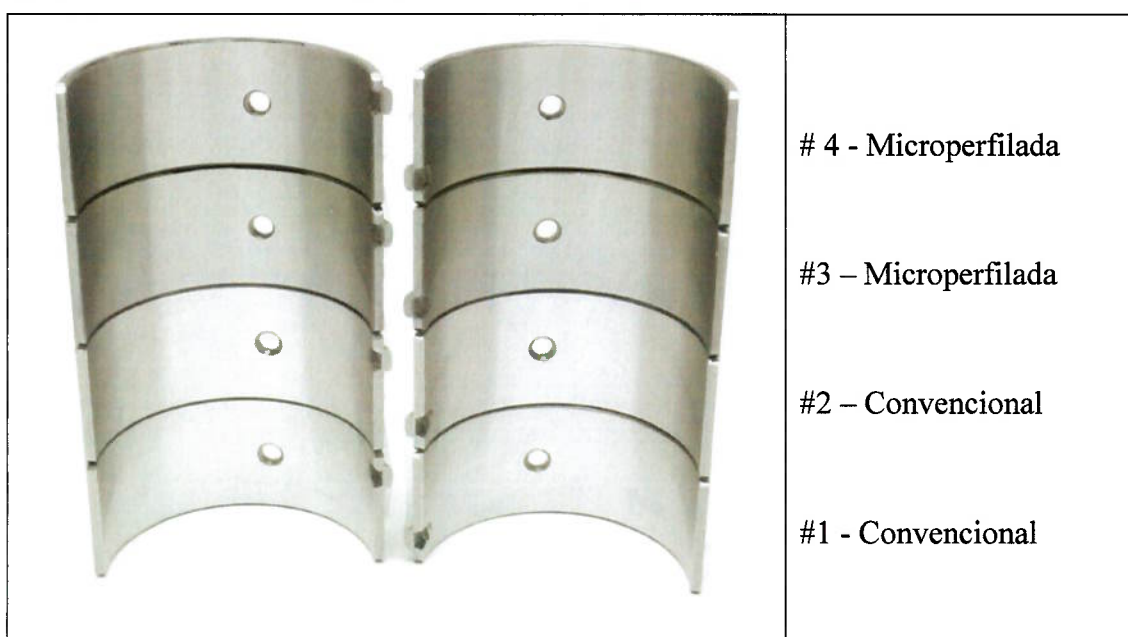


Figura 5.29: Aspecto Visual das peças após teste de Motor.

Na Fig. 5.30 pode-se notar que peças com os dois tipos de acabamento apresentam marcação (polimento) mais forte em algumas regiões. As peças com microperfilamento apresentam, em geral, uma marcação mais homogênea, enquanto as peças com acabamento convencional apresentam marcação mais brilhante (áreas polidas).

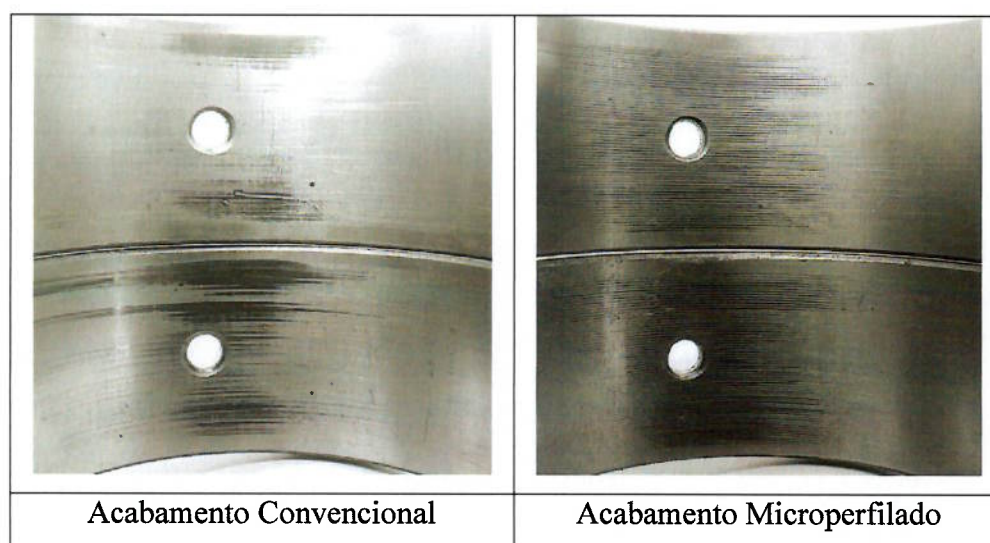


Figura 5.30: Detalhe Visual das peças após teste de Motor.

5.2.2 Avaliação de Rugosidade

Com o intuito de checar o desgaste das peças, foram feitas avaliações de rugosidade em 3 regiões diferentes da peça, selecionadas devido à marcação observada nas peças após teste. A Fig. 5.31 mostra as regiões avaliadas.

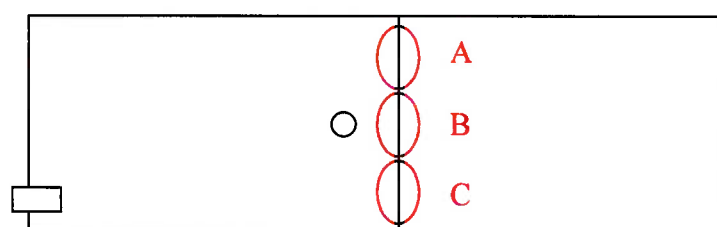


Figura 5.31: Regiões de avaliação de rugosidade.

5.2.2.1 Peças com Acabamento Convencional

Na Tabela 5.4 são apresentados dados típicos de rugosidade das peças com acabamento convencional após o teste de motor.

| Região | Convencionais | | |
|----------------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| | A | B | C |
| Ra (μm) | $0.17 \pm 0,10$ | $0.16 \pm 0,01$ | $0.16 \pm 0,004$ |
| Rmax (μm) | $2.68 \pm 1,15$ | $2.78 \pm 0,69$ | $3.51 \pm 0,47$ |
| Rz (μm) | $1.56 \pm 0,65$ | $1.74 \pm 0,39$ | $1.84 \pm 0,23$ |

Tabela 5.4: Avaliação de Rugosidade – Acabamento Convencional

Na Fig. 5.32 é apresentado o perfil de rugosidade da região A. Na Fig. 5.33 é apresentada a foto da região com um aumento de 6,4X. Nota-se que tanto no perfil como nas fotos podem ser identificadas 3 regiões distintas, identificadas com números 1, 2 e 3.

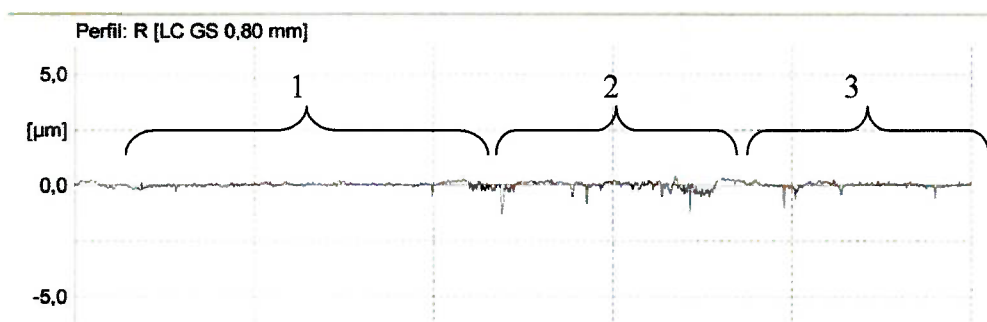


Figura 5.32: Perfil de rugosidade – Região A – Acabamento Convencional

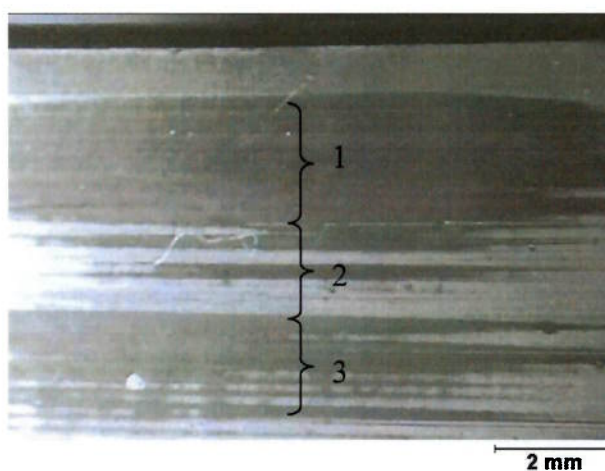


Figura 5.33: Foto – Região A – Acabamento Convencional

A Fig. 5.34 apresenta o perfil de rugosidade da região B após o teste de motor. Nota-se que o perfil nesta região é semelhante ao perfil de rugosidade da peça nova. Na Fig 5.35 é apresentada uma foto da região em detalhe.

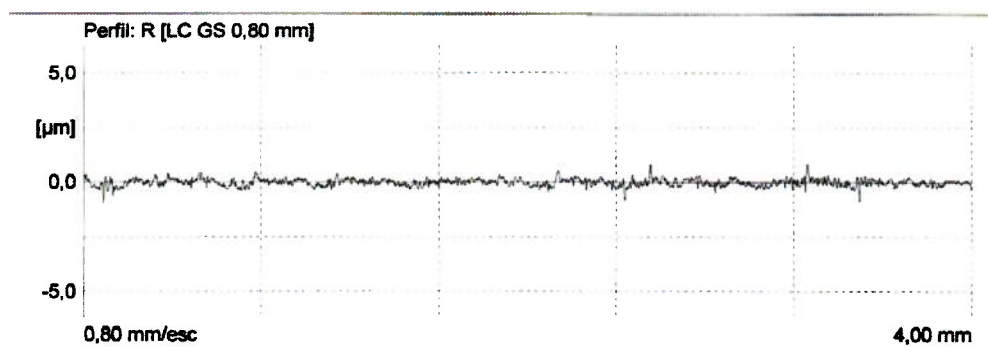


Figura 5.34: Perfil de rugosidade – Região B – Acabamento Convencional



Figura 5.35: Foto – Região B – Acabamento Convencional

Na Fig. 5.36 é apresentado o perfil de rugosidade da região C de uma peça convencional. Na Fig. 5.37 é apresentada uma foto desta região. Nota-se que abaixo da região avaliada ainda é possível observar o acabamento original da peça.

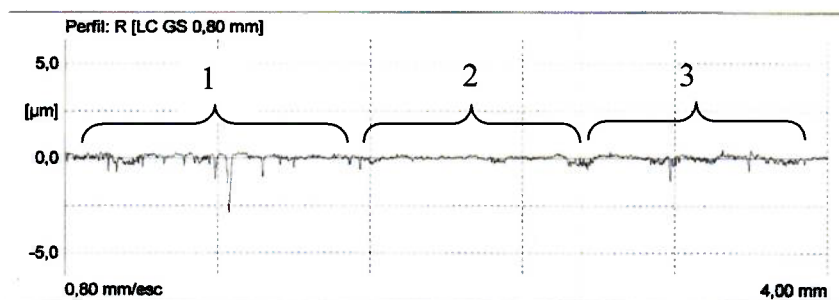


Figura 5.36: Perfil de Rugosidade – Região C – Acabamento Convencional

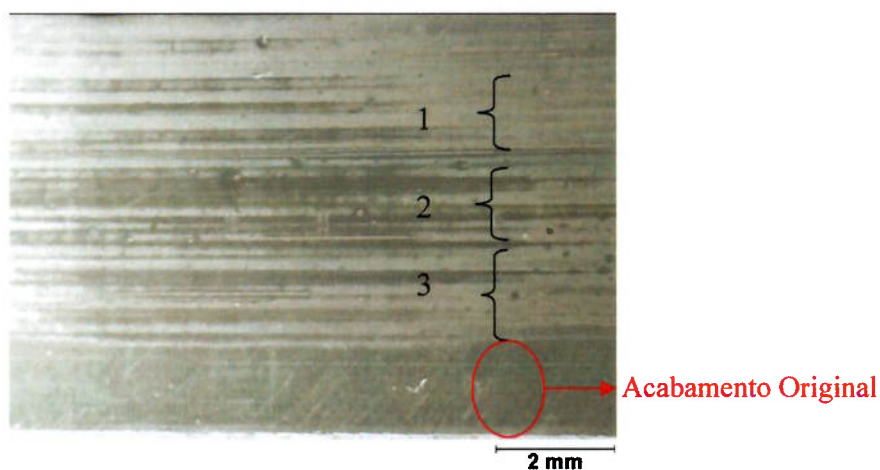


Figura 5.37: Foto – Região C – Acabamento Convencional

5.2.2.2 Peças com Acabamento Microperfilado

Na Tabela 5.5 são apresentados dados típicos de rugosidade das peças com acabamento microperfilado após o teste de motor.

| Região | Microperfiladas | | |
|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | A | B | C |
| Ra (μm) | $0.35 \pm 0,04$ | $0.50 \pm 0,01$ | $0.37 \pm 0,04$ |
| Rmax (μm) | $2.97 \pm 0,91$ | $4.19 \pm 0,17$ | $3.81 \pm 1,47$ |
| Rz (μm) | $2.28 \pm 0,62$ | $2.73 \pm 0,10$ | $2.36 \pm 0,57$ |

Tabela 5.5: Avaliação de Rugosidade – Acabamento Microperfilado

Na Fig. 5.38 é apresentado o perfil de rugosidade da região A de uma peça com acabamento microperfilado. Na Fig. 5.39 mostra-se em detalhe a superfície da peça na região avaliada. Pode-se notar duas marcações distintas na peça. Na região (1) há uma marcação mais forte na superfície da peça e percebe-se que o perfil de rugosidade está mais baixo, com maior desgaste que na região (2).

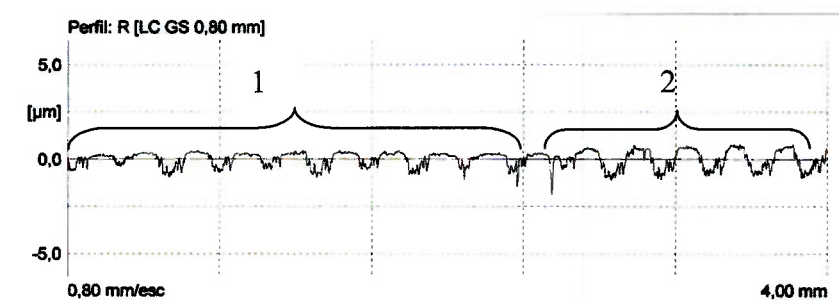


Figura 5.38: Perfil de rugosidade – Região A – Acabamento Microperfilado

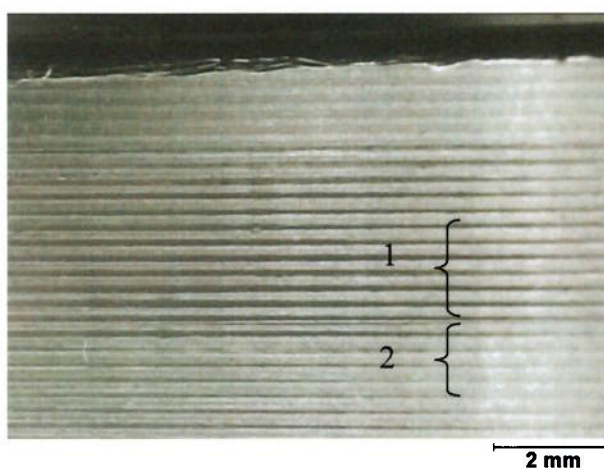


Figura 5.39: Foto – Região A – Acabamento Microperfilado

A Fig. 5.40 apresenta o perfil típico de rugosidade da região B em peças com acabamento microperfilado. A Fig. 5.41 apresenta a foto de superfície desta região. Nota-se que nesta região a marcação após o teste apresenta-se homogênea.

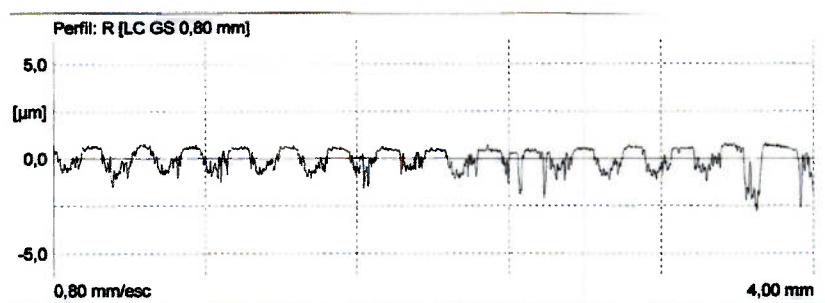


Figura 5.40: Perfil de rugosidade – Região B – Acabamento Microperfilado

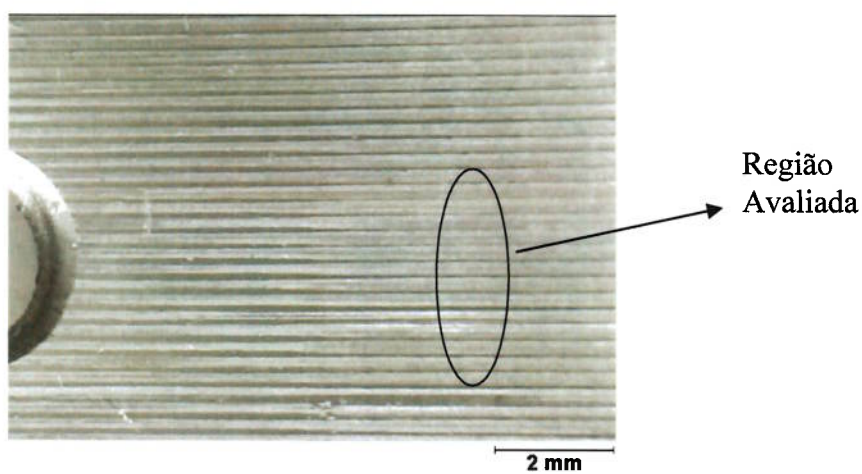


Figura 5.41: Foto – Região B – Acabamento Microperfilado

Na Fig.5.42 é apresentado o perfil de rugosidade da região C de uma peça microperfilada após o teste de motor. Na Fig.5.43 tem-se a foto de superfície desta região. Pode-se notar que nesta região também é observada uma marcação homogênea.

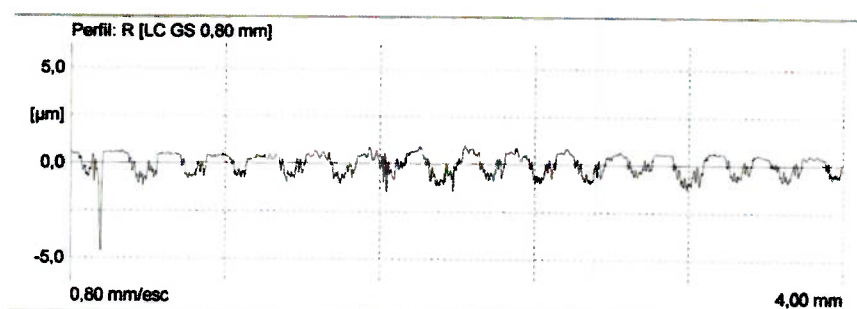


Figura 5.42: Perfil de rugosidade – Região C – Acabamento Microperfilado

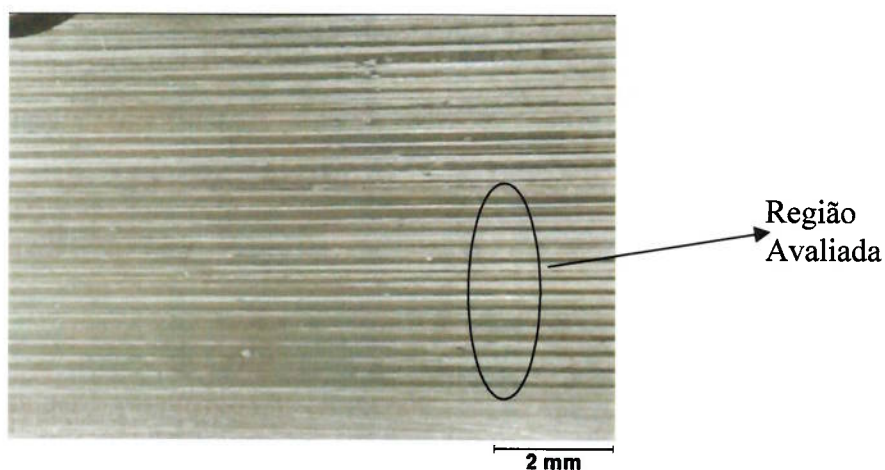


Figura 5.43: Foto – Região C – Acabamento Microperfilado

5.2.3 Avaliação de Desgaste

Ao realizar a avaliação visual das peças após o teste, nota-se que as peças com microperfilamento apresentaram um aspecto visual mais homogêneo, dando a impressão de terem um menor desgaste.

Nota-se que o perfil de rugosidade das peças com acabamento microperfilado teve desgaste de aproximadamente metade de sua altura (R_z), na região mais desgastada (A), enquanto que as peças com acabamento convencional mostram uma área espelhada, mas mantêm o seu perfil quase inalterado.

Comparando o perfil de rugosidade da região A (maior desgaste) dos dois tipos de acabamento testados, nota-se que peças com microperfilamento apresentam maior desgaste que peças com acabamento convencional. As Fig. 5.44 e 5.45 ilustram a quantificação do desgaste. Pode-se notar que o desgaste das peças com microperfilamento é maior que peças com acabamento convencional.

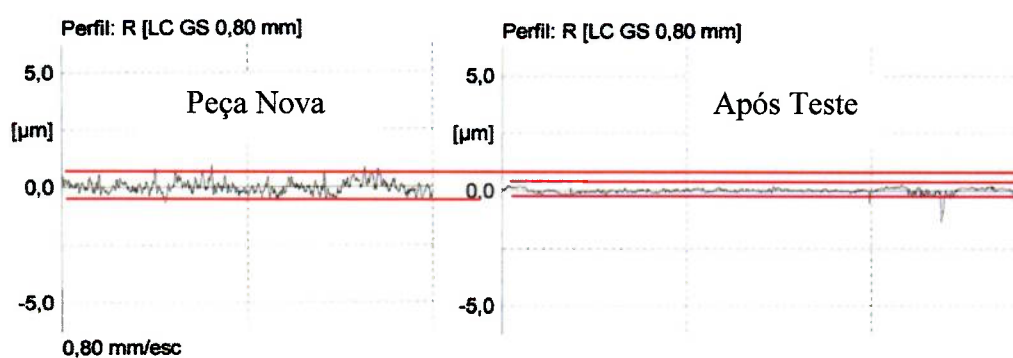


Figura 5.44: Ilustração do desgaste – Peça com Acabamento Convencional.

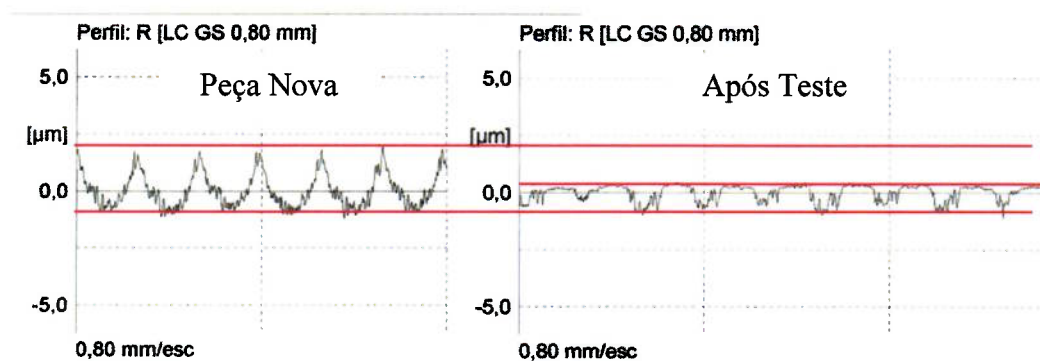


Figura 5.45: Ilustração do Desgaste – Peças com Acabamento Microperfilado.

A Tabela 5.6 apresenta a análise de rugosidade das peças novas considerando os valores de T_p (perfil de apoio), obtidos da Curva de Abbott dos perfis de rugosidade.

Analisando os dados da tabela é possível checar que a principal diferença entre as peças com acabamento convencional e microperfilamento, quando novas, é a área exposta de apoio. O valor de T_p avaliado a $0,2\mu\text{m}$ do pico mais alto do perfil de rugosidade para peças convencionais é 4,9% e para peças microperfiladas é somente 2,8%. A diferença fica maior quando consideramos o T_p a $0,5\mu\text{m}$ da superfície, a peça convencional já apresenta uma área de apoio de aproximadamente 32%, enquanto que a peça microperfilada apresenta somente 8%, pois a peça convencional apresenta uma superfície mais lisa do que as peças microperfiladas.

| | Convencionais | Microperfiladas |
|----------------------------------------|-----------------|-------------------|
| Ra (μm) | $0,19 \pm 0,01$ | $0,64 \pm 0,01$ |
| Rmax (μm) | $1,51 \pm 0,14$ | $3,41 \pm 0,07$ |
| Rz (μm) | $1,38 \pm 0,10$ | $3,23 \pm 0,02$ |
| Sm (mm) | - | $0,259 \pm 0,001$ |
| T_p @ 0,2 (%) | $4,9 \pm 0,5$ | $2,8 \pm 0,3$ |
| T_p @ 0,5 (%) | $31,6 \pm 0,1$ | $8,3 \pm 1,0$ |
| T_p @ 0,8 (%) | - | $16,1 \pm 1,3$ |
| T_p @ 1,0 (%) | - | $20,3 \pm 1,0$ |
| T_p @ 1,2 (%) | - | $23,3 \pm 0,6$ |

Tabela 5.6: Avaliação de T_p – Bronzinas Novas

| Região | Convencionais | | |
|----------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | A | B | C |
| Ra (μm) | $0,17 \pm 0,10$ | $0,16 \pm 0,01$ | $0,16 \pm 0,04$ |
| Rmax (μm) | $2,68 \pm 1,15$ | $2,78 \pm 0,69$ | $3,51 \pm 0,47$ |
| Rz (μm) | $1,56 \pm 0,65$ | $1,74 \pm 0,39$ | $1,84 \pm 0,23$ |
| T_p @ 0,2 (%) | $18,0 \pm 11,8$ | $6,6 \pm 0,0$ | $15,3 \pm 11,1$ |
| T_p @ 0,5 (%) | $66,1 \pm 37,7$ | $32,0 \pm 6,1$ | $58,7 \pm 6,5$ |
| T_p @ 0,8 (%) | $88,1 \pm 15,5$ | $68,6 \pm 13,4$ | $92,5 \pm 3,0$ |
| T_p @ 1,0 (%) | $95,1 \pm 6,2$ | $87,6 \pm 14,4$ | $97,0 \pm 0,85$ |
| T_p @ 1,2 (%) | $96,8 \pm 4,0$ | $96,4 \pm 3,4$ | $98,1 \pm 0,7$ |

Tabela 5.7: Avaliação de T_p – Bronzinas Convencionais Após Teste

| Região | Microperfiladas | | |
|----------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | A | B | C |
| Ra (μm) | 0,35 \pm 0,04 | 0,50 \pm 0,01 | 0,37 \pm 0,04 |
| Rmax (μm) | 2,97 \pm 0,91 | 4,19 \pm 0,17 | 3,81 \pm 1,47 |
| Rz (μm) | 2,28 \pm 0,62 | 2,73 \pm 0,10 | 2,36 \pm 0,57 |
| Tp @ 0,2 (%) | 10,9 \pm 2,0 | 11,9 \pm 3,8 | 16,2 \pm 3,0 |
| Tp @ 0,5 (%) | 42,2 \pm 7,1 | 38,1 \pm 9,6 | 51,6 \pm 1,2 |
| Tp @ 0,8 (%) | 68,6 \pm 1,6 | 51,6 \pm 6,7 | 69,9 \pm 0,9 |
| Tp @ 1,0 (%) | 78,7 \pm 0,6 | 59,9 \pm 7,8 | 78,6 \pm 3,2 |
| Tp @ 1,2 (%) | 87,1 \pm 2,4 | 69,3 \pm 6,7 | 85,5 \pm 4,2 |

Tabela 5.8: Avaliação de Tp – Bronzinas Microperfiladas Após Teste

Ao comparar os dados das Tabela 5.7 e 5.8, nota-se que os valores de Tp a 0,2 μm da superfície já são mais próximos, entre as peças convencionais e microperfiladas. Isto nos dá uma indicação de que as peças microperfiladas sofreram um maior desgaste, para poder suportar o carregamento, pois a área de apoio inicial não era suficiente.

A 0,8 μm nota-se ainda a influência do perfil de rugosidade de cada uma das peças, mas se levarmos em consideração o valor de Tp a uma profundidade maior, por exemplo, a 1,2 μm da superfície, nota-se que os valores são próximos, pois se considera que praticamente toda a superfície está exposta para ambos os casos.

A Fig. 5.46 ilustra os valores de Tp a 0,2 μm , 0,8 μm e 1,2 μm da superfície após o teste. Nota-se que as peças convencionais e microperfiladas realmente apresentam valores próximos de área de contato nas regiões próximas da superfície, e que, a 1,2 μm , as peças convencionais já apresentam quase contato total e as peças microperfiladas ainda apresentam alguns vales remanescentes, o que minimiza a área de contato. Portanto, pode-se concluir que as peças apresentam um desgaste diferenciado, devido à diferença de área de apoio inicial e a sua rugosidade.

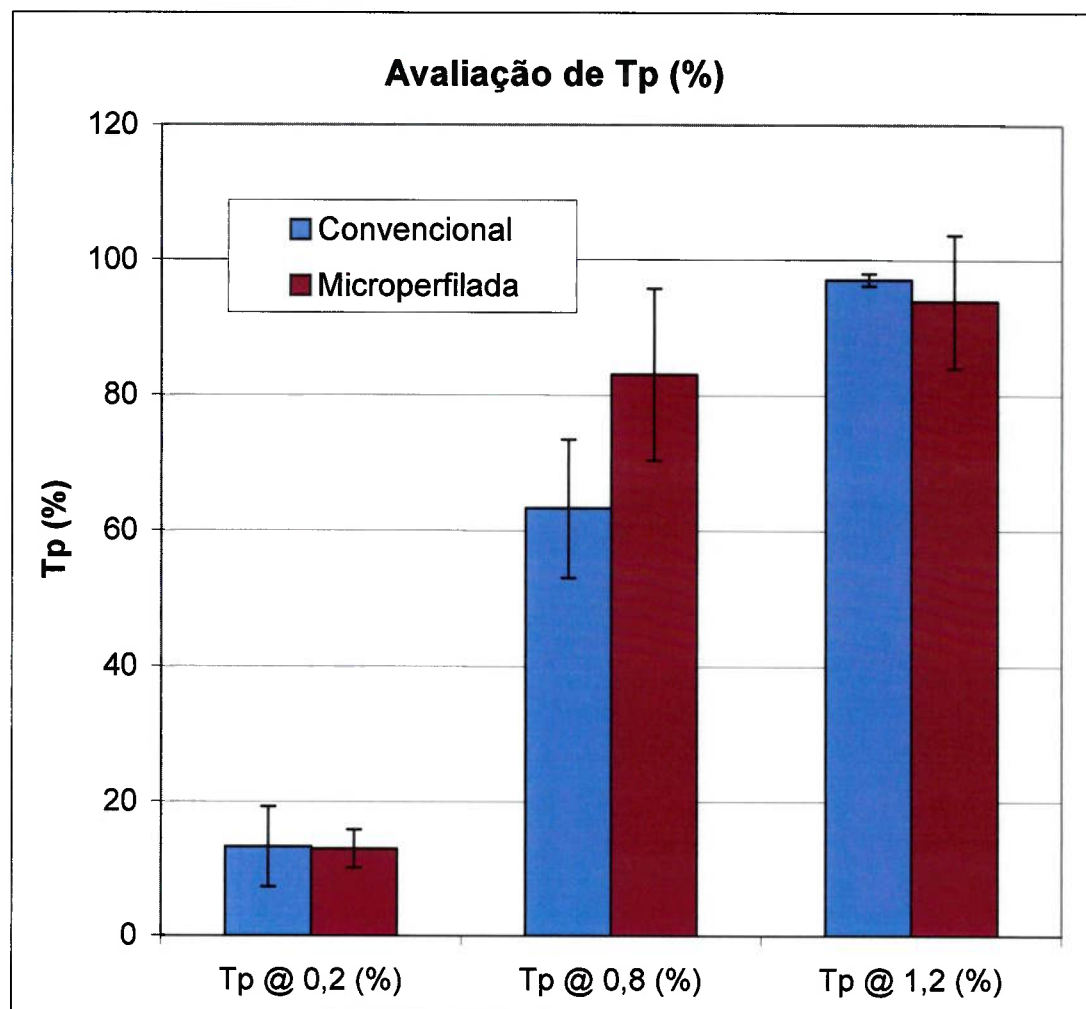


Figura 5.46: Avaliação de Tp (%) após Teste

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 Testes de Bancada

Os valores de temperatura nos carregamentos avaliados apresentaram valores maiores para as bronzinas com acabamento convencional. Nota-se, portanto, que acabamentos superficiais na mesma direção, mas com perfis diferentes, proporcionam temperaturas diferentes no sistema. Foi constatado que, de 6 testes realizados, apenas 2 casos de peças com acabamento convencional apresentaram engripamento, e que nenhuma das peças com microperfilamento apresentou engripamento. Portanto, estes dados contribuem para a idéia de que peças com acabamento microperfilado apresentam maior resistência ao engripamento que peças com acabamento convencional. Em ambos os casos, a ausência de engripamento pode ter sido favorecida pelo fato da temperatura nas costas das bronzinas (lado aço) não ser tão elevada (Figs. 5.1 e 5.2) a ponto de assegurar que, na liga, a temperatura fosse maior que a temperatura de fusão do estanho, cerca de 230°C (ASM Handbook, 1992). Ainda sobre temperatura, através das referências sabe-se que a temperatura varia com o quadrado da rotação (Fig. 2.55), e quanto menor a rotação menor a diferença de temperaturas. Como este trabalho foi realizado a 500rpm, justifica-se a baixa diferença encontrada entre as peças microperfilada e convencional.

Nos resultados de capacidade de carga, nota-se que os valores considerando a média e os desvios padrão se sobrepõem. Isto pode ser explicado devido aos fatores de fluxo (Patir e Cheng, 1978). No trabalho de Ni e Cheng (1996a), foi constatado que, devido ao valor do parâmetro de rugosidade γ , peças com o mesmo tipo de acabamento superficial (longitudinal), tendem a apresentar menor diferença de resultados de capacidade de carga, do que quando são comparados acabamentos na transversal x longitudinal, como no caso de Kumada et al (1996) e Watanabe et al (2000).

A Tabela 6.1 apresenta os valores de largura x diâmetro das peças testadas em bancada comparados com os valores das referências.

| Referência | | Largura / Diâmetro (B/D) |
|------------------------|-----|--------------------------|
| Ni e Cheng (1996a e b) | I | 0,2 |
| Kumada (1996) | II | 0,4 |
| Sorab e Korcek (1998) | III | 0,6 |
| Teste de Bancada | IV | 0,3 |

Tabela 6.1: Comparação de Valores de Largura/Diâmetro de Peças Testadas em Bancada

Ao analisar os dados da tabela, é possível supor porque Ni e Cheng (1996a) não observaram diferenças significativas entre as peças mandriladas e brochadas e porque Kumada et al. (1996) observaram maiores diferenças de comportamento entre peças com acabamento microperfilado e brochado. Ao colocar os dados de Largura/Diâmetro na Fig. 2.42, é possível observar (Fig. 6.1) que peças com tendência de parâmetro de superfície > 1 apresentam valores menores de capacidade de carga quando a relação largura/diâmetro é maior que 0,2. O que pode justificar os resultados próximos nos testes realizados com bronzinas convencionais e microperfiladas é que, provavelmente, as curvas de γ para as peças testadas em bancada devem ser muito próximas para o valor 0,3.

Ao avaliar as peças, verificou-se a ocorrência de forte marcação nas bordas. Observando as peças com um maior aumento, nota-se que não há mais a presença do acabamento superficial nestas regiões. Talvez, a ocorrência de flexão do eixo, causada pela configuração da bancada de testes (distância entre eixos e carregamento aplicado), também pode ter contribuído para a obtenção de valores próximos de capacidade de carga, pois a partir de uma certa carga estava sendo avaliada o material base (sem acabamento), ao invés de analisar-se a influência do acabamento superficial.

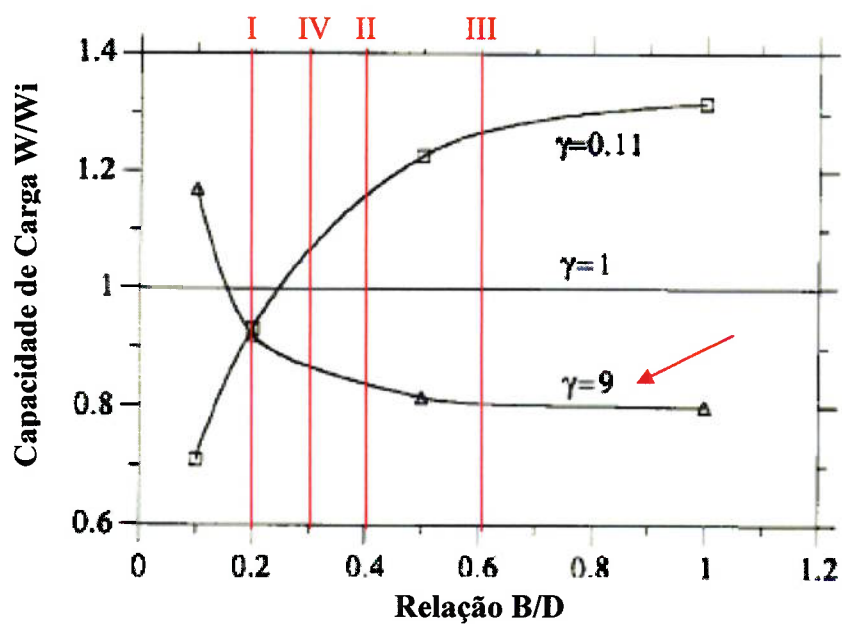


Figura 6.1: Comparação dos Valores de B/D das Peças Testadas em Bancada.

Nas Fig. 6.2 e 6.3 são apresentados os perfis das peças antes e após o teste de bancada. Com isto, confirma-se o desgaste localizado somente nas laterais das peças.

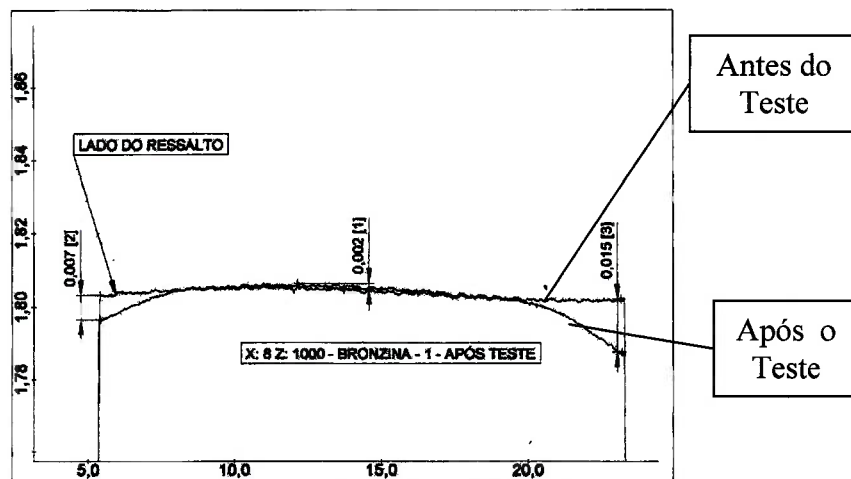


Figura 6.2: Perfil - Bronzina com Acabamento Convencional.

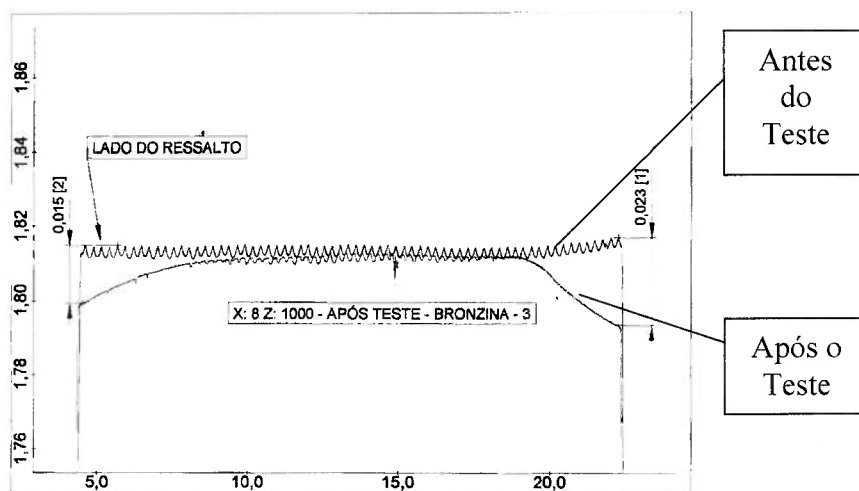


Figura 6.3: Perfil – Bronzina com Acabamento Microperfilado.

Ao calcular o valor de capacidade de carga (Tabela 5.3) para este material, observa-se que o valor é muito próximo para os dois materiais, mas muito abaixo do esperado ($<50\text{MPa}$), pois se pretende utilizar peças bimetálicas com acabamento microperfilado em motores mais modernos e mais carregados. Isto pode ser justificado pelo contato localizado somente nas bordas da peça, se a área de contato fosse maior, como num motor em funcionamento, a carga unitária das peças seria maior.

Pode-se dizer então, que o teste não comprovou a resistência ao engripamento com diferentes tipos de acabamento, pois o critério de finalização do teste não foi o de temperatura nas costas das peças, mas sim o de corrente do motor elétrico. Pelos gráficos de temperatura, nota-se que as peças microperfiladas poderiam suportar o teste por mais tempo, sem a ocorrência de engripamento, e o mesmo pode ser dito em relação a algumas das peças convencionais, que nem chegaram a apresentar o típico aumento súbito de temperatura, que indicaria a ocorrência de engripamento.

6.2 Teste de Motor

Após o teste de motor, todas as peças apresentam marcações (polimento) a cerca de 1,2 mm das laterais. Isto aconteceu devido ao perfil do colo de biela do virabrequim. A Fig. 6.4 mostra o perfil do colo do virabrequim e o perfil da peça juntos, e pode-se notar que a peça tem largura maior que o colo do virabrequim, o que provavelmente ocasionou o polimento localizado nas bronzinas.

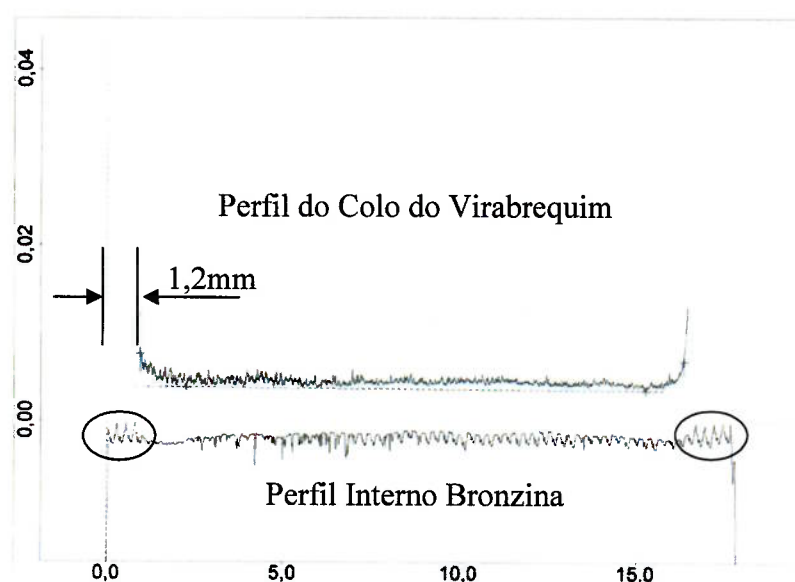


Figura 6.4: Configuração Bronzina – Colo de Virabrequim.

A diferença na marcação (desgaste) deve-se ao tipo de perfil de rugosidade de cada peça. No caso das peças microperfiladas, ainda é possível visualizar os vales remanescentes do microperfilamento. Notou-se que o desgaste de bronzinas microperfiladas foi maior que o das bronzinas com acabamento convencional, mas que a área de apoio ao final do teste próximo a superfície de contato ($T_p @ 0,2\mu\text{m}$) tem valores similares para as bronzinas convencionais e microperfiladas. Muito provavelmente, esta mesma área de contato foi gerada para sustentar a carga aplicada, pois depende da característica do material e da capacidade de carga unitária.

Sabe-se que num sistema lubrificado, como indicado no item 2.2.2, parte do carregamento é suportada pelo filme de óleo, e parte é suportada pelo contato das asperezas do material. Mas, como foi realizado um teste cíclico, que promove situações de transição da órbita do eixo, fazendo com que haja quebra do filme de óleo, pode-se entender o porquê das áreas de contato das peças serem similares.

Por outro lado, devido ao seu rápido desgaste, o que permite uma melhor acomodação das distorções do sistema (alojamento e virabrequim), as bronzinas microperfiladas apresentam uma melhor conformabilidade, como foi constatado no trabalho de Kumada et al (1996).

Destes resultados pode-se explicar a porque Watanabe et al (2000) concluíram que as peças microperfiladas podem ser utilizadas com folgas menores no início do teste. As peças vão se desgastar até que seja estabelecido um equilíbrio entre o carregamento aplicado e a área da bronzina, que vão suportar a parcela de pressão de contato rugoso.

7 CONCLUSÕES

Através das análises realizadas, notou-se que, em bronzinas com rugosidade no mesmo sentido, longitudinal, e com diferenças apenas no perfil de rugosidade, as diferenças de capacidade de carga não foram tão sensíveis quanto às encontradas na literatura, na comparação de bronzinas brochadas e mandriladas. Porém, deve-se salientar que estes resultados podem ser dependentes da relação largura/diâmetro das peças.

A avaliação de temperatura durante o ensaio de bancada mostrou que peças microperfiladas sempre apresentaram temperaturas médias menores que as peças convencionais, mas com sobreposição de desvios. Isto pode ser justificado pela utilização de baixa rotação (500rpm) no teste de bancada, que favorece a ocorrência do contato metal-metal em todas as situações estudadas.

No teste de motor, foi observado que as peças microperfiladas apresentam um visual mais homogêneo, explicado pela presença de vales remanescente. Porém, ao observar-se o perfil de rugosidade após o teste, nota-se que as bronzinas microperfiladas apresentaram um desgaste muito maior que as peças convencionais.

As peças microperfiladas, por apresentarem menor área de contato, têm um desgaste maior no início do teste, o que facilita a acomodação das deformações do sistema, assim como explicado no trabalho de Kumada et al (1996). Devido a esta maior propriedade de conformabilidade, pode-se aplicar bronzinas microperfiladas em motores que apresentam problemas de contato excessivo, marcação polida nas bordas, evitando assim a fadiga de contato, pois a bronzina será conformada durante o período de amaciamento, e poderá resistir melhor ao carregamento no restante do teste.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma sugestão para outros trabalhos é utilizar uma forma melhor de caracterizar as superfícies, quer seja pela análise de outros parâmetros de rugosidade, como T_p ou a família R_k , quer pela análise das superfícies através do método 3D.

Outra sugestão é realizar novos testes de bancada com bronzinas com diferentes relações de largura/diâmetro e verificar sua influência na capacidade de carga. Sugere-se, também, variar a rotação do testes, a fim de mapear a capacidade de carga com relação a rotação. Ao invés de utilizar a corrente do motor como critério de parada do teste, utilizar a temperatura nas costas da bronzina, que se mostra um critério melhor para evidenciar a ocorrência de engripamento na superfície da bronzina.

Um outro ponto que pode ser estudado é a influência do acabamento e do material do eixo, no desempenho de peças.

Pode-se também, por simulação numérica, utilizando métodos mais modernos, identificar qual a parcela de pressão suportada pelas asperezas e qual a pressão de filme de óleo em determinada condição de funcionamento.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Handbook – Alloy Phase Diagrams Vol.3**, Cap. 2, 1992.
2. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay) – ASME B46.1**. Nova York, 1996.
3. ANDERSSON, B.S. Vehicle Tribology, 17th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, **Elsevier Tribology Series 18**, p. 503-506, 1991.
4. BAYER, R.G. Understanding the Fundamentals of Wear. **Machine Design**. Vol. 28, p.73-76, 1972.
5. BAYER, R.G. **Mechanical Wear Prediction and Prevention**. Part C, p.289-589 Marcel Drekker, 1994
6. BAYER, R.G. Wear Testing. In: **Friction and Wear Testings – Source Book of Selected References from ASTM Standards and ASM Handbooks**. ASTM, p.30-37, 1997.
7. BASSHUYSEN, R. and SCHÄFE, F, **Internal Combustion Engine Handbook – Basics, Components, Systems, and Perspectives**, Cap. 7 – p.224 – 240, SAE International, 2004.
8. COLLINS, J.A. **Failure of Materials in Mechanical Design**. Cap. 17, p.583-605, John Wiley and Sons, 1993

9. CHAVARRIA, E.N.R. **Caracterização de superfícies de deslizamento lubrificadas (sdl) para virabrequins.** 1995. 159p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.
10. CHRISTENSEN, H., TONDER, K., The Hydrodynamic Lubrication of Rough Journal Bearings, **Transactions of the ASME**, April, p. 166 – 172, 1973.
11. DAVIS, J.R. Tribological Behavior. In: **ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys.** p. 629 - 638, 1994
12. DEHART, A.O, HARWICK, D.H., Engine Bearing Design: 1969, **SAE**, 690003, 1969.
13. DESAKI, T., KAMIYA, S., Development of a new aluminum alloy bearing for small-sized diesel engines, **JSAE**, Review 21, p.143- 147, 2000.
14. DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG. **GPS – Surface Texture: Profile Method Terms, Definitions and Surface Texture Parameters – English Version of DIN EN ISO 4287.** Berlim, 1998.
15. DUARTE, D. **Tribologia e Mancais de Deslizamento.** 2001. D Duarte Sistemas e Processos Industriais (Apostila) 148p. São Carlos.
16. ESTON, N.E., Bronzinas para Autoveículos, **Metalurgia**, vol.22, nº 108, Novembro, 1966.
17. FARIAS, M.C.M. **Desgaste por deslizamento de aços inoxidáveis austeníticos.** 1999. 111p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

18. FILLON, M, BOUYER, J, Thermohydrodynamic analysis of a worn plain journal bearing, **Tribology International**, Vol. 37, Issue 2, February, p. 129-136, 2004.
19. FUKUOKA, T., KATO, H., KAMIYA, S., SODA, N., Aluminum Alloy Bearings Containing Hard Particles Fitted for Use with Nodular Cast Iron Shaft, **SAE**, 830308, 1983.
20. GLAESER, W.A, **Materials for Tribology**, Tribology Series, 20, Cap.3, p. 69 – 88, 1992.
21. HEYWOOD, J.B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. New York, Cap. 13 , p, 712 – 747, 1990.
22. HSU, S., An integrated surface technology for optimum performance, National Institute of Standards and Technology, 44p, <http://www.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/deer_2004/session3/2004_deer_hsu.pdf>. Acesso em 25 jul., 2005.
23. HUTCHINGS, I.M. **Tribology Friction and Wear of Engineering Materials**. London, Cap.5, p.86-92, 1992.
24. KUMADA, Y.; HASHIZUME K.; KIMURA Y., Performance of plain bearings with circumferential microgrooves. **Tribology Transactions**. Vol. 39, p. 81 – 86, 1996.
25. LAGEMANN, V. **Numerische Verfahren zur tribologischen Charakterisierung bearbeitungsbedingter rauher Oberflächen bei Mikrohydrodynamik und Mischreibung**. 2000. 116p. Dissertação – Universität Gesamthochschule, Kassel.

26. LUDEMA, K. Sliding and Adhesive Wear. In: **ASM Handbook: Friction, Lubrication and Wear Technology**. Vol. 18, p. 236-241, 1992.
27. MASSEY, I.D, MACQUARRIE, N.A, EASTHAM, D.R, Crankshaft Bearing Materials: Development for Highly Loaded Applications, **Industrial Lubrication and Tribology**, November/December, p. 4 – 11, 1990.
28. METAL LEVE. **Motores de Combustão Interna – Manual Técnico**. 1996.
29. NI, X., CHENG, H.S., Seizure Resistance of Aluminum-Lead-Silicon Connecting Rod Bearings and Nodular Cast Iron Shafts, **Tribology Transactions**, Volume 39, p.121 – 129, 1996.
30. NI, X., CHENG, H.S., Seizure Failure of Copper-Lead with Overlay and Aluminum-Tin Connecting Rod Bearings, **Tribology Transactions**, Volume 39, p.194 – 200, 1996.
31. ONOGAWA, K, et al, A Method for Predicting Connecting Rod Bearings Reliability Based on Seizure and Wear Analysis, **SAE**, 880568, 1988.
32. PATIR, N, CHENG, H.S., Effect of surface roughness orientation on the central film thickness in E.H.D. contacts, in **Proceeding of the 5th Leeds-Lyon on Tribology**, p. 15 – 21, 1978.
33. PATIR, N, CHENG, H.S, An average Flow Model for Determining Effects of Three-Dimensional Roughness on Partial Hydrodynamic Lubrication, **Transactions of the ASME**, vol. 100, p. 12 – 17, 1978.
34. PETERSON, M.B. Design Considerations for Effective Wear Control. In: **Wear Control Handbook**. ASME, New York, p.413-457, 1980.

35. PRIEST M.; TAYLOR C.M.; Automobile engine tribology – approaching the surface. **Wear**. Vol. 241, p. 193 – 203, 2000.
36. RAMESH, J, MAJUMDAR, B.C., RAO, N.S., Thermohydrodynamic Analysis of Submerged Oil Journal Bearings Considering Surface Roughness Effects, **Transactions of the ASME**, Vol. 119, January, p. 100 – 106, 1997.
37. ROSENBERG, R.C. General Friction Considerations for Engine Design, **SAE**, 821576, 1982.
38. SCOTT, D. Wear. In: **Industrial Tribology**. Elsevier, Cap.2, p.12-30, 1991.
39. SCOTT, D. Materials for Tribological Application. In: **Industrial Tribology**. Elsevier, Cap.8, p.205 - 221, 1991.
40. SORAB, J., KORCEK, S., Surface and engine oil effects on journal bearing lubrication, **SAE**, 981408, 1998.
41. SUMMERS-SMITH, J.D, **An Introductory Guide to Industrial Tribology**, MEP, Cap.2 , p. 20 – 42, 1994.
42. TAYLOR, C.M.; Automobile engine tribology – design considerations for efficiency and durability. **Wear**. Vol. 221, p. 1 – 8, 1998.
43. TOMANIK, E. Brunimento de Cilindros – Principais Características, **SAE**, 921453, 1992.
44. TOMANIK, E. **Modelamento de desgaste por deslizamento em anéis de pistão de motores de combustão interna**. 2000. 198p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

45. TOMANIK, E. Modelling of the Asperity Contact Area on Actual 3D Surfaces, **SAE**, 2005-01-1864, 2005.
46. VICKERY, P.E. Friction Losses in Automotive Plain Bearings, **SAE**, 750052, 1975.
47. WANG, Q., Seizure-failure of journal-bearing conformal contacts, **Wear**, Vol 210, p. 8 – 16 (1997).
48. WATANABE et al. Theoretical analysis of bearing performance of microgrooved bearing. **JSAE**. Review 21, p.29-33, 2000.
49. WATANABE et al. A study of microgrooved bearing performance by using numerical analysis. **SAE** 2000-01-1338.
50. WHITEHOUSE, D.J. **Handbook of Surface Metrology**, Institute of Physics Publishing, 1994.
51. WILLIAMS, J.A.. **Engineering Tribology**. Oxford, Cap.5, p.166-199, 1994.
52. WILSON R.W., SHONE E.B, The Diagnosis of Plain Bearing Failures In **Industrial Tribology**, Tribology Series v.8, Cap.5, p. 80 – 131, 1991.
53. WILSON W.H, Why so many bearings materials In **Selecting Bearings for Economical and Reliable Design**, p. 19 – 30, 1986.
54. ZHANG, C, QIU Z., Effects of Surface Texture on Hydrodynamic Lubrication of Dynamically Loaded Journal Bearings, **Journal of Tribology Transaction**, vol. 41, p.43 – 48, 1997.

55. ZOTTIN, W., **Simulação de Bronzinas**, Trabalho apresentado no Curso para Engenharia de Aplicação da MAHLE Metal Leve AS, São Paulo, 2001. Não publicado.
56. ZUM GAHR, K.H., **Microstructure and Wear of Materials**, Tribology Series v.10, 1987.

ANEXO I – PROCEDIMENTO DE TESTE DE MOTOR

Características do Motor

| | |
|-----------------------------------|-----------------------|
| Designação | 1,0l 16V |
| Ciclo de funcionamento | Otto |
| Fator de tempos | 04 (quatro) |
| Número de cilindros (Z) | 04 |
| Diâmetro dos cilindros (D) | 70,0 mm |
| Curso (S) | 64,9 mm |
| Deslocamento (V) | 0,999 dm ³ |
| Taxa de compressão (rv) | 10,2 : 1 |
| Ordem de Ignição | 1 - 3 - 4 - 2 |
| Combustível | Gasolina |

Tabela do Programa de Teste

| Passo | Rotações | | Tempo de rampa | Duração do passo | Posição do acelerador | Temperatura do óleo, no cárter |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------|----------|----------------|------------------|-----------------------|--------------------------------|
| | Inicial | Final | | | | |
| (n°) | (rpm) | (rpm) | (s) | (s) | (%) | (°C) |
| 01 | M. Lenta | M. Lenta | ---- | 300 | Zero | V. Obs. |
| 02 | M. Lenta | 4.725 | 30 | rampa | 100 | --- |
| 03 | 4.725 | 6.250 | 15 | rampa | 100 | 130 a 140 |
| 04 | 6.250 | 6.250 | --- | 5 | 100 | 130 a 140 |
| 05 | 6.250 | 4.725 | 5 | rampa | Zero | 130 a 140 |
| 06 | Repetir os passos 03, 04 e 05 por 1.800 segundos, isto é, por 72 vezes | | | | | |
| 07 | 4.725 | M. Lenta | 5 | rampa | Zero | --- |
| 08 | M. Lenta | M. Lenta | --- | V. Obs. | Zero | 100 |
| 09 | Parar o motor para verificação / correção do nível de óleo | | | | | |
| 10 | M. Lenta | M. Lenta | --- | 300 | Zero | V. Obs. |
| 11 | M. Lenta | 4.725 | 30 | rampa | 100 | --- |
| 12 | 4.725 | 6.250 | 15 | rampa | 100 | 130 a 140 |
| 13 | 6.250 | 6.250 | --- | 5 | 100 | 130 a 140 |
| 14 | 6.250 | 4.725 | 5 | rampa | Zero | 130 a 140 |
| 15 | Repetir os passos 03, 04 e 05 por 1.800 segundos, isto é, por 72 vezes | | | | | |
| 16 | 4.725 | M. Lenta | 5 | rampa | Zero | --- |
| 17 | M. Lenta | M. Lenta | --- | V. Obs. | Zero | 100 |
| 18 | Parar o motor para verificação / correção do nível de óleo | | | | | |
| 19 | Repetir os passos 01 a 18 por 3 vezes | | | | | |
| Tolerâncias : ± 1 % | | | | | | |

OBS: Não submeter o motor a nenhum tipo de amaciamento