

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CARACTERIZAÇÃO DA EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL E DA  
VARIAÇÃO DIMENSIONAL DE BUCHAS AUTOLUBRIFICANTES  
SINTERIZADAS SOB CONDIÇÕES INDUSTRIAIS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA  
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM  
ENGENHARIA MECÂNICA.

JÚNIOR GERVÁSIO JUSTINO

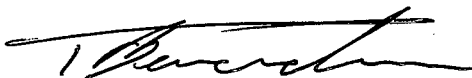
FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO DE 1997.

CARACTERIZAÇÃO DA EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL E DA  
VARIAÇÃO DIMENSIONAL DE BUCHAS AUTOLUBRIFICANTES  
SINTERIZADAS SOB CONDIÇÕES INDUSTRIAIS


ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE:

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO  
FABRICAÇÃO MECÂNICA, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.

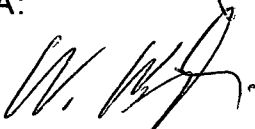


Prof. Dr.Eng.Mec. Pedro Amadeo Nannetti Bernardini - Orientador.

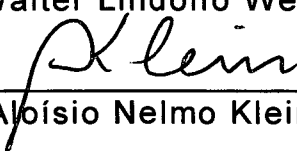


Prof. Dr. Abelardo Queiroz - Coordenador do curso.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Ing Walter Lindolfo Weingaertner - presidente.



Prof. Dr. Ing. Aloísio Nelmo Klein.



Prof.Dra.Eng.Mec. Ingeborg Kühn A.



Prof.Ph.D. Antônio Eduardo Martinelli.

*A meus pais, minha esposa e filha,  
que me incentivaram e permitiram chegar até aqui.*

## Agradecimentos

Todas aquelas pessoas que de uma forma ou de outra ajudaram na condução e conclusão deste trabalho merecem uma lembrança especial. Com o intuito de evitar ser injusto com muitas pessoas queridas, não gostaria de citar os nomes, evitando assim esquecer de algum, mas certificar que todos serão para sempre lembrados e que a eles sempre serei grato.

A estas pessoas o meu muito obrigado.



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2. MANCAIS - GENERALIDADES SOBRE FORMAS, MATERIAIS, LUBRIFICAÇÃO E DIMENSIONAMENTO</b>	<b>3</b>
2.1 BUCHAS AUTOLUBRIFICANTES SINTERIZADAS	5
2.1.1 VANTAGENS E LIMITAÇÕES	6
2.1.2 FENÔMENOS ENVOLVIDOS NO FUNCIONAMENTO DE MANCAIS AUTOLUBRIFICANTES.	8
2.2 TIPOS DE BUCHAS AUTOLUBRIFICANTES	13
2.2.1 FORMA DAS BUCHAS AUTOLUBRIFICANTES	13
2.2.2 CARACTERÍSTICAS DE MATERIAIS PARA BUCHAS AUTOLUBRIFICANTES	16
2.3 METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO DE MANCAIS AUTOLUBRIFICANTES SINTERIZADOS	19
2.3.1 ESCOLHA DO MATERIAL	20
2.3.2 DIMENSIONAMENTO QUANTO À CAPACIDADE DE CARGA	23
2.3.3 AJUSTES DE MONTAGEM	26
2.3.4 FOLGAS DE FUNCIONAMENTO - FOLGA DO MANCAL	27
2.4 AVALIAÇÃO DE BUCHAS AUTOLUBRIFICANTES.	28
<b>3. METALURGIA DAS BUCHAS AUTOLUBRIFICANTES SINTERIZADAS</b>	<b>31</b>
3.1 PRODUÇÃO DE BUCHAS AUTOLUBRIFICANTES SINTERIZADAS	31
3.2 EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL DA LIGA Cu90/Sn10	33
3.3 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PROCESSAMENTO NA EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL DO BRONZE OBTIDO A PARTIR DE MISTURAS DE PÓS ELEMENTARES	39
3.4 EVOLUÇÃO DIMENSIONAL DURANTE A SINTERIZAÇÃO	42
3.5 EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA	49
3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
<b>4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>53</b>
4.1 CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS E METODOLOGIA DOS ENSAIOS	55
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>63</b>
5.1 EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL NA SINTERIZAÇÃO	63
5.2 ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL (DTA)	71

5.3 EVOLUÇÃO DIMENSIONAL NA SINTERIZAÇÃO.	74
5.3.1 ASPECTOS DILATOMÉTRICOS.	74
5.4 INFLUÊNCIA DE ALGUMAS VARIÁVEIS INDUSTRIAIS DE PROCESSAMENTO.	76
<u>6. CONCLUSÕES</u>	<u>88</u>
6.1 QUANTO À MICROESTRUTURA.	88
6.2 QUANTO ÀS VARIAÇÕES DIMENSIONAIS.	89
6.3 QUANTO À RESISTÊNCIA À RUPTURA RADIAL (FATOR K)	89
6.4 QUANTO À INFLUÊNCIA DE ALGUMAS VARIÁVEIS DE PROCESSO.	89
<u>7. SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS</u>	<u>91</u>
<u>8. APÊNDICE I - TÓPICOS DE LUBRIFICANTES</u>	<u>97</u>
<u>9. APÊNDICE 5 - FLUTUAÇÃO DA VARIAÇÃO DIMENSIONAL, NO SENTIDO DA ALTURA, MEDIDA PARA OS LOTES PROCESSADOS NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE SINTERIZAÇÃO.</u>	<u>106</u>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Capacidade de carga em função da velocidade de deslizamento para mancais autolubrificantes sinterizados e mancais hidrodinâmicos convencionais [06] (as unidades do gráfico foram preservadas conforme a referência original).....	8
Figura 2 - Filme de lubrificante em mancais sinterizados. ....	9
Figura 3- Formas diversas de componentes autolubrificantes [08]. ....	13
Figura 4 - Fluxograma do processo de fabricação de buchas autolubrificantes sinterizadas.....	32
Figura 5 - Diagrama de fases do sistema Cobre/Estanho [13]. ....	35
Figura 6 - Evolução dimensional de misturas elementares de Cobre/Estanho durante a sinterização.....	44
Figura 7- Evolução dimensional em função do tempo de sinterização para diversos tipos de lubrificante. ....	48
Figura 8- Evolução das propriedades mecânicas em função do tempo de sinterização [24]. ....	50
Figura 9 - Ciclos de sinterização em forno tubular.....	54
Figura 10 - Buchas utilizadas nos experimentos.....	57
Figura 11 - Forno de sinterização com carga intermitente. ....	59
Figura 12 - Amostra aquecida a 250°C e resfriada a 50°C/min.....	64
Figura 13 - Aquecimento até 300°C, resfriamento 50°C/min.....	65
Figura 14 - Aquecimento a 400°C e resfriamento a 50°C/min. (Imagem obtida em MEV utilizando elétrons retro-espalhados).....	65
Figura 15 - Aquecimento a 550°C e resfriamento 50°C/min. ....	66
Figura 16 - Aquecimento a 700°C com resfriamento a 50°C/min.....	66
Figura 17- Amostra aquecida a 800°C e resfriada a 50°C/min.....	67
Figura 18- Amostra aquecida a 800°C e resfriada a 50°C/min.....	68
Figura 19- Aquecimento a 830°C com 1 minuto de patamar. ....	68
Figura 20 - Sinterização a 830°C com 3 e 12 minutos de patamar, respectivamente.....	70
Figura 21 - Análise térmica diferencial de um compactado de Cu 89/ Sn 10/ C 1 com densidade 6,74 g/cm <sup>3</sup> aquecida a 10°C/min sob atmosfera de argônio ultra puro.....	71
Figura 22 - Análise térmica diferencial de um compactado (de composição Cu 89%/ Sn 10%/ C 1%) com densidade 6,4 g/cm <sup>3</sup> aquecido a 10°C/min sob atmosfera de argônio ultra puro. ....	72
Figura 23 - Análise térmica diferencial de compactados de Cu 89/ Sn 10/ C 1 com densidade 6,74 g/cm <sup>3</sup> e 6,4 g/cm <sup>3</sup> aquecida a 10°C/min sob atmosfera de argônio ultra puro.....	72
Figura 24 - Influência da densidade a verde na variação dimensional em função da temperatura e do tempo de sinterização .....	75
Figura 25 - Variação dimensional em função da temperatura e do tempo de sinterização para cilindros de bronze submetidos a diferentes velocidades de aquecimento. ....	76
Figura 26 - Influência da densidade a verde na variação dimensional em função da temperatura (para buchas cilíndricas com flange e tempos de 2 min).....	77

Figura 27 - Influência da densidade a verde na variação dimensional em função da temperatura (para buchas cilíndricas com flange e tempos de 3 min).....	78
Figura 28 - Comportamento dimensional de buchas esféricas em função da temperatura para diferentes tempos de carga e densidades: a) densidade a verde 6,2 g/cm <sup>3</sup> , b) densidade a verde 6,6 g/cm <sup>3</sup> , c) densidade a verde 6,8 g/cm <sup>3</sup> , d) densidade a verde 7,0 g/cm <sup>3</sup> .....	80
Figura 29- Evolução dimensional (teórica) em função do tempo de carga.....	81
Figura 30 - Variação dimensional na altura em função da temperatura de sinterização para buchas com formas distintas.....	82
Figura 31- Variação dimensional em diferentes pontos e direções medidas em função da temperatura da zona de sinterização em buchas esféricas e cilíndricas com flange (para densidade 6,4 g/cm <sup>3</sup> e tempo de carga 3 minutos).....	83
Figura 32 - Variação de densidade sinterizada e da resistência à ruptura radial em função da temperatura para buchas cilíndricas com flange (densidade 6,4 g/cm <sup>3</sup> ).....	85
Figura 33 - Constante de resistência em função da densidade a verde (temperatura de sinterização 830°C).....	86

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de mancais, mecanismos de lubrificação e exemplos de aplicação [01].	4
Tabela 2 - Formas, dimensões e tolerâncias das buchas autolubrificantes [05].	15
Tabela 3- Relação entre porosidade total e interconectada [03].	16
Tabela 4 - Materiais, composição química e propriedades de buchas autolubrificantes [03].	22
Tabela 5- Capacidades típicas de carga (produtos PV de acordo com MPIF 35).	25
Tabela 6 - Ajustes de montagem recomendados para buchas cilíndricas [02].	26
Tabela 7 - Folgas mínimas de funcionamento.	27
Tabela 8 - Características finais projetadas do mancai cilíndrico.	28
Tabela 9 - Composição, estrutura e propriedades físicas das fases intermediárias do sistema cobre/estanho.	33
Tabela 10 - Evolução dos fenômenos durante a sinterização do bronze a partir de misturas elementares segundo Achraia et al [19].	37
Tabela 11 - Efeito obtido na variação dimensional em função da temperatura e das reações em andamento segundo Patel [15].	43
Tabela 12 - Evolução dimensional da sinterização em função da temperatura.	46
Tabela 13 - Influência do tipo de lubrificante na variação dimensional de uma mistura obtida com os mesmos tipos de pós e sinterizadas sob as mesmas condições.	47
Tabela 14 -Guia para solução de problemas na fabricação de buchas de bronze sinterizadas	52
Tabela 15 - variáveis ensaiadas e os respectivos números de níveis considerados.	55
Tabela 16 - Tipos e características dos pós utilizados.	56
Tabela 17 - Tipos de óleos e temperaturas máximas de funcionamento. [1]98	

## RESUMO

A produção de buchas autolubrificantes que apresentem bom desempenho é o objetivo de todos os fabricantes deste tipo de produto. Os principais requisitos para que isto ocorra são uma boa microestrutura (homogênea), alta resistência e precisão dimensional.

Nesta dissertação, uma liga de bronze para buchas autolubrificantes foi estudada com o intuito de entender a sua evolução dimensional e microestrutural durante a sinterização sob condições industriais. Ainda foram estudadas diferentes geometrias de peças. As misturas elementares foram feitas em um misturador tipo "Y" e a sinterização das peças foi conduzida em um forno tipo push-pull. Além disso, corpos de prova foram sinterizados em um forno de batelada, em dilatômetro e em um analisador térmico diferencial com o objetivo de entender as reações que ocorrem durante o aquecimento e o patamar isotérmico de sinterização.

A sinterização em dilatômetro foi feita com diferentes densidades e velocidades de aquecimento. A análise térmica diferencial (DTA) foi realizada para sinterizar amostras com diferentes densidades à mesma velocidade de aquecimento, enquanto o forno de batelada foi usado para simular um ciclo de sinterização industrial e resfriar rapidamente as amostras a partir de diferentes temperaturas e congelar a microestrutura àquelas condições. Assim, são apresentadas dilatometrias com diferentes densidades e velocidades de aquecimento, análises de DTA com diferentes densidades e a evolução microestrutural durante o ciclo de sinterização. As peças sinterizadas no forno industrial tiveram suas dimensões medidas e as influências da densidade, temperatura de sinterização e da velocidade de passagem por dentro do forno na variação dimensional final são reportadas.

Os resultados obtidos mostram que o ciclo de sinterização, a geometria da peça e a densidade a verde afetam a evolução microestrutural, a resistência e a variação dimensional (que é

anisotrópica). A resistência mecânica usual é facilmente obtida, mostrando que a precisão dimensional deve ser o foco do controle de processo. Por outro lado os experimentos mostraram que é possível atingir bons resultados pela otimização do ciclo de sinterização e da densidade a verde.

## ABSTRACT

The production of self-lubricating bearings with good performance is the target of all manufactures of this product. The major requirements are homogeneous microstructure, high strength and dimensional accuracy.

In this dissertation, a self-lubricating bronze bearing alloy and different part geometries were studied with the intention of understanding its microestructural and dimensional behaviour. during industrial sintering conditions. The elemental mixes were made in a "Y" mixer, and the parts were sintered in a push-pull industrial furnace. Some compacts were also sintered in a batch furnace, a dilatometer, and a DTA analyzer with the intention of understandig the reactions that occurred during heating and sintering.

The sintering on dilatometer was conducted with different densities and heating rates. The DTA was used to sinter specimens with diferent densities at the same heating rate and the batch furnace was used to simulate an industrial cycle and quench the especimens from different temperatures and freeze the microestructure of those conditions. So, dilatometries at diferent densities, heating rates, DTA with different densities and the microestructural evolution during the industrial sintering cycle are presented. The parts sintered in the industrial furnace had their dimensions measured and the influence of density, temperature and velocity of passing through the furnace on final dimensional change is reported.

The results obtained showed that the sintering cycle, part geometry and density affected the microestructural evolution, strength and dimensional variation (which is anisotropic). The usual strength were easily obtained showing that the dimensional accuracy must be the focus of processing control. The experiments have shown that is possible to achieve optimum results by the optimization of the sintering cycle and part density.



## 1. INTRODUÇÃO

As buchas autolubrificantes começaram a ser fabricadas no início deste século e, desde a década de 20, são um dos tipos de produtos mais produzidos pela técnica de metalurgia do pó. Este tipo de componente envolve três segmentos de mercado: o de produtores de matérias primas, o de produtores de buchas e os consumidores de mancais.

Os produtores de matérias-primas e de buchas têm como objetivo maior o atendimento dos requisitos exigidos pelo mercado consumidor visando o bom desempenho dos mesmos. O bom desempenho é, por sua vez, influenciado pela resistência mecânica (determinada pelo tipo de material e pela microestrutura), capacidade de lubrificação (determinada pela geometria e quantidade de poros e pelo tipo de óleo lubrificante) e precisão dimensional (determinada pelas características da matéria-prima e pelas condições de processamento). Desta forma, quando o consumidor fixa suas necessidades (características que atendam aos requisitos funcionais), ele está implicitamente determinando o tipo de liga e o seu estado final de processamento (porosidade e resistência mecânica). Resta então ao fabricante, mantendo estes requisitos, atingir as tolerâncias dimensionais especificadas. Assim, o segmento dos fabricantes de buchas busca a obtenção, a manutenção e a otimização das variações dimensionais ocorridas nas buchas durante a sua fabricação.

As variações dimensionais ocorridas durante o processamento se devem principalmente às características dos pós utilizados, geometria da peça, densidade a verde, tempo, temperatura de sinterização e velocidade de aquecimento. Além disso, o tipo e a quantidade de lubrificante sólido adicionado ao pó durante a mistura, o grau de oxidação superficial das partículas e o tipo de atmosfera de sinterização também têm sua influência nestas variações dimensionais.

Não há, na bibliografia consultada, documentação que possibilite a correlação das diversas condições de processamento a nível industrial, principalmente, no que se refere a matérias-primas nacionais. Neste sentido, este trabalho teve por objetivo o entendimento e a caracterização dos fenômenos envolvidos na sinterização de buchas autolubrificantes de bronze, principalmente quanto à variação dimensional, sob condições industriais de processamento.

Especificamente, procurou-se:

- 1) caracterizar a evolução microestrutural durante um ciclo de sinterização industrial;
- 2) caracterizar e evolução dimensional durante a sinterização sob condições industriais de diferentes geometrias de peças e
- 3) relacionar a evolução dimensional e a evolução microestrutural de forma a permitir o controle da variação dimensional através da atuação sobre os fenômenos de evolução microestrutural.

## **2. MANCAIS - GENERALIDADES SOBRE FORMAS, MATERIAIS, LUBRIFICAÇÃO E DIMENSIONAMENTO**

Conforme Shigley [01], lubrificante é qualquer substância que, quando colocada entre duas superfícies com movimento relativo, favorece os propósitos da lubrificação. Os objetivos da lubrificação consistem em reduzir o atrito, o desgaste e o aquecimento dos componentes que possuem movimento relativo em máquinas e equipamentos.

Os mancais são elementos de máquinas que possuem o objetivo de alojar um eixo (que se movimenta rotacionando ou oscilando) e de propiciar condições de funcionamento que minimizem o seu desgaste. Isto é possível através da mudança da condição de atrito pela formação de um filme lubrificante ou pela ação de rolamento. São considerados elementos de sacrifício, isto é, devem desgastar-se em detrimento do eixo.

Dentre as aplicações de mancais podem ser citados os virabrequins e bielas de motores automotivos, onde devem operar por milhares de quilômetros a altas temperaturas e sob variadas condições de funcionamento. Os mancais utilizados nas turbinas a vapor de usinas de geração de energia devem apresentar confiabilidade próxima de 100%. Por outro lado, existem muitas outras aplicações em que as cargas são baixas e sua falha não implica em custos elevados ou riscos sociais, tais como motores elétricos de baixa potência utilizados em eletrodomésticos. Nestes casos são utilizados mancais sinterizados autolubrificantes, mancais de nylon sem lubrificação, lubrificação por filmes sólidos ou até mesmo por graxa [01].

Os critérios para a escolha do tipo de mancal a ser utilizado devem considerar a carga a ser suportada, o tipo de solicitação (estática ou dinâmica), a velocidade de funcionamento, a rigidez necessária, a facilidade de manutenção e a confiabilidade. A Tabela 1 relaciona alguns tipos de mancais com seus respectivos mecanismos de lubrificação e aplicações.

Tabela 1 - Tipos de mancais, mecanismos de lubrificação e exemplos de aplicação [01].

Tipo de mancal	Mecanismo de lubrificação	Exemplo
de rolamento:	A lubrificação elastohidrodinâmica ocorre quando um lubrificante é colocado entre duas superfícies com contato de rolamento, como nos casos de mancais de rolamento ou engrenagens. Sua explicação matemática requer o uso da teoria de Hertz sobre tensões de contato e da mecânica dos fluidos.	Mancal de esferas, de rolos, de agulhas.
de deslizamento	com lubrificação hidrostática; A lubrificação hidrostática é obtida pela introdução de lubrificante, que pode ser óleo, água, ar ou outro fluido, dentro da área de carga do mancal, a uma pressão suficientemente alta para separar as superfícies com um filme de lubrificante. De forma diferente da lubrificação hidrodinâmica, o movimento de uma superfície em relação à outra não é necessário, o que permite a utilização de mancais com velocidades de deslizamento próximas a zero	a óleo, a ar, a água.
com lubrificação hidrodinâmica	Lubrificação hidrodinâmica tem por característica a separação das superfícies por um filme de lubrificante relativamente espesso com a finalidade de prevenir o contato metal-metal. A lubrificação hidrodinâmica não depende da introdução de lubrificante sob pressão, mas sim de um suprimento contínuo deste a todo instante. A estabilidade do filme de lubrificante pode ser explicada pelas leis da mecânica dos fluidos. A pressão do filme é criada pelo movimento da superfície, que move por si o lubrificante para dentro de uma zona em cunha, a velocidades suficientemente altas, para separar as superfícies contra a força de carregamento sobre o mancal.	Mancais atolubrificantes

No caso da área de suporte do mancal ser insuficiente, de uma queda na velocidade de funcionamento, de uma perda na quantidade de

lubrificante, que resulte em diminuição da viscosidade ocorre a lubrificação de contorno ou limite. Qualquer um destes ou vários fatores em conjunto contribuem para a não formação de um filme completo de lubrificante. Quando isto ocorre, as asperezas mais altas podem ser separadas por filmes de somente algumas vezes a espessura das moléculas de lubrificante. A mudança de lubrificação hidrodinâmica para lubrificação limite não ocorre de forma abrupta, mas sim de forma gradativa até que esta se torne predominante. Deve-se observar que nestes casos, a viscosidade do lubrificante perde importância para a sua composição química.

Quando mancais são utilizados em temperaturas elevadas, um filme de lubrificante sólido, tal como grafite ou bissulfeto de molibdênio ( $\text{MoS}_2$ ) pode ser usado. Nestes casos, os outros tipos de lubrificantes perdem sua eficiência por diminuição de viscosidade ou até mesmo por degradação.

## **2.1 BUCHAS AUTOLUBRIFICANTES SINTERIZADAS**

Uma bucha autolubrificante sinterizada, é definida como um componente metálico com porosidade controlada. Esta porosidade, que normalmente representa de 15% a 35% do volume da peça, tem a função de servir como reservatório de lubrificante. Estas buchas devem ainda possuir propriedades mecânicas que suportem os esforços a que são submetidos e dimensões controladas que permitam que o óleo absorvido e as folgas entre o eixo e o mancal conduzam ao estabelecimento de lubrificação hidrodinâmica eficiente.

O funcionamento de um mancal sinterizado em regime permanente é semelhante a um mancal hidrodinâmico, usinado a partir de um material sólido, diferindo somente na forma que o lubrificante é suprido à área de trabalho. Nas buchas sinterizadas, o lubrificante é contido no interior do material como resultado de uma impregnação. Nos mancais

convencionais, o lubrificante é suprido por meios mecânicos, tais como gotejamento, bombeamento em circuitos pressurizados ou spray.

### **2.1.1 VANTAGENS E LIMITAÇÕES**

Os mancais autolubrificantes são utilizados quando se procura facilidade de manutenção, eliminação da necessidade de constante alimentação com lubrificante e baixo nível de ruído. Entretanto, o que determina o seu uso é principalmente o baixo custo e a disponibilidade em uma ampla variedade de formas, tamanhos e materiais, fatores estes que possibilitam a satisfazer a maior parte das aplicações de baixa carga (pressões específicas de até 40 MPa)[02].

Devido ao fato da superfície do mancal ser porosa, é descartada a necessidade de canais de alimentação de lubrificantes no local de uso, bem como sua montagem em posições determinadas em função da direção de aplicação de carga ou solicitação do sistema. Também são eliminadas ranhuras e anéis de suprimento de lubrificante, bem como bicos de engraxamento, o que minimiza o problema de lubrificação em regiões de difícil acesso [03,04].

Uma vez que se tem uma "esponja metálica" como reservatório de óleo, o suprimento de lubrificante à região de trabalho é auto-regulado através da atuação de forças capilares e variação de temperatura, minimizando a fuga de lubrificante da região de trabalho, o que comumente ocorre com os outros tipos de sistemas de alimentação de lubrificantes em casos de falhas [05].

Outra vantagem dos mancais autolubrificantes sinterizados é a não necessidade de manutenção de sistemas auxiliares à lubrificação, tais como sistema de bombeamento de óleo ou dutos de transporte de lubrificante. Estes sistemas, em contrapartida, funcionam como "sumidouros" do calor gerado na operação, permitindo assim aos mancais sólidos, a possibilidade de funcionamento a mais altas velocidades.

Em desvantagem, os mancais autolubrificantes não são indicados para aplicações onde se necessita elevada capacidade de carga, pois o aumento da resistência mecânica requer uma diminuição na porosidade comprometendo a autolubrificação. Também a presença de poros reduz a dissipação de calor através da diminuição da condutividade térmica do material, o que eleva a temperatura de trabalho e pode vir a diminuir a viscosidade do lubrificante. Ainda, a usinagem dos materiais utilizados em buchas autolubrificantes sinterizadas é de extrema dificuldade, pois, quando feita de forma inadequada pode fechar a porosidade superficial e prejudicar o mecanismo de autolubrificação.

Além do exposto até aqui pode-se dizer que nos mancais convencionais o filme de lubrificante se forma depois dos mancais sinterizados sendo menos estável em condições estáticas. Ainda, nos mancais convencionais, a capacidade de carga aumenta com o aumento da velocidade de rotação do eixo, pois a energia gerada em excesso não é dissipada somente pelo atrito interno do lubrificante, mas também pela retirada do lubrificante da região de trabalho e pelos sistemas de circulação e bombeamento de óleo, o que mantém a temperatura do lubrificante dentro de limites aceitáveis.

Nos mancais sinterizados a capacidade de carga diminui com o aumento da rotação, pois esta leva a um maior aquecimento do óleo. Uma vez que o aumento na temperatura pode ser somente contido pela condução do calor através da região de alojamento do mancal, maiores velocidades de trabalho implicam em maior temperatura de funcionamento, o que leva a menores viscosidades e conseqüentemente a menores capacidades de carga (

Figura 1). Desta forma deve-se evitar o uso de alojamentos feitos de materiais com baixa condutividade térmica (ex.: plástico).

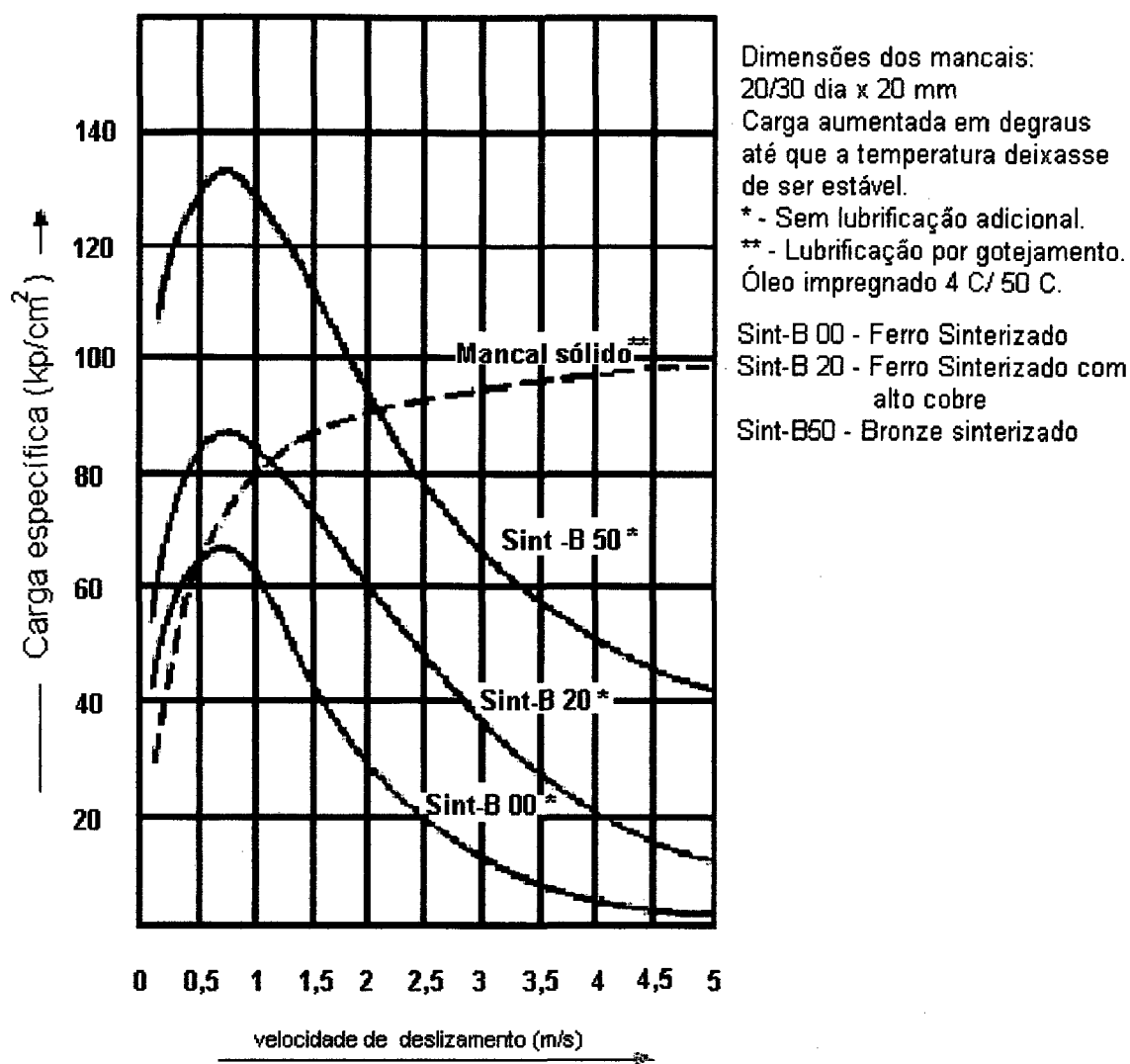


Figura 1 - Capacidade de carga em função da velocidade de deslizamento para mancais autolubrificantes sinterizados e mancais hidrodinâmicos convencionais [06] (as unidades do gráfico foram preservadas conforme a referência original).

### 2.1.2 FENÔMENOS ENVOLVIDOS NO FUNCIONAMENTO DE MANCAIS AUTOLUBRIFICANTES.

#### a) O mancal parado.

Embora os mancais sinterizados tenham se consolidado em muitas aplicações durante os anos, existem ainda controvérsias sobre os



processos de formação e manutenção do filme de lubrificante que ocorrem dentro deles.

Um mancal autolubrificante, quando parado, tem seu óleo liberado dos poros através da força capilar devida à folga entre o eixo e o mancal. O óleo é retirado dos poros até que as forças capilares decorrentes da folga e dos poros sejam equilibradas ( Figura 2). Desta forma, a folga de um mancal sinterizado parado está sempre lubrificada desde o ponto de menor folga até uma certa altura. Esta altura cresce com a diminuição da folga e com o aumento do diâmetro dos poros. Conforme observações, uma folga de 3 a 5 $\mu\text{m}$  é completamente preenchida com óleo. Ao contrário de outras teorias que defendem que o óleo fica totalmente armazenado nos poros quando o mancal está parado, o lubrificante presente na folga do mancal não retorna completamente para os poros após a parada do eixo, fazendo com que o filme lubrificante se forme mais rapidamente em mancais sinterizados do que em mancais sólidos [05].

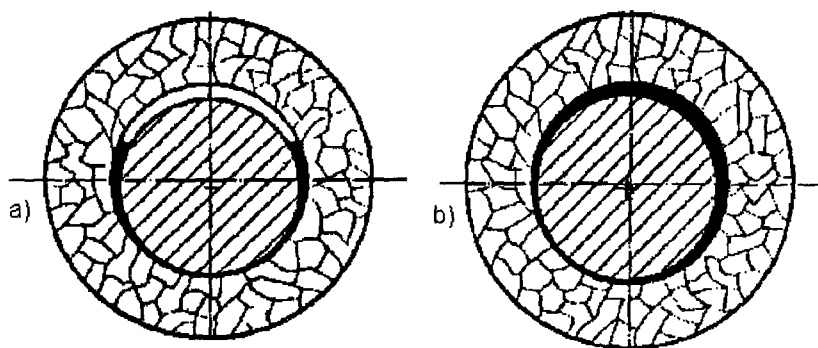


Figura 2 - Filme de lubrificante em mancais sinterizados.  
a) Em repouso; b) Em movimento.

#### b) O início do funcionamento

Durante os primeiros minutos de funcionamento ocorre a maior parte dos fenômenos de desgaste do mancal (desconsiderando condições anormais de funcionamento), por isso, o início do funcionamento de um mancal será detalhado a seguir, conforme [05].

Quando o eixo em um mancal é posto a girar pela primeira vez, o lubrificante presente na sua folga é movimentado pelo eixo e é formada a cunha de pressão que mantém o eixo separado da superfície do mancal.

Neste estágio inicial de operação as entradas dos poros estão abertas ao longo de toda a superfície de funcionamento. Desta forma, uma grande parte do óleo na região de pressão da folga do mancal é forçada para dentro dos “dutos porosos”. Ao mesmo tempo, uma pressão negativa ocorre no ponto de maior distância entre o eixo e o mancal, “sugando” o lubrificante para fora dos poros do mancal e jogando-o na folga.

Durante o início do funcionamento este óleo não é suficiente para repor completamente a fuga de lubrificante. Ocorrem então diversas condições de atrito, enquanto através do contato metálico entre o mancal e o eixo, a superfície de trabalho no lado carregado é deformada e as entradas dos poros são parcialmente fechadas. Como resultado, menos óleo “foge” e ao final do processo de início de funcionamento, o equilíbrio é alcançado entre o óleo que entra e o que sai da região de trabalho. Quando esta condição é alcançada, o mancal sinterizado funciona em regime hidrodinâmico, que fica mantido desde que a carga e a velocidade permaneçam inalteradas.

Em mancais autolubrificantes sinterizados o filme de lubrificante se forma em aproximadamente 0,02s após o início da operação, em comparação com 0,1s em mancais sólidos [05]. Com cargas mais altas, entretanto, verifica-se a superioridade dos mancais sólidos, o que se justifica pela maior área relativa que estes apresentam para o suporte da carga quando comparados aos mancais sinterizados. Dependendo da porosidade, a capacidade de carga do mancal sinterizado se situa entre 70 a 90% da capacidade de carga dos mancais sólidos.

Pode-se também observar que quando o atrito é medido após uma pequena parada e reinício de funcionamento, o valor do coeficiente de atrito, em velocidade constante, somente atinge o seu valor original novamente após alguns minutos. A quantidade de óleo presente na folga do mancal durante a paralisação permite uma melhor lubrificação em um curto espaço de tempo. Este processo, explica as boas propriedades de funcionamento de mancais sinterizados em operações intermitentes.

Um mancai metálico sinterizado alcança sua vida máxima quando as condições de funcionamento propiciam lubrificação hidrodinâmica. Se um mancai sinterizado funciona por um longo tempo em regime de atrito misto, deve-se esperar que o mancal e o eixo se desgastem, levando ao aumento da folga do mancal e ao conseqüente aumento do nível de ruído. Com o funcionamento contínuo nestas condições, os poros tendem a se fechar devido ao material abrasado, causando assim, a falha do mancal.

Em um mancal submetido ao regime de lubrificação hidrodinâmica, o aumento da carga provoca a quebra do filme de lubrificante, fazendo ocorrer novamente o atrito misto. Uma vez que a pressão do óleo também aumenta com o aumento da carga, o equilíbrio entre o óleo que entra e o que sai será redistribuído, permitindo que ocorra o contato metálico entre o eixo e o mancai, e ao conseqüente fechamento das entradas dos poros. Este processo continua até que uma nova condição de equilíbrio seja atingida. Durante o processo de início de funcionamento a temperatura do mancai é levemente aumentada devido ao atrito misto. Desta forma, a duração do período de início de funcionamento pode ser determinada através da medição da temperatura do mancal. Observações durante o processo de início de funcionamento de mancais sinterizados mostram que as condições ótimas de operação não devem ser esperadas logo após a montagem de um conjunto. Assim, o teste de um conjunto recém montado não deverá apresentar os melhores resultados. É prudente então testar conjuntos somente após completado o mínimo de 2 a 3 horas de funcionamento.

Verifica-se que, durante o início de funcionamento, em mancais sinterizados para os quais a carga é aumentada em “degraus”, alcançam-se altos valores de carregamento [07]. Entretanto, o que impede o uso destas cargas na prática é que o início de funcionamento dos mancais raramente ocorrerá nestas condições.

### c) Funcionamento em regime.

Com baixas velocidades de deslizamento, os poros no lado de maior pressão da região de trabalho fecham-se rapidamente, e então o óleo presente fica reduzido. Estudos referentes à capacidade de carga de mancais sinterizados mostraram que, com mancais autoalinhantes esféricos, com diâmetro de furo de 8 mm e carga de 6 MPa, foi atingida uma condição de lubrificação estável, a uma rotação de 60 rpm [05].

Com o aumento da velocidade, a pressão de óleo na folga do mancal aumenta. Ao mesmo tempo, devido ao aumento do trabalho do lubrificante, a temperatura do mancal aumenta, resultando na diminuição da viscosidade do óleo lubrificante. Então, mais óleo escoava através dos dutos porosos no lado pressurizado da região de trabalho. Por causa da maior pressão, e da menor viscosidade do lubrificante. Nestas condições pode ocorrer o atrito misto. Ainda, tal como em mancais metálicos sólidos, a capacidade de carga do filme de lubrificante é prejudicada pela diminuição da viscosidade. Tudo isto também explica porque mancais sinterizados somente podem ser utilizados com cargas relativamente baixas, a velocidades altas, quando comparados com mancais sólidos.

Durante a operação de um mancal sinterizado ocorrem perdas de óleo como resultado de centrifugação e evaporação. Como consequência, quando aproximadamente 2/3 de sua reserva de óleo original é perdida, eles se tornam inviáveis para o uso. A vida do mancal pode, então, ser aumentada através do suprimento extra de óleo a partir de um reservatório. Perdas como resultado da ação centrífuga podem ser reduzidas por algumas precauções construtivas tais como o uso de chanfros maiores nas bordas, colocação de chapas de proteção, arruelas elásticas, e feltros retentores, para provocar a realimentação do óleo. Na prática existem várias formas de acumular óleo para prover lubrificação completa. São exemplos: feltros impregnados com óleo; graxas absorventes; fibras expandidas impregnadas com óleo e metais sinterizados com alta porosidade.

## 2.2 TIPOS DE BUCHAS AUTOLUBRIFICANTES

As buchas autolubrificantes são caracterizadas por diversos fatores; os principais são: a geometria, o material, e a resistência mecânica (porosidade).

### 2.2.1 FORMA DAS BUCHAS AUTOLUBRIFICANTES

As buchas autolubrificantes podem assumir diferentes geometrias (Figura 3).



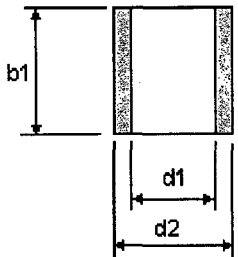
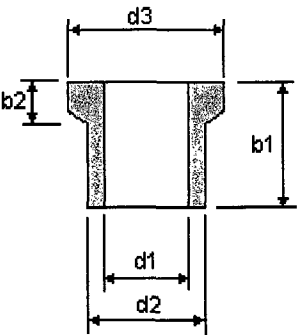
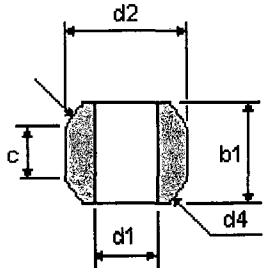
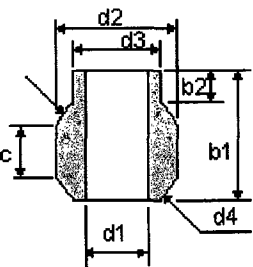
Figura 3- Formas diversas de componentes autolubrificantes [08].

Dentre as diversas formas em que podem ser produzidos destacam-se as quatro abaixo:

- mancal cilíndrico;
- mancal esférico;
- mancal cilíndrico flangeado;
- mancal esférico com pescoço.

Os critérios para a escolha do tipo de mancal mais adequado a uma aplicação específica passam pela necessidade de um fim de curso no sentido axial, necessidade de propriedades autoalinhantes, necessidade de área de apoio para o eixo e de maior quantidade de óleo para lubrificação. A Tabela 2 coloca os principais tipos de buchas autolubrificantes sinterizadas com suas dimensões e tolerâncias usuais.

Tabela 2 - Formas, dimensões e tolerâncias das buchas autolubrificantes [05].

Forma do mancal	características		
	<b>Buchas cilíndricas</b> dimensões em mm	<b>Tolerâncias            de fabricação</b>	
	d1	0,6 a 95	G7
	d2	2,5 a 110	r6
	b1	1 a 20	$\pm 0,1$ mm
	b1	20 a 95	$\pm 0,2$ mm
	Os cantos devem ser chanfrados a 45°		
	<b>Buchas cilíndricas com flange</b> dimensões em mm	<b>Tolerâncias            de fabricação</b>	
	d1	1.35 a 41	G7
	d2	3 a 50	r7
	d3	4 a 61	$\pm 0,1$ mm
	b1	1,9 a 20	$\pm 0,1$ mm
	b1	20 a 40	$\pm 0,2$ mm
	b2	0,5 a 10	$\pm 0,1$ mm
	Os cantos devem ser chanfrados a 45°		
	<b>Buchas esféricas autoalinhantes</b> dimensões em mm	<b>Tolerâncias            de fabricação</b>	
	d1	1,5 a 5	H6; casos esp. IT3
	d1	5 a 15	H6
	d2	3,2 a 28,5	$\pm 0,2$ mm
	d4	3,3, a 30	h11; $\pm 0,05$ mm
	b1	2,4 a 21	$\pm 0,1$ mm
	c	2 a 11	$\pm 0,1$ mm
	Os cantos devem ser chanfrados a 45°		
	<b>Buchas esféricas autoalinhantes com "pescoço"</b> dimensões em mm	<b>Tolerâncias            de fabricação</b>	
	d1	2 a 15	H6
	d2	4,1 a 24	$\pm 0,2$ mm
	d3	3 a 19	$\pm 0,05$ mm
	d4	4,2 a 25	h11; $\pm 0,05$ mm
	b1	3,3 a 21	$\pm 0,1$ mm
	b2	0,5 a 8,5	$\pm 0,1$ mm
	c	2 a 7,5	$\pm 0,1$ mm
	Os cantos devem ser chanfrados a 45°		

## 2.2.2 CARACTERÍSTICAS DE MATERIAIS PARA BUCHAS AUTOLUBRIFICANTES

Mosca [03] afirma que os materiais utilizados em mancais autolubrificantes são essencialmente baseados no bronze. Quando as condições de funcionamento permitem, ou seja, nos casos em que os requisitos tribológicos são menos críticos, é possível utilizar materiais mais baratos, tais como ferro, ferro-carbono ou bronze diluído com ferro.

Quando se considera o comportamento do mancai em funcionamento, deve-se levar em conta a distinção entre porosidade total (volume de poros referindo-se ao volume total do mancai) e porosidade interconectada (a fração da porosidade total que se comunica com a superfície), pois somente a porosidade interconectada pode ser impregnada com lubrificante, sendo que esta saturação não deve ser menor que 95%. A Tabela 3 mostra a relação usual entre a porosidade total e o seu respectivo percentual de porosidade interconectada.

Tabela 3- Relação entre porosidade total e interconectada [03].

porosidade total (%)	porosidade interconectada (%)
12.3-15.5	<15
15.5-18.7	>15
18.7-25.7	>18
25.7-36.5	>25

Os tipos de materiais podem ser classificados de diversas maneiras. Segundo a MPIF 35 [02] as definições são como apresentadas nos itens abaixo.

### a) Buchas de Bronze.

São ligas obtidas a partir dos elementos cobre e estanho. Bronzes para mancais são considerados de baixo grafite quando contêm 10% de estanho e até 0,3% de grafite (C). O bronze propicia boa resistência à corrosão, e com densidade da ordem de 6,4 g/cm<sup>3</sup> garante alguma ductilidade. Os mancais feitos deste material são utilizados em motores elétricos de baixa potência, máquinas de escritório, implementos



agrícolas, periféricos de computadores, máquinas ferramentas, etc. Com densidades mais altas ( $6,8 \text{ g/cm}^3$ ), o bronze é ainda mais dúctil e suporta cargas mais elevadas. Quando produzido com maiores densidades, os mancais guardam menos óleo e são utilizados em aplicações com mais baixas velocidades. Devido à sua resistência, tais materiais são usados como uma combinação de peça estrutural e mancai.

Uma bucha de bronze com médio teor de grafite contém de 0,5 a 1,8% de carbono. Estes mancais podem operar sob altas cargas, altas velocidades e sob condições de abrasão moderada.

Mancais de bronze contendo mais de 3% de grafite deslizam muito silenciosamente. Eles requerem menos lubrificação em campo e operam a mais altas temperaturas. São também utilizados em sistemas oscilantes e intermitentes.

Por um longo período as ligas de cobre mantiveram a posição inacessível em aplicações de mancais autolubrificantes. As razões para isto não são óbvias mas algumas possíveis causas são colocadas abaixo [09]:

1. O cobre forma uma camada oxidada protetora quando aquecido ao ar;
2. O cobre forma uma camada de sulfetos protetora quando em contato com óleos que contenham somente traços de compostos de enxofre;
3. O cobre possui uma alta condutividade térmica para a dissipação do calor gerado pelo atrito;
4. O estanho aumenta a resistência do cobre e o endurece suficientemente (comparável a aços não endurecidos);
5. As ligas de cobre apresentam, usualmente, estrutura cúbica de face centrada enquanto o par de atrito (em geral uma liga ferrosa), apresenta estrutura cúbica de corpo centrado. Esta diferença contribui para as propriedades anti-deformação das ligas de cobre contra as ligas de ferro.

#### b) Buchas de Ferro e Ferro-Carbono

Ferro puro a densidades entre 5,6 e 6,0 g/cm<sup>3</sup> pode ser utilizado como material de buchas autolubrificantes para cargas médias. Buchas de ferro são tipicamente mais duras e mais resistentes que as buchas de bronze 90/10 (90% Cu - 10% Sn). Combinando-se carbono com ferro obtém-se um mancal de aço, mais resistente que um mancal de ferro puro, e com uma maior resistência à ruptura radial, maior resistência ao desgaste e maior resistência à compressão. Por outro lado, perdem para mancais de bronze no que se refere à resistência ao desgaste e ao nível de ruído emitido durante o funcionamento.

#### c) Buchas de Ferro-Cobre

O cobre pode ser misturado ao ferro para o aumento da dureza e resistência final. Adições de cobre, de 2, 10 ou 20% em massa, são comuns. Com 20% de cobre, o material do mancal fica mais duro e mais resistente que o bronze 90/10, possuindo também boa resistência a carregamentos de impacto. Materiais desta classe são usados em aplicações que requerem a combinação de boas propriedades estruturais e características de lubrificação.

#### d) Buchas de Ferro-Cobre-Carbono

A adição de carbono em quantidades de 0,3 a 0,9% aumenta bastante a resistência do material ferro-cobre. Além disto, estes materiais podem ser tratados termicamente, de forma a oferecerem alta resistência ao desgaste e à compressão.

#### e) Buchas de Bronze "diluído"

O bronze pode ser "diluído" com ferro de 40 a 60% em massa, a fim de diminuir os custos da matéria prima. Estas buchas usualmente contêm 0,5 a 1,3% de grafite para auxiliar na lubrificação. Sendo assim, são sinterizados buscando-se a minimização do carbono combinado. São

usualmente utilizados em motores de baixa potência e suas aplicações. A ultrapassagem do valor máximo permitido de carbono dissolvido pode resultar em mancais excessivamente barulhentos e duros.

#### f) Buchas de Ferro-grafite

O ferro pode ser misturado ao grafite e sinterizado de forma a prover um baixa quantidade de carbono combinado. Com isto, a maior parte do grafite fica disponível para melhorar a lubrificação. Estes materiais possuem excelentes características de amortecimento que resultam em um funcionamento silencioso. Todos podem ser impregnados com óleo para autolubrificação. A ultrapassagem do limite máximo de dissolução de carbono, como no caso anterior, pode resultar em mancais excessivamente duros e barulhentos.

### **2.3 METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO DE MANCAIS AUTOLUBRIFICANTES SINTERIZADOS**

A metodologia de projeto de mancais autolubrificantes baseia-se em critérios objetivos (utilizando-se de curvas e relações de desempenho) e na experiência acumulada do projetista (p.ex., quanto à especificação de tipo de óleo a ser utilizado para um dado ambiente).

Neste capítulo, pretende-se documentar os critérios disponíveis na literatura, utilizando-se de um exemplo de dimensionamento.

Inicialmente deve-se dispor do tipo de aplicação a que o mancal será submetido, o que significa conhecer os requisitos de velocidade, carga de funcionamento, resistência à corrosão, nível de ruído e resistência à deformação.

No presente contexto será considerado o caso de dimensionamento de um mancal autolubrificante para um eixo de 10 mm (diâmetro interno do mancal) que deverá trabalhar a 1500 rpm submetido a uma carga radial de 410N, necessitando ainda de boa resistência à corrosão

(ambiente agressivo), à deformação (para diminuir o desgaste no início do funcionamento, quando o mancais ainda não atingiu o regime de lubrificação hidrodinâmica), e baixo nível de ruído.

### 2.3.1 ESCOLHA DO MATERIAL

Um resumo das propriedades dos materiais em função de sua composição química é dada na Tabela 4 [03].

Diante dos requisitos de resistência à corrosão, resistência à deformação e nível de ruído, o material adequado para tal aplicação consiste em uma liga com 90% de cobre, e 10% de estanho (Tabela 4). Segundo a MPIF 35 para buchas autolubrificantes, verifica-se que esta liga corresponde à CT - 1000.

A quantidade de poros presentes na bucha é resultante do material e das condições de processamento (pressão de compactação, temperatura e tempo de sinterização). A porosidade é, então, uma característica que deve ser escolhida de acordo com o tipo de material especificado e com a aplicação do mancal. Na Tabela 4, constata-se as diversas densidades passíveis de serem obtidas (sob condições industriais de processamento).

Levando em conta que as propriedades mecânicas (dureza aparente, resistência mecânica, etc) são função inversa da porosidade, após a escolha do tipo de material do mancal, o projetista em geral pode optar por faixas de densidade obtidas por variações no processamento do material. Esta variável determina então a quantidade de óleo capaz de ser armazenada e a resistência mecânica, de tal forma que sua escolha sempre é uma solução de compromisso entre uma boa lubrificação e uma alta resistência. Para o caso em questão, optou-se pela faixa intermediária de densidade uma vez que não foram fixados dados restritivos e levando em consideração também que a maior parte dos

casos práticos se encaixa dentro destes valores (6,4 - 6,8 g/cm<sup>3</sup>). Isto indica que o material próprio para a aplicação é o CT 1000- K26.

O lubrificante a ser utilizado deve ser escolhido de acordo com a porosidade do material, a carga agindo sobre o mancal, a vida esperada, as condições ambientais e o nível de ruído permitido. Os tipos e características de lubrificantes são descritos separadamente no apêndice I.

Tabela 4 - Materiais, composição química e propriedades de buchas autolubrificantes [03].

MATERIAL	COMP. QUÍMICA							CARACTER.				
	Fe	Cu	Sn	Carbono	Carb. comb.	Pb	Outros	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Fator K (N/mm <sup>2</sup> )	Resistência	Nível de Ruído	
Bronze				grafite				6,4	>120	E	B	B
		Bal.	9-11.00	<0,2			<3	6,8	>160	E	B	B
								7	>200	E	B	B
								6,4	>100	E	E	B
		Bal.	9-11.00	0,2-2			<1	6,8	>150	E	E	B
								7	>170	E	E	B
		Bal.	8-10.00	3-4.0			<3	6,4	>100	E	E	B
		BAL	<1				<3	5,9	>150	R	R	R
								6,2	>180	R	R	R
		BAL	1 - 5.0				<3	5,9	>160	R	R	M
Ferro								6,2	>190	R	R	M
		BAL	6 - 10.0			2 - 5.0	<3	5,9	>200	M	B	B
								6,2	>230	M	B	B
		BAL	2 - 4.0		1 - 2.0		<3	5,9	>100	R	M	M
								6,2	>150	R	M	M
		BAL	18 - 22		1.5 - 2.5	<0,5	<3	6,2	>140	B	B	M
Bronze/Ferro												
		15 - 20	68 - 72	7 - 9,0	0,5 - 1,5		<3	6,4	>120	B	B	B
		36 - 42	47 - 53	4 - 7,0	0,5 - 1,5		<3	6,2	>120	M	B	B
		45 - 50	50 - 55		0,5 - 1,5	<0,5	<3	5,9	>100	M	B	B
		56 - 60	32 - 36	3 - 7,0	0,5 - 1,5		<3	5,9	>100	R	B	B

\* para usos especiais

E = excelente

B = Bom

M = Médio

R = Ruim

### 2.3.2 DIMENSIONAMENTO QUANTO À CAPACIDADE DE CARGA

Uma questão usualmente colocada é quão severamente um mancal sinterizado pode ser carregado. Um procedimento absolutamente válido no sentido de dimensionar mancais autolubrificantes quanto à capacidade de carga não é possível, pois esta propriedade é decorrente de muitos fatores que estão fora do controle do fabricante, e de outros que por vezes, são impossíveis de ser previstos pelos projetistas.

Os diversos fatores que podem afetar a capacidade de carga de mancais sinterizados incluem a morfologia dos poros do material da bucha, a porosidade total, o tipo de lubrificante, o alinhamento de dois mancais entre si e entre o eixo, a folga do mancal, a qualidade da superfície, bem como a dureza do eixo [10]. Além disso, a dissipação de calor do mancal, as condições ambientais tais como a presença de poeira ou gases corrosivos, e o modo de operação (contínuo ou intermitente) também têm sua influência.

Os valores apresentados a seguir são uma orientação para projetistas que não dispõem de dados de ensaios nas condições de funcionamento específicas para as suas aplicações.

#### a) Capacidade de carga radial

Para um dado mancal, a capacidade de carga radial exprime o valor da intensidade de carregamento no sentido radial a que o eixo possa ser submetido e que o mancal possa suportar. Em mancais sinterizados o valor da carga se relaciona com a velocidade de rotação do eixo e define o produto PV.

A carga  $P$  [N] dividida pela área projetada [ $m^2$ ] do mancal nos dá a sua característica de carga [Pa]. A velocidade ( $V$  [m/s]) é a velocidade relativa de um ponto externo do eixo e um interno da bucha. Para um dado mancal, o produto PV é tido como uma função do material do mancal, do lubrificante e

do ambiente em que o sistema funciona. Quatro tipos de aspectos ambientais podem reduzir o produto PV de um mancais:

1. Aqueles que interferem na geração do filme de óleo lubrificante entre o eixo e a bucha. Exemplos são a baixa rotação, operação intermitente, superfície do eixo muito polida ou muito rugosa, vibração, eixos com problemas de circularidade, folgas excessivas, lubrificante insuficiente ou alta facilidade de deformação.
2. Aqueles que interferem na eficiência da retirada de calor do mancais. Exemplos que podem ser citados são os alojamentos de duchas com baixa condutividade térmica, falta de um dreno de calor próximo ou altas temperaturas do ambiente;
3. Aqueles que tendem a gerar perdas de energia por atrito acima do normal. Um exemplo deste tipo de causa é o uso de lubrificantes com alta viscosidade.
4. Aqueles que causam a distribuição não uniforme dos esforços. Por exemplo, o desalinhamento do eixo com o mancais, flexão do eixo; ou o uso de buchas com um grande comprimento em relação ao seu diâmetro.

No caso de buchas girando em torno de eixos estacionários, onde pode ocorrer a perda de lubrificante em função dos fenômenos decorrentes da força centrípeta, deve-se atentar para a reposição do óleo por lubrificação manual ou por feltros impregnados com óleo.

A Tabela 5 apresenta alguns valores de produto PV em função da velocidade de funcionamento e do material do mancais. Para o mancais em questão, a capacidade de carga pode ser obtida da Tabela 5 através do cruzamento da coluna da classificação do material escolhido (CT - 1000 - K26) com a linha da velocidade de funcionamento ( $V = \pi \cdot \text{Diâmetro [m]} \cdot \text{número de rotações por segundo}$ ). Daí, verifica-se que, para as condições de funcionamento propostas, este material possui capacidade de carga radial de 1,8 MPa.



Tabela 5- Capacidades típicas de carga (produtos PV de acordo com MPIF 35).

Carregamentos típicos	Capacidade de Carga (MPa) (produto PV)				
	CT-1000-K19	CT-1000-K26	CT-1000-K37	F-0000-K15	FC-1000-K23
velocidade do eixo em (m/s)					
mancai parado	39 máx	60 máx	79 máx	58 máx	106 máx
devagar e intermitente	23	28	32	25	56
0,13	14	14	13	13	21
0,25-0,51	3,9	3,5	3,2	2,8	4,9
0,51-0,76	2,6	2,3	2,1	1,7	2,8
0,76-1,02	2,0	1,8	1,6	1,2	2,1
1,02-2,54	PV=2,00	PV=1,80	PV=1,60	PV=1,25	PV=1,40
2,54-5,08	PV=2,15	-----	-----	-----	-----

onde: P = carga em MPa.

V = velocidade do eixo em m/s.

CT1000 - Cu 90% - Sn 10

F 0000 - Fe 100%

FC 1000 - Fe 90% Cu 10%

De posse da capacidade de carga é possível o cálculo da área útil do mancai, o que é feito como segue:  $A = F/P_{adm} = 410N/1,8MPa$ . Desta forma chega-se à área útil projetada do mancai como sendo  $A = 2,27 \cdot 10^{-4} m^2$ .

Considerando que o mancai deve possuir o diâmetro interno de 10 mm, o seu comprimento será  $L = 227 mm^2 / 10 mm$ . Daí,  $L = 22,7 mm$ .

Adicionando-se ao comprimento útil, dois chanfros de  $0.25 \times 45^\circ$  teremos o comprimento total:

$$L_{tot} = 22,7 + 2 \times 0.25 = 23.2 mm.$$

No caso de um mancai cilíndrico, o diâmetro externo deve ser da ordem de  $1,2 \cdot$  diâmetro interno. Além disso, para buchas de bronze, a relação entre o comprimento e a espessura de parede deve ser menor ou igual a 24, sendo que a espessura de parede deve ser de no mínimo 1mm [04]. Verifica-se que, pela relação proposta, o diâmetro externo deve ser de no mínimo 12mm, o que leva a uma espessura de parede de 1mm. Além disso, o comprimento total dividido pela espessura de parede resulta em 23,2, o que é coerente com a

relação proposta. Sendo assim, pode-se adotar o diâmetro externo como 13mm.

O mancal tem então dimensões de:  $D_{int}=10\text{mm}$ ,  $D_{ext}=13\text{mm}$  e  $L=23.2\text{mm}$ .

### 2.3.3 AJUSTES DE MONTAGEM

Buchas cilíndricas são usualmente instaladas por compressão axial e desta forma pressionadas para dentro de um alojamento. Para alojamentos rígidos o suficiente para não sofrerem distorção quando da montagem e para buchas com espessuras de parede de no mínimo 1/8 do diâmetro externo, são recomendados os ajustes da Tabela 6. Para o caso em análise, o ajuste de montagem deve estar entre 0,025mm e 0,08mm.

Tabela 6 - Ajustes de montagem recomendados para buchas cilíndricas [02].

Diâmetro externo (mm)	Ajuste de montagem (mm)	
	min.	máx.
até 19,30	0,025	0,08
19,30 a 38,35	0,038	0,10
38,35 a 63,75	0,051	0,13
63,75 a 76,45	0,051	0,15
acima de 76,45	0,051	0,18

É recomendado que no momento da montagem as buchas sejam introduzidas no alojamento com um macho no interior do seu furo para impedir o seu fechamento excessivo. Por exemplo, para um mancal com 19,05mm de diâmetro interno, o macho deve possuir aproximadamente 0,008mm acima da dimensão final desejada. O uso do macho é preferido em detrimento de um alargamento posterior em função deste provocar o fechamento dos poros superficiais do furo do mancal [04].

### 2.3.4 FOLGAS DE FUNCIONAMENTO - FOLGA DO MANCAL

Os mancais sinterizados propiciam estreitas tolerâncias e alta precisão de forma do furo, permitindo assim folgas pequenas. Quando associados a eixos de alta qualidade superficial oferecem baixo nível de ruído.

A prática mostra que a folga entre eixo e mancal deve ficar entre 0,05 e 0,15% do diâmetro do eixo mas não deve ser menor que  $3\mu\text{m}$  [04]. Uma folga pequena está associada a um maior atrito e, conseqüentemente, a um maior torque inicial. Além disso, maior calor de atrito é produzido e deve ser dissipado. Quando se procura obter baixo nível de ruído as folgas podem estar na faixa de 0,3 a 0,45% do diâmetro do eixo.

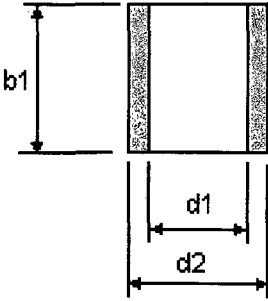
As folgas ideais de funcionamento de mancais autolubrificantes dependem das aplicações a que estes são submetidos. Somente as folgas mínimas para mancais autolubrificantes usados com eixos de aço retificado são listadas na Tabela 7. No presente caso, verifica-se que a folga mínima entre o eixo e o mancal deve ser de no mínimo 0,013mm.

Tabela 7 - Folgas mínimas de funcionamento.

Diâmetro externo (mm)	Folga mínima (mm)	
	a base de bronze	a base de ferro
até 19,30	0,013	0,025
19,30 a 38,35	0,025	0,038
38,35 a 63,75	0,038	0,051
acima 63,75	0,051	0,064

Pode-se concluir do procedimento anteriormente exposto que o mancal que satisfaz às condições propostas inicialmente deve ter as dimensões conforme a Tabela 8.

Tabela 8 - Características finais projetadas do mancai cilíndrico.

Mancai Cilíndrico	Características	
	Material: CT 1000-K26 (comp. quim: Cu-90%; Sn-10%; Densidade: 6,4 - 6,8 g/cm <sup>3</sup> )	
	Dimensões em mm	Tolerâncias de fabricação
d1	10	G7
d2	13	r6
b1	23,2	±0,1mm
Os cantos devem ter chanfros de 0,25X45°. Ajuste de montagem = 0,025 a 0,08 mm. Folga mínima entre eixo e mancal = 0,013mm.		

## 2.4 AVALIAÇÃO DE BUCHAS AUTOLUBRIFICANTES.

As buchas autolubrificantes são qualificadas de acordo com a quantidade de poros interconectados, densidade, resistência à ruptura radial e quantidade de óleo impregnada [11]. As formas de qualificação destas características são apresentadas a seguir.

### a) Impregnação com óleo

A estrutura de poros interconectados controlada permite a impregnação de buchas autolubrificantes com óleo, que provê ao mancai as propriedades autolubrificantes.

Para avaliar a quantidade de lubrificante impregnado em buchas autolubrificantes sinterizadas existem diversas, maneiras de, após a impregnação, retirá-lo da bucha e através da variação de massa concluir sobre a quantidade presente. Uma forma é a extração do lubrificante da bucha através de um banho de solvente submetido à ação de ultra-som, ou do uso de um equipamento próprio para forçar a passagem de um solvente por dentro dos poros conforme a ASTM B-328, ou ainda pelo aquecimento do material acima da temperatura de evaporação do lubrificante. De fato nenhum dos

métodos retira 100% do lubrificante impregnado, de tal forma que o método mais preciso seria a medição da variação da massa da bucha antes e depois da impregnação com óleo.

O conteúdo de óleo (Po) que representa o volume percentual da bucha que é preenchida com lubrificante durante a impregnação é calculado como segue:

$$Po (\%) = \frac{\text{massa de óleo} \times 100}{\text{volume da bucha} \times \text{densidade do óleo}} \quad (01)$$

#### b) Porosidade

A porosidade pode ser medida por técnicas de metalografia quantitativa, analisando-se imagens obtidas via microscopia ótica ou eletrônica, ou avaliada indiretamente pela medição da densidade. Existem ainda meios de medição que se utilizam das características de resistência à penetração ou passagem de um fluido por dentro dos poros, como é o caso da porosimetria de mercúrio. A porosidade é expressa em valores percentuais referindo-se ao complemento da densidade teórica do mesmo material sem poros.

#### c) Densidade

A densidade é a relação entre a massa e o volume do mancal. É expressa em quilogramas por metro cúbico ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ou, no caso de materiais sinterizados, de forma relativa à densidade teórica da liga. A densidade “seca” é a massa por unidade de volume de um mancal não impregnado com óleo, enquanto a densidade “úmida” é a massa por unidade de volume de um mancal impregnado.

Existem duas formas básicas de medir a densidade de um material. A primeira, geométrica, se baseia em medir a massa e as dimensões de uma amostra. Em seguida, o volume da amostra é calculado e é feita a razão entre massa e volume, de forma a obter o valor da densidade do material. Uma segunda maneira de calcular a densidade de um determinado material é a

partir do princípio de Arquimedes. O procedimento para este método está detalhadamente descrito na norma MPIF 42 [12].

**d) Resistência à ruptura radial**

Conforme a MPIF 35, a resistência à ruptura radial teórica de um mancal é uma função da constante de resistência “K” e de suas dimensões. Em buchas sinterizadas, a força de ruptura radial pode ser calculada como segue:

$$P = \frac{KLT^2}{D - T} \quad (02)$$

onde:

P = força de ruptura radial [N] (lbf);

D = Diâmetro externo do mancal [m] (pol);

T = Espessura de parede do mancal [m] (pol);

L = Comprimento do mancal [m] (pol);

K = Constante de resistência [Pa] (psi).

Notas:

- 1) Esta equação se torna inválida quando a espessura da parede do mancal ultrapassa 30% do seu diâmetro externo
- 2) Usualmente a constante de resistência K é expressa em unidades do sistema inglês, neste caso, para o seu cálculo são utilizadas as unidades entre parênteses.

### **3. METALURGIA DAS BUCHAS AUTOLUBRIFICANTES SINTERIZADAS**

#### **3.1 PRODUÇÃO DE BUCHAS AUTOLUBRIFICANTES SINTERIZADAS**

A produção de buchas autolubrificantes sinterizadas segue algumas etapas intrínsecas à metalurgia do pó e outras próprias do produto. Estas etapas são (Figura 4):

- 1. Mistura:** Buchas autolubrificantes podem ser produzidas a partir de misturas de pós elementares, pré-ligas ou ainda da mistura de pós elementares com pré-ligas. De qualquer maneira, para que seja mantida a integridade das partes das ferramentas de compactação, um lubrificante sólido deve ser adicionado ao pó (até 1% de estearato de zinco, estearato de lítio, acrawax ou outro) que será utilizado na fabricação das peças. Isto é feito em misturadores normalmente em forma de "Y" ou duplo cone. A mistura é feita por tempos determinados experimentalmente (em torno de 1h), de forma que se obtenha a máxima homogeneidade. É usual a utilização de óleos de baixa viscosidade (ex.: ISO 10) ou de querosene adicionado à mistura para evitar a segregação dos pós.
- 2. Compactação:** Feita a mistura, os pós são compactados em máquinas automáticas equipadas com matrizes rígidas com dois ou mais efeitos. As pressões de compactação utilizadas nesta etapa situam-se entre 100 e 400 MPa e são compactadas de 500 a 1200 peças por hora.
- 3. Sinterização:** Esta etapa é uma das principais responsáveis pela geração da microestrutura que será responsável pela resistência mecânica, nível de ruído, quantidade, forma e distribuição de poros na bucha. A sinterização de buchas de bronze normalmente é feita em um forno contínuo, sob ação de atmosfera redutora a temperaturas entre 750 e 850°C e por tempos que podem chegar a 30 minutos na zona de sinterização.

4. **Calibração:** A fim de corrigir as dimensões e atingir tolerâncias e forma requeridas, as buchas são deformadas plasticamente a frio. Neste ponto, deve-se atentar para o fato de que a deformação deve ser a menor possível, não devendo ultrapassar 3% linearmente, com o intuito de não comprometer a porosidade e conseqüentemente a capacidade de armazenamento de óleo do mancal.
5. **Impregnação:** As buchas calibradas são colocadas em um tanque no qual é feito vácuo (entre -0,1 e -0,5 bar) e em seguida enchido com o óleo a ser absorvido. Para facilitar a infiltração, o óleo pode ser aquecido. Durante a operação pode ser utilizada pressão igual ou superior à atmosférica, de forma a forçar ou acelerar a penetração do óleo nos poros do material. Com impregnação a vácuo a porosidade interconectada aberta é completamente preenchida com óleo. Após a infiltração as buchas estão supridas com o óleo que será utilizado durante o seu funcionamento.

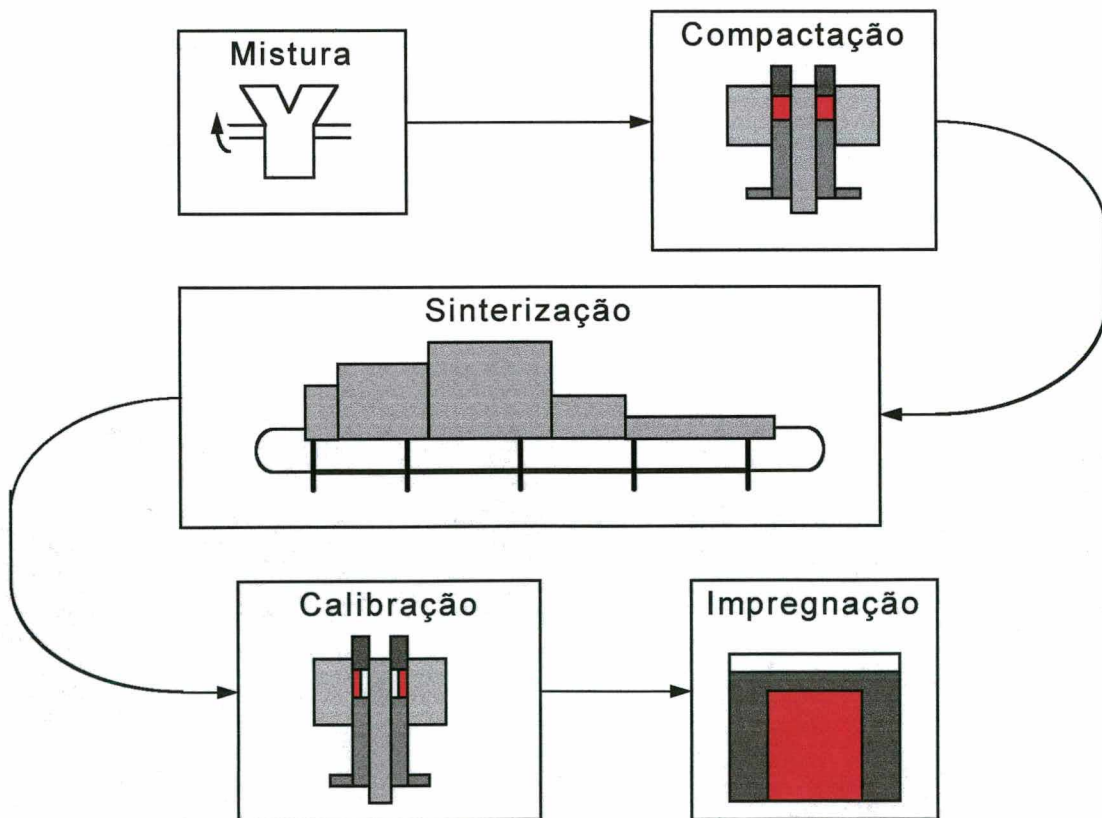


Figura 4 - Fluxograma do processo de fabricação de buchas autolubrificantes sinterizadas.



### 3.2 EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL DA LIGA Cu90/Sn10

A sinterização de misturas elementares de bronze 90/10, sob condições de equilíbrio, produzirá uma solução sólida de simetria cúbica de face centrada de estanho no cobre na forma de bronze- $\alpha$  [17]. No caso destas misturas elementares, durante a evolução da sinterização, algumas fases intermediárias são formadas antes que se atinja a condição final da microestrutura, que depende do tempo e da temperatura de sinterização, do percentual de estanho utilizado e das características dos pós da mistura. As fases intermediárias do sistema cobre/estanho possuem as características apresentadas na Tabela 9 [15, 12, 13].

Tabela 9 - Composição, estrutura e propriedades físicas das fases intermediárias do sistema cobre/estanho.

Fase	Fórmula	Simetria	Densidade(g/cm <sup>3</sup> )
$\beta$		ccc	-----
$\gamma$	$\gamma\text{Cu}_3\text{Sn}$	cfc	-----
$\delta$	$\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$	cu (ccc)	8,92
$\varepsilon$	$\text{Cu}_3\text{Sn}$	pseudohex.	8,82
$\zeta$	$\text{Cu}_{20}\text{Sn}_6$	trigon.	-----
$\eta$		desconhecida.	7,45
$\eta'$	$\text{Cu}_6\text{Sn}_5$	hexag.	-----

Embora a sinterização deste sistema venha sendo utilizada há algum tempo, o mecanismo preciso de evolução dos fenômenos que ali ocorrem não foi completamente entendido. Uma das razões para esta dificuldade de entendimento, é que o ciclo térmico de sinterização e de resfriamento é muito curto, e os fenômenos ocorrem a uma velocidade muito alta. Outra razão é a complexidade do sistema cobre/estanho e as diversas transformações de fases que ocorrem durante a sinterização. Além disso, o seu diagrama de

fases sofreu consideráveis modificações ao longo dos anos. Este diagrama em sua forma final é mostrado na Figura 5 [13].

A primeira reação a ocorrer é a fusão do estanho [14], entretanto há uma diversidade de opiniões sobre os estágios subsequentes. Existem duas linhas de pensamento. Uma defende a difusão do cobre no estanho formando várias fases intermediárias, cada qual se decompondo ou se transformando em fases menos ricas em estanho conforme a sinterização evolui. A outra corrente, defende que o estanho funde e se espalha, deixando para trás poros secundários com aproximadamente o mesmo tamanho e forma das partículas de estanho [15].

A sinterização do bronze pode ser analisada sob dois ângulos fundamentais. Um deles, através da evolução microestrutural durante a sinterização. Assim verifica-se indiretamente como evoluem as propriedades mecânicas, tribológicas e, por conseqüência, o desempenho. Por outro lado, existe também a evolução dimensional, que é responsável pela precisão do produto final e pela rigidez do processo de produção. Uma vez que também a forma de aplicação das informações diverge, os dois casos serão tratados como independentes, analisando se os mesmos separadamente.

A porosidade e a homogeneidade de composição da liga são fortemente dependentes da evolução da microestrutura que por sua vez está intimamente ligada ao mecanismo de escoamento do estanho quando de sua fusão durante o aquecimento e do estágio inicial da sinterização [16, 17, 18]. A interação destes fenômenos determina o estágio final da microestrutura em termos de tipo, forma e quantidade de poros e de fases no material, o que implica diretamente no desempenho do mancal.

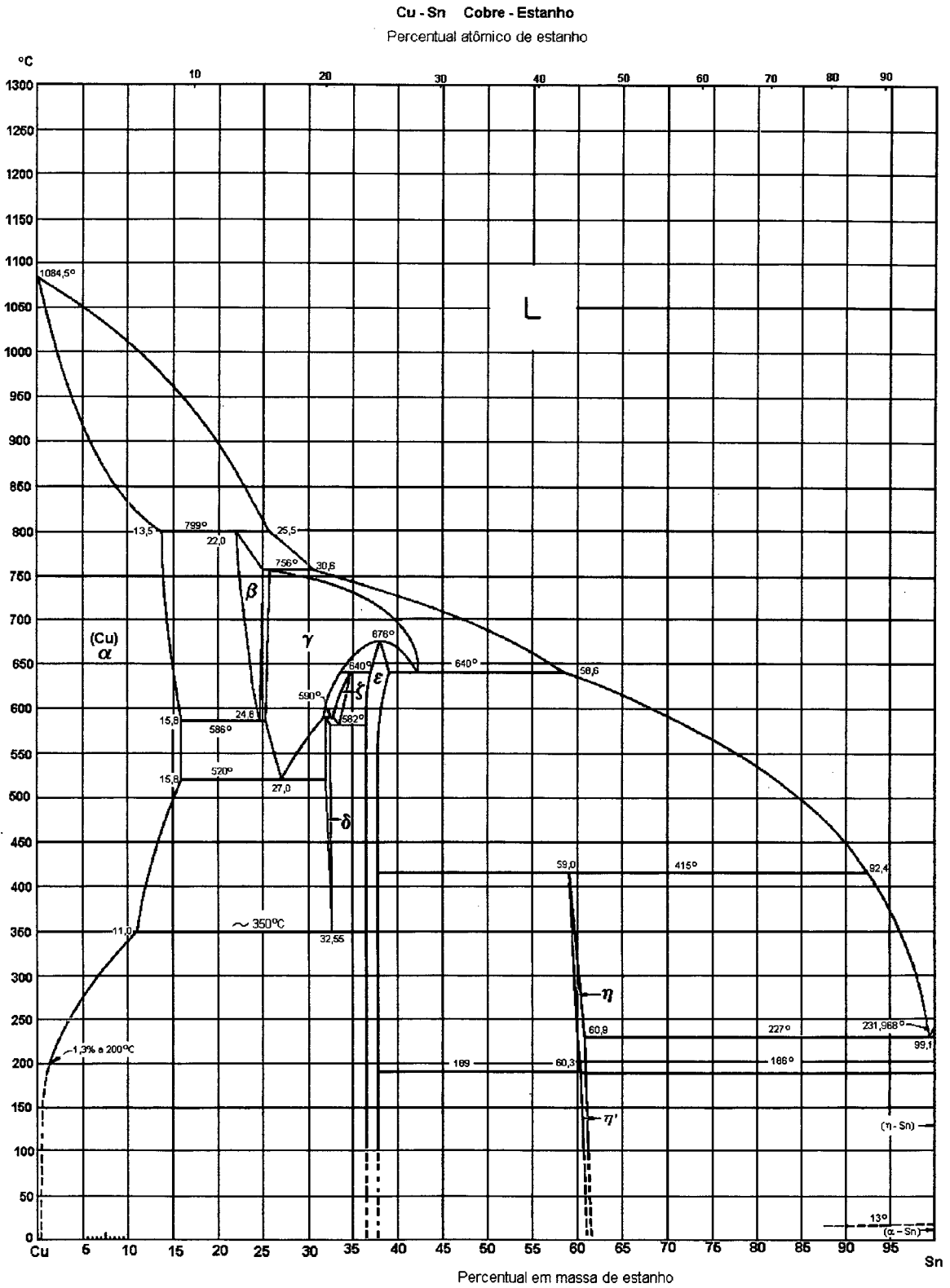


Figura 5 - Diagrama de fases do sistema Cobre/Estanho [13].

Sendo que os primeiros fenômenos que ocorrem na sinterização de misturas elementares de bronze são a fusão seguida pelo espalhamento do estanho, estes determinam toda a evolução dos fenômenos posteriores. Diante disso, qualquer que seja a forma de análise da evolução da sinterização, estes são os primeiros fenômenos a serem considerados.

Acharya et al [19] discutiram em detalhe o mecanismo de sinterização de compactados de bronze 90/10 com densidade de  $6,75 \text{ g/cm}^3$  e aquecidos a  $10 \text{ }^\circ\text{C/min}$ . Suas conclusões baseiam-se essencialmente no resultado de análises metalográficas e análises térmicas diferenciais. As atmosferas utilizadas foram  $\text{N}_2$  e vácuo. Nesse trabalho foi verificado que durante o aquecimento, ainda abaixo da temperatura de fusão do estanho ( $232^\circ\text{C}$ ), ocorreu a difusão do cobre para dentro das partículas desse material. Em amostras aquecidas a  $200^\circ\text{C}$  (por 1000 horas) verificou-se a difusão até que fosse formada a fase  $\epsilon$ . A difusão do estanho no cobre não foi observada, e após a formação da fase  $\epsilon$  ocorreu mais difusão no sentido do cobre para o estanho. Em decorrência, a fusão do Sn não ocorreu a  $232^\circ\text{C}$ , mas a temperaturas mais baixas, tendendo ao eutético de  $\eta + \text{Sn} \rightarrow \text{L}$  ( $227^\circ\text{C}$ ) (Figura 5).

Kim et al [20], sinterizaram bronze 90/10 com densidades entre  $6,4 \text{ g/cm}^3$  e  $7,4 \text{ g/cm}^3$  a diversas temperaturas por vários tempos. Em seus experimentos, o escoamento do estanho fundido esteve fortemente ligado à densidade a verde. Ficou constatado que a  $7,4 \text{ g/cm}^3$ , o escoamento do “fundido” rico em estanho ficou restrito e na sua periferia se formou a fase  $\eta$ , que por sua vez foi circundada por um anel de fase  $\epsilon$ . Nestes casos, não se verificou a indicação de qualquer escoamento ou difusão para dentro do compactado de cobre em regiões separadas daquelas onde o estanho se localizava. A uma média densidade a verde ( $6,9 \text{ g/cm}^3$ ), foi verificado algum escoamento do líquido formado para dentro dos capilares entre as partículas de cobre nas proximidades das partículas de estanho. Em densidades a verde baixas ( $6,4 \text{ g/cm}^3$ ), o líquido rico em estanho fluiu completamente, deixando

poros esféricos com aproximadamente o mesmo tamanho das partículas de estanho. O escoamento capilar do estanho aparentemente foi tão rápido que resultou em fases  $\eta$  e  $\varepsilon$  distribuídas quase uniformemente ao redor das partículas de cobre por toda a amostra.

Comparando as amostras com diferentes tamanhos médios de partícula de estanho, concluíram que o comportamento foi similar àquele anteriormente descrito. Concluíram então que o escoamento do líquido rico em estanho formado durante o aquecimento da liga 90Cu/10Sn obtida a partir de pós elementares depende basicamente da densidade a verde do compactado.

Após a fusão do estanho enriquecido com cobre, dendritas de fase  $\eta$  cresceram a partir do cobre em direção ao líquido, formando uma “casca” ao redor dos locais onde se situavam as partículas de Sn. A evolução das reações que ocorreram a partir do início da formação de  $\eta$ , conforme Acharya et al [19] é mostrada na Tabela 10.

Tabela 10 - Evolução dos fenômenos durante a sinterização do bronze a partir de misturas elementares segundo Achraia et al [19].

Temperatura	Fenômenos
330°C	Formação de $\varepsilon$ na interface de Cu/ $\eta$ .
370°C	Grandes áreas de $\varepsilon$ circundam $\eta$ . Verifica-se então grandes poros dentro de $\eta$ e microporos na interface de $\eta$ e $\varepsilon$ .
415°C	A maior parte de $\eta$ já se transformou em $\varepsilon$ e somente regiões com partículas de estanho muito grandes mostram a presença da reação peritética, onde novas dendritas de $\varepsilon$ crescem para dentro do líquido originário desta reação.
550°C	Verifica-se a formação de $\delta$ ao redor da fase $\varepsilon$ , e $\gamma$ aparece na interface cobre/ $\delta$ , que se forma pela difusão do cobre para dentro do estanho e não pela reação eutetóide ( $\alpha+\delta\rightarrow\gamma$ ).

595°C	$\delta$ e $\varepsilon$ reagem eutetoidalmente para formar $\zeta$ , temperatura a partir da qual não há mais $\delta$ para que ocorra a decomposição peritetóide $\delta \rightarrow \gamma + \zeta$ .
620°C	A morfologia dos poros muda e a recristalização do cobre "não reagido" resulta em linhas de maclas (annealing twins). A esta temperatura $\beta$ começa a se formar em regiões isoladas ao longo da interface cobre/ $\gamma$ devido à difusão de cobre para dentro de $\gamma$ .
644°C	Ocorre a decomposição peritética de $\zeta$ em $\varepsilon$ e $\gamma$ . A transformação de $\varepsilon$ em fases ricas em cobre é rápida e, a 676°C, não resta mais nenhum $\varepsilon$ no sistema para que ocorra a transformação congruente $\varepsilon \rightarrow \gamma$ .
700°C	$\beta$ começa a crescer. Além disso, a difusão do estanho de $\beta$ para o cobre também aumenta, enquanto o cobre continuou a se difundir para dentro de $\beta$ .
756°C	O líquido que se forma pela liquefação de $\gamma$ imediatamente solubiliza o cobre para formar $\beta$ . Isto leva ao aparecimento de poros nos pontos de reação. Com um aumento na temperatura, $\beta$ desaparece completamente deixando grandes poros.
880°C	Parte de $\alpha$ se funde. Este novo líquido densifica o compactado e os poros posteriormente se esferoidizam.

### 3.3 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PROCESSAMENTO NA EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL DO BRONZE OBTIDO A PARTIR DE MISTURAS DE PÓS ELEMENTARES

Cada variável, tal como conteúdo dos elementos na mistura, velocidade de aquecimento, distribuição do tamanho de partículas dos pós, grau de oxidação superficial dos pós, entre outras, influenciam na sinterização do bronze. A influência destas variáveis é discutida isoladamente a seguir, com base nos experimentos de Patel [15] e Acharya [17, 19, 21], de forma a permitir uma conclusão sobre o comportamento da sinterização diante de flutuações de processo e de matéria prima.

#### a) Influência do conteúdo de estanho na sinterização do bronze a partir de misturas de pós elementares

Segundo os experimentos de Acharya et al [21] no bronze com 10% de estanho, o aumento da quantidade deste elemento para 15% não altera o mecanismo de sinterização até 550°C, promovendo somente mais pontos de reação comparado com os casos onde se utilizou 10% deste elemento. A 550°C, porém, ocorre a sobreposição dos pontos de reação, e o processo de sinterização é impedido. Diferente do caso com 10% de Sn, não há heterogeneidade na fase  $\alpha$  a 810°C devido à grande quantidade de líquido permanente que se forma.

#### b) A influência da taxa de aquecimento

Quando as peças são aquecidas com menores taxas (ex. 5°C/min), há mais tempo para a interdifusão entre os componentes, e desta forma, as reações evoluem para estágios mais avançados. Comparado a taxas de aquecimento de 10°C/min, verifica-se que neste caso há maior formação de fase  $\eta$  antes que ocorra a fusão. Entretanto esta fase  $\eta$  rapidamente desaparece à medida que o cobre "difunde" para a mesma a fim de para

formar fase  $\varepsilon$  e, em seguida, fase  $\delta$ . Com velocidades de aquecimento de  $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$  a sinterização não é muito diferente daquela a  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

#### c) Influência da quantidade de óxido

O aumento do nível de óxido do cobre para em torno de 1,15% de perda em hidrogênio implica no retardo das reações. A formação das fases  $\eta$  e  $\varepsilon$  que é muito rápida em casos normais (sem oxidação), fica muito limitada. Ao invés disso, muito líquido permanece “não reagido” devido à barreira de óxido. Além disso, a sinterização da matriz de cobre também fica limitada por causa da quantidade excessiva de óxidos. As partículas de pó de cobre começam a recristalizar em torno de  $620^{\circ}\text{C}$  e em função da presença de óxidos ocorre a formação de poros extremamente finos na matriz. As reações evoluem de forma tão lenta que mesmo acima de  $810^{\circ}\text{C}$  ainda permanece cobre não reagido.

#### d) Influência do tamanho de partícula dos pós de cobre e estanho

A taxa de sinterização de um compactado com pós de cobre e estanho grossos ( $>100$  mesh) é baixa. Não somente o cobre tem que se difundir por distâncias maiores, mas cada partícula de estanho é grande o suficiente para dissolver mais cobre, e conseqüentemente sua saturação é retardada. Além disso, a área interfacial cobre/estanho é pequena.

Quando os compactados são feitos de cobre fino ( $<325\#$ ) e estanho grosso ( $>100\#$ ) a sinterização ocorre de forma similar ao caso anterior. A única diferença é o menor tamanho dos poros na matriz de cobre. A fase  $\eta$  que se forma após a fusão do estanho provavelmente fecha os canais no cobre, impedindo assim a infiltração do líquido nos canais capilares das partículas deste elemento.

Quando uma mistura de cobre fino e estanho fino é utilizada, a sinterização se desenvolve muito depressa. A formação das fases  $\eta$ ,  $\varepsilon$ ,  $\delta$  e  $\gamma$  é rápida, e uma pequena quantidade de fase  $\delta$  permanece para se dissociar em



fase  $\zeta$ , que de novo se transforma rapidamente. Quase toda a fase  $\gamma$  que se forma é coberta pela fase  $\beta$ , a maior parte da qual à temperatura correspondente, é transformada rapidamente em fase  $\alpha$  por difusão nos dois sentidos. Somente uma pequena quantidade de fase  $\beta$  permanece para fundir e esta é saturada por cobre para formar fase  $\alpha$ .

Quando pó de cobre grosso é utilizado com pó de estanho fino, os canais porosos no cobre são relativamente grandes, sendo por isso possível ao estanho líquido penetrar nestes por ação capilar. A camada de reação formada com o estanho tende a ser fina e é obtida mais cedo do que nos casos em que surge fase  $\eta$  sendo convertida rapidamente em  $\varepsilon$ . A fase  $\delta$  que se forma, com o aumento da temperatura não persiste por muito tempo, pois se transforma em fase  $\gamma$  como resultado da difusão do cobre para dentro de si. Por causa desta prematura transformação da fase  $\delta$  não há formação da fase  $\zeta$ . A formação de fase  $\beta$ , e então de fase  $\alpha$ , é também rápida, à medida a fase  $\gamma$  rapidamente desaparece. Uma pequena quantidade de fase  $\beta$  permanece e se liquefaz a 799°C.

A situação é ligeiramente diferente quando se utiliza pós de cobre e estanho grossos. Os canais porosos dentro do cobre são relativamente grandes, permitindo então ao líquido penetrar no cobre ainda que a fase  $\eta$  seja encontrada. Diferente do caso anterior, a quantidade de líquido que entra em um canal poroso é maior por causa do maior tamanho individual das partículas de estanho. Desta forma, a camada de penetração de estanho é mais grossa e as reações subseqüentes não ocorrem tão rapidamente quanto no caso anterior.

#### e) Influência da densidade a verde do compactado

Quando uma mistura de pós elementares de cobre/estanho é sinterizada sem estar compactada, o filme de óxido remanescente nas partículas permanece intacto e as reações são retardadas. Sendo assim, após a fusão

do Sn a formação de fase  $\eta$  é lenta, e a subsequente formação de fase  $\varepsilon$  mais ainda.

A situação é significativamente acelerada quando a compactação é feita a 100MPa atingindo 60% da densidade teórica. Em função da pequena densificação, é possível que os filmes de óxido em torno das partículas dos pós não quebrem completamente e se comportem como barreiras à penetração ou difusão. Como resultado, existem grandes e isoladas regiões de estanho líquido. Verifica-se que estas regiões com líquido rapidamente iniciam a dissolver (aprox. 394°C) o cobre a alta velocidade. Esta rápida dissolução do cobre é possível somente caso a camada de óxido de estanho se rompa. Uma vez que os canais porosos, neste caso, não são muito estreitos, o líquido formado penetra rapidamente, revestindo suas paredes. Isto ocorrendo, as reações subsequentes são rápidas.

Com a compactação a 90% da densidade teórica, os filmes de óxidos se rompem completamente e o contato entre as partículas de cobre e estanho é incrementado. Em consequência, o progresso das reações é acelerado especialmente a altas temperaturas.

### **3.4 EVOLUÇÃO DIMENSIONAL DURANTE A SINTERIZAÇÃO**

A sinterização de buchas normalmente é acompanhada de expansão, que é causada pela difusão da fase líquida de estanho para dentro da matriz de cobre, que acontece até que uma estrutura homogênea de fase  $\alpha$  de bronze 90/10 seja produzida.

As transformações de fase que ocorrem durante a sinterização da liga Cu-Sn são listadas em Patel [15] conforme a Tabela 11. Baseado na densidade das fases e na formação de fases líquidas, bem como nas transformações de fases líquidas em sólidas, é prevista a expansão ou encolhimento dos compactados de bronze.

Para que os fabricantes de buchas produzam produtos em conformidade com as especificações de seus clientes é necessário que estes sejam fabricados dentro de tolerâncias dimensionais bastante estreitas. Uma vez que os ferramentais de compactação são executados com dimensões fixas na direção radial, é necessário que no seu projeto seja prevista a variação dimensional que os compactados sofrerão durante a sinterização. Ainda, para que o ferramental projetado pelo fabricante de buchas seja utilizado de forma racional e econômica, os fabricantes de pós devem produzir matérias primas que quando misturadas e sinterizadas apresentem uma variação dimensional conhecida e estável de lote para lote. Ainda, para que tenham uma produção eficiente, os fabricantes de buchas devem controlar o seu processo para que as peças saiam com suas dimensões dentro das tolerâncias especificadas [10,14,22,23].

Tabela 11 - Efeito obtido na variação dimensional em função da temperatura e das reações em andamento segundo Patel [15].

Temperatura	Reação	Maior efeito
232°C	Sn (sólido)→Sn líquido	expansão
350°C	$\epsilon + \alpha \rightarrow \delta$	-----
415°C	$\eta \rightarrow \epsilon$	expansão
520 - 590°C	$\delta + \alpha \rightarrow \gamma$ , $\gamma + \alpha \rightarrow \beta$ $\delta + \epsilon \rightarrow \zeta$ , $\delta + \gamma \rightarrow \zeta$	Encolhimento Encolhimento
640°C	$\epsilon + L \rightarrow \gamma$ , $\zeta \rightarrow \epsilon + \gamma$	-----
676°C	$\epsilon \rightarrow \gamma$	-----
756°C	$\gamma \rightarrow \beta + L$	expansão
799°C	$\beta \rightarrow \alpha + L$	expansão

A evolução da variação dimensional em função da temperatura foi investigada por Patel [15] usando dilatometria e por Berry [24], que mediu as dimensões após o resfriamento à temperatura ambiente. Ainda, a variação

dimensional é afetada pela velocidade de aquecimento, densidade a verde dos compactados, quantidade e distribuição do tamanho de partículas dos pós formadores da liga e ponto de orvalho da atmosfera [25]. A variação dimensional ocorre em quatro estágios, conforme mostrado na Figura 6 e explicado na Tabela 12.

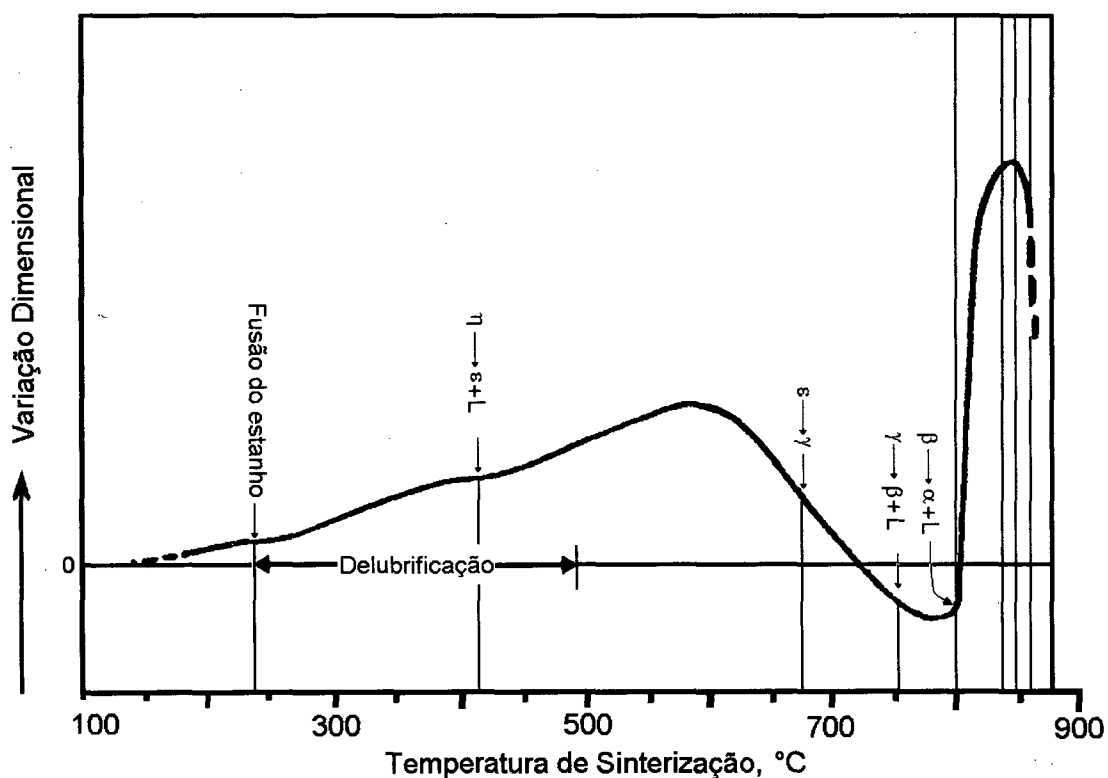


Figura 6 - Evolução dimensional de misturas elementares de Cobre/Estanho durante a sinterização.

A intensidade da variação dimensional que ocorre em cada estágio, particularmente o encolhimento e a expansão peritética, dependerá de diversos fatores, tais como a morfologia do pó de cobre, distribuição de tamanho de partícula dos pós de cobre e de estanho, presença de aditivos tais como lubrificantes e grafite e de filmes de óxidos, atmosfera de sinterização e ciclo de aquecimento [11, 16].

A variação dimensional é fundamentalmente depende da evolução das reações e transformações de fase que ocorrem durante a sinterização.

Aqueles fatores que de alguma forma afetam a seqüência de fenômenos que ocorrem no transcorrer da sinterização influem diretamente sobre a variação dimensional do compactado e, por conseqüência, também sobre a qualidade do produto final. Alguns destes fatores são detalhados a seguir:

1. Forma das partículas: Um pó formado por partículas porosas tenderá a produzir menor expansão em relação a outro pó de partículas sólidas e irregulares com a mesma distribuição de tamanho de partículas devido à maior energia superficial disponível para a sinterização.
2. Adição de grafite: O grafite aumenta a expansão, sendo que o grafite sintético aumenta mais ainda quando comparado ao grafite natural [24, 26]. Segundo Cheng et al [28], o grafite se apresenta como uma barreira física à sinterização, não aumentando a expansão, mas sim diminuindo a parcela de encolhimento da sinterização, produzindo maiores dimensões ao final da etapa de sinterização.
3. Potencial de redução da atmosfera: Patel [15] obteve maior expansão em amostras sinterizadas em atmosferas com maior teor de hidrogênio. Entretanto, à medida que diminuía a quantidade deste elemento na atmosfera, mais era ressaltado o pico de expansão peritético a 799°C. Garg et al [29], verificou que o aumento do teor de hidrogênio, dependendo dos tipos de pós utilizados na mistura, aumenta ou diminui a variação dimensional (bem como nas propriedades mecânicas) de forma sensível até teores de 10% de hidrogênio em misturas com nitrogênio. Na prática, durante o processamento industrial, verifica-se menor expansão em misturas elementares quando atmosferas de com menor teor de hidrogênio são utilizadas [24, 29].
4. Velocidade de aquecimento: Segundo Patel [15] e Peissker [36], devido às transformações de fase incompletas, a fase  $\beta$  é retida até a temperatura de transformação peritética quando se decompõe em fase  $\alpha$ +líquido. Todavia, Acharya [19] verificou que a fase  $\beta$  inicia sua decomposição mesmo abaixo desta temperatura. Neste ponto, a difusão do líquido rico em estanho para

dentro das partículas de cobre ocorre muito rapidamente. A solidificação rápida do líquido resulta na súbita expulsão do hidrogênio gasoso absorvido da atmosfera (rica neste elemento) causando 40% da expansão total. Os gases originalmente dissolvidos nos compactados (ou nas superfícies das partículas) causam outros 40% e os 20% restantes são atribuídos à formação de gases devidos à decomposição dos lubrificantes. Este fenômeno pode ser eliminado pela diminuição da velocidade de aquecimento, sinterização isotérmica logo abaixo da temperatura de transformação peritética e uso de partículas de cobre e estanho muito finas.

Tabela 12 - Evolução dimensional da sinterização em função da temperatura.

Temperatura	Fenômenos
230-650 °C	O lubrificante queima, o estanho funde e forma liga com o cobre, produzindo uma fase $\eta$ sólida; a 415 °C $\eta \rightarrow \epsilon + L$ causa maior formação de liga e segue com a expansão.
650-799 °C	Ocorre encolhimento pois não há mais fase líquida e as forças de sinterização predominam; também a fase $\eta$ presente se transforma em fase $\gamma$ , o que representa uma contração volumétrica. A transformação $\gamma \rightarrow \beta + L$ a 750 °C causa maior formação de liga e restringe o encolhimento.
799-820 °C	A transformação peritética $\beta \rightarrow \alpha + L$ ocorre; fases remanescentes ricas em estanho fundem, e a rápida formação de liga causam expansão e produzem bronze- $\alpha$ , quando a expansão alcança um pico.
> 820 °C	Ocorre encolhimento por coalescência de poros acompanhada por crescimento de grãos.

Em um sistema cobre-estanho, a reação de transformação peritética a 798 °C causa problemas em função da temperatura de sinterização industrial estar entre 800 e 840 °C. Variações no tamanho das peças, flutuações de temperatura no forno de sinterização, uniformidade da mistura, carregamento do forno, etc, podem produzir peças com variados graus de sinterização. Além da microestrutura heterogênea entre diversas peças, a

intensidade da expansão será diferente e dependerá do grau de “expansão anormal” devido à difusão incompleta do estanho no cobre.

1. Lubrificantes Sólidos adicionados à mistura: embora os lubrificantes sejam adicionados para prevenir o desgaste das ferramentas de compactação, eles podem influir fortemente sobre a variação dimensional de buchas de bronze obtidas a partir de misturas elementares (Tabela 13) [24].

Tabela 13 - Influência do tipo de lubrificante na variação dimensional de uma mistura obtida com os mesmos tipos de pós e sinterizadas sob as mesmas condições.

Lubrificante	Variação dimensional %
Sem lubrificante	+3,16
Ácido esteárico	+2,08
Estearato de Zinco	+1,41
Graxa de amido (amide wax)	+0,89
Kenolube	+0,67
Estearato de lítio	-1,00

Verifica-se que o lubrificante possui um efeito marcante na variação dimensional de sinterizados de bronze feitos de misturas elementares de Cu/Sn, acelerando a velocidade de formação da liga final. Apesar da utilização de hidrogênio na atmosfera de sinterização, Berry et al [24] verificaram que a amostra sem lubrificante apresentou a maior expansão. Isto é possível por que o produto da decomposição dos lubrificantes (metano e monóxido de carbono), são capazes de reduzir os óxidos de cobre da superfície das partículas com mais eficiência do que o hidrogênio, pois estes estão presentes nas superfícies das partículas, e enquanto o hidrogênio deve primeiro penetrar na matriz metálica através dos poros. Esta redução “precoce” dos óxidos de cobre pode incrementar a molhabilidade pelo estanho e propiciar o início da difusão a mais baixa temperatura.

Segundo o mesmo autor, a maior expansão devida ao ácido esteárico pode ser decorrente de sua mais baixa temperatura de decomposição. Em função de sua retirada da amostra a baixa temperatura, os produtos de sua evaporação são menos efetivos na redução dos óxidos. A maior expansão devida ao estearato de zinco pode ser função da interferência na difusão do estanho pelo óxido de zinco residual (15% em massa) [08]. Kenolube, que é uma mistura de graxa de amido e estearato de zinco em uma proporção de 4:1, apresenta um comportamento similar à da graxa de amido (Figura 7).

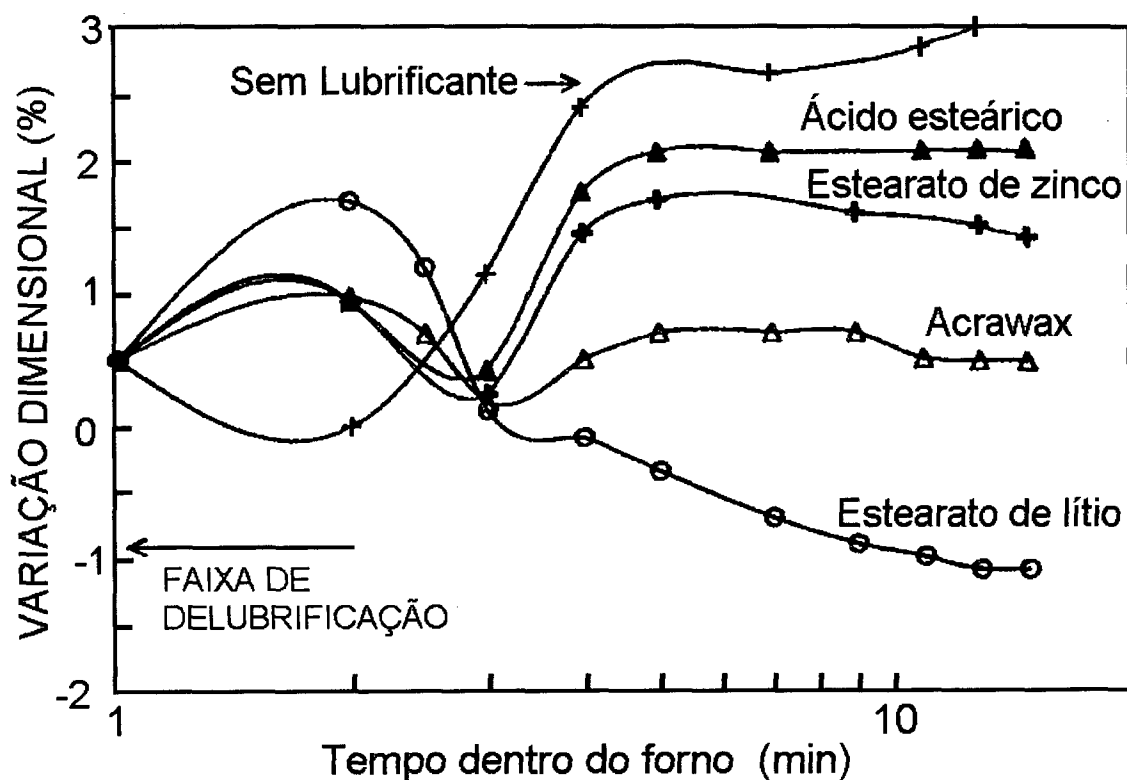


Figura 7- Evolução dimensional em função do tempo de sinterização para diversos tipos de lubrificante.



### 3.5 EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA

A resistência mecânica varia de forma mais acelerada do que a ductilidade, o que faz com que mesmo antes do material possuir alguma ductilidade, já possua resistência igual ou superior à resistência especificada (Figura 8). Isto gera problemas à medida que as normas ou os consumidores não especificam a ductilidade mínima desejada, fixando somente a resistência mecânica. Desta forma é possível que os fabricantes produzam buchas com microestrutura "sub-sinterizada" que apresentam diversas desvantagens. Uma vez que apresentam fases duras (ex.: fase  $\delta$ ) e ricas em estanho, sua usinabilidade fica prejudicada, sofrendo também efeito adverso da presença de agrupamentos de pequenos grãos (grain clusters) e de partículas de cobre puro. Para o fabricante também ocorrem problemas tais como o desgaste acelerado das ferramentas de calibração devido à baixa deformabilidade do material. Existem também evidências de que a vida útil do mancal é diminuída e o nível de ruído é aumentado por este tipo de estrutura [30]. Desta forma é de interesse do fabricante sinterizar o mancal à temperatura ideal para a obtenção da microestrutura ótima. Entretanto, uma estrutura uniforme com grãos grandes de bronze- $\alpha$  requerem um longo tempo no patamar (temperatura de pico de expansão) ou temperatura mais alta [31], sendo que ambas as condições tendem a propiciar uma perda do controle dimensional e da forma (por exemplo, o aparecimento de empenamento). Embora a sinterização à temperatura de pico de expansão seja um compromisso para a boa usinabilidade, estrutura e controle dimensional, muitas vezes a sinterização a temperaturas abaixo do ponto de máxima expansão é executada como meio de diminuir a variação dimensional, e propicia aquela anteriormente citada estrutura sub-sinterizada que acarretará os problemas já discutidos. Uma alternativa seria diminuir a velocidade da esteira [30], que no entanto, incorreria em uma queda de produtividade.

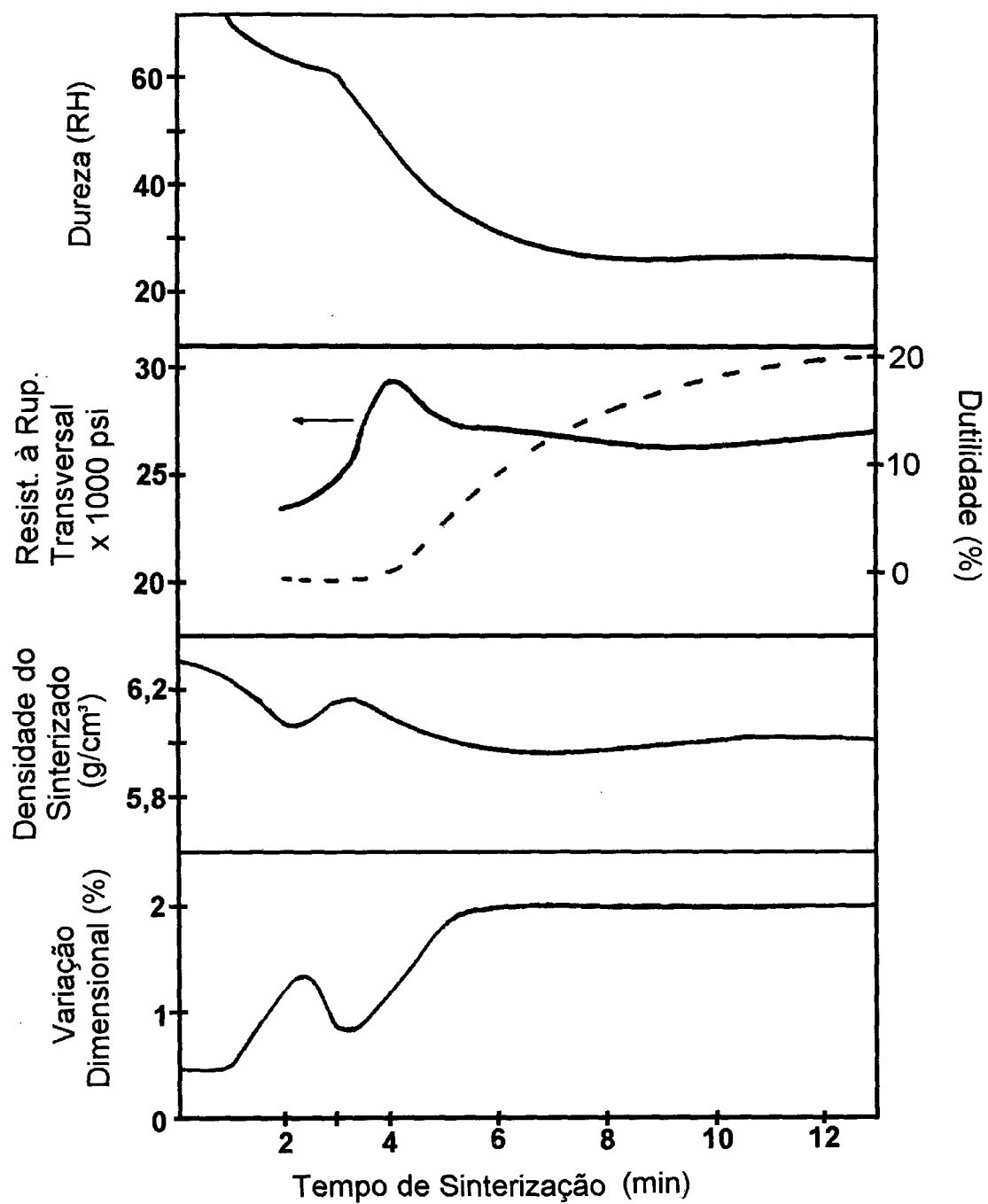


Figura 8- Evolução das propriedades mecânicas em função do tempo de sinterização [24].

### 3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme discutido até aqui, constata-se que o produto final da sinterização do bronze obtido de misturas de pós elementares é resultado das condições iniciais do compactado (densidade a verde, tipo de pó, etc) e da sinterização (velocidade de aquecimento, tipo de atmosfera, temperatura de sinterização, etc.), de tal forma que se verifica a atuação de inúmeras variáveis simultaneamente no processo. Durante a fabricação de buchas autolubrificantes usualmente surgem problemas que levam à obtenção de produtos não conformes, de tal forma que o produtor deve prontamente intervir no processo de maneira corretiva com o intuito de trazer o produto de volta à normalidade. A literatura registra um guia que tem o intuito de orientar o fabricante de buchas no sentido de localizar e corrigir as falhas que porventura ocorram. Este guia de solução de problemas encontra-se reproduzido na Tabela 14 [31].



#### 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A experimentação foi dividida em duas linhas bem definidas. A primeira, voltada para o entendimento do fenômeno de sinterização, e por isso, analisando o material em escala microscópica; e a segunda, voltada principalmente para a evolução dimensional, e então analisando os fenômenos macroscopicamente.

Para a abordagem da primeira linha, a sinterização foi acompanhada através de corpos de prova cilíndricos, sinterizados segundo um mesmo ciclo, que no entanto foi interrompido a diversas temperaturas (Figura 9). Estes corpos de prova foram posteriormente caracterizados microestruturalmente através de microscopia ótica e eletrônica. As análises de composição química executadas foram feitas com a ajuda de microsonda (EDS). A fim de complementar o estudo, foram realizadas dilatometrias em situações características de forma a extrapolar o entendimento dos fenômenos para outras velocidades de aquecimento. Em todos os casos, as condições de aquecimento e de sinterização foram sempre comparadas às industriais.

Os detalhes sobre condições de ensaio para cada ciclo são colocados nas seções que seguem.

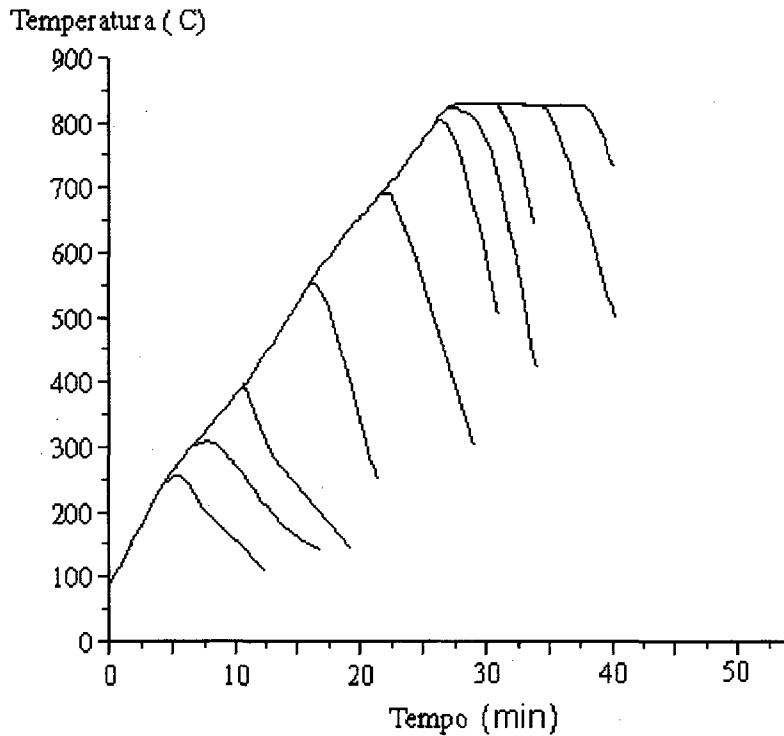


Figura 9 - Ciclos de sinterização em forno tubular.

No segundo caso, foram utilizadas peças reais, em condições industriais de processamento (tempo, temperatura e velocidade de aquecimento e atmosfera de sinterização). Neste caso, optou-se pela experimentação fatorial completa [32] em virtude da ausência de dados sistematizados relativos às condições industriais brasileiras. Ainda nesta etapa, o objetivo foi mantido na caracterização dos fenômenos, desviando da intenção de sua quantificação. A liga utilizada nos experimentos foi fixada de forma a diminuir o número de ensaios.

As condições analisadas estão relacionadas na Tabela 15.

Para cada ponto foram produzidas cinco amostras e o resultado reportado é a média dos valores encontrados.

Tabela 15 - variáveis ensaiadas e os respectivos números de níveis considerados.

Variável	Número de níveis
Atmosfera de sinterização	1
Mistura de pós (liga)	1
Lubrificante sólido	1
Densidade a verde	5
Temperatura de sinterização	6
Forma da peça	2
Tempo de carga	2
Total de experimentos	120

#### 4.1 CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS E METODOLOGIA DOS ENSAIOS

##### a) Liga utilizada

Em função da escassez de produtores de matéria prima no país, a maior parte dos fabricantes de componentes se serve dos mesmos tipos de pós, o que os leva a utilizar misturas semelhantes. A partir de uma breve pesquisa foi verificado que as matérias primas de maior uso na produção de buchas autolubrificantes são aquelas apresentadas na Tabela 16.

Para a análise das grandezas em estudo foram utilizadas as normas a seguir especificadas:

- Escoabilidade → MPIF 03 [33];
- Densidade aparente → MPIF 04 [34];
- Distribuição de tamanho de partículas → MPIF 05 [35].

Além das matérias primas mais utilizadas, verificou-se que a liga e o tipo de componente de maior uso são:

1. A liga de maior uso encontrada foi aquela composta por 89% de cobre, 10% de estanho e 1% de carbono, com as especificações conforme CTG - 1001 - k23 da MPIF 35;

2. Os componentes mais utilizados no estado de Santa Catarina e a configuração mais abrangente respectiva foram localizados como sendo os apresentados na Figura 10.

Tabela 16 - Tipos e características dos pós utilizados.

Material	Tipo	Fabricante	características
Cobre	PAM	Metalpó	Dens. ap = 3,95g/cm <sup>3</sup> Esc. = 29 s (hall) Distr. de tam. de part.: <325#(45µm) = 75% 325 - 250#(63µm) = 25%
Estanho	A - 80	CESBRA - Cia. Estanhífera do Brasil	Dens. ap = 2.63g/cm <sup>3</sup> Esc. =27 s (hall) Distr. de tam. de part. <325# (45µm) = 49% 250# (63µm)-325# = 27% 200# (75µm)-150# =12,5% 150# (106µm)-100# =11,5% 80# (180µm) - 100# = 2%
Grafite	FA - 2	Nacional Grafite SA.	
Est. de zinco		Estearina Paranaense S.A.	



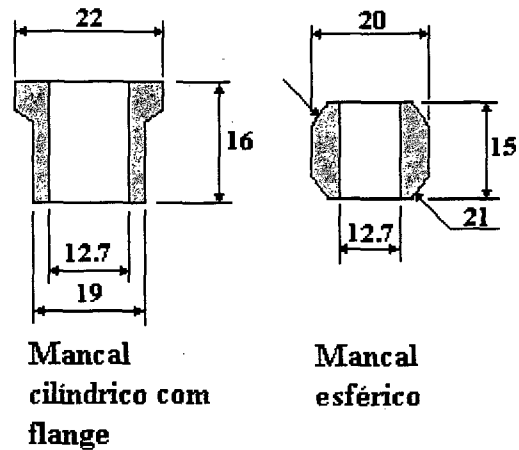


Figura 10 - Buchas utilizadas nos experimentos.

Em função destas constatações, a liga e as formas de peças utilizadas foram fixadas conforme o acima descrito.

#### b) Mistura dos pós

A mistura foi executada em um misturador em "Y", com capacidade para 40 kg de pó, a uma rotação de 30 rpm durante uma hora. Desta forma, todo o pó utilizado na compactação das peças foi misturado de uma só vez.

Para proteção das ferramentas de compactação foi utilizado 0,75% de estearato de zinco na mistura. Para corpos de prova a serem estudados via dilatometria, foi preparada uma batelada de pó sem estearato de zinco, a fim de não danificar o dilatômetro.

#### c) Compactação

As peças foram compactadas com densidades variando entre 6,2 e 7,0 g/cm<sup>3</sup> (densidade teórica = 8,78 g/cm<sup>3</sup>) com um incremento de 0,2 g/cm<sup>3</sup> entre cada densidade. A marca de 7,0 g/cm<sup>3</sup> não foi ultrapassada, pois além destes casos não serem normalmente utilizados na produção de buchas autolubrificantes, poderiam ocasionar problemas com o ferramental de compactação.

A compactação foi feita em prensas automáticas com regulagem da linha neutra de forma a manter as densidades distribuídas da mesma maneira nos dois tipos de peças. O controle da compactação foi feito através da medição da massa após a saída da matriz e medição das dimensões a verde do compactado. A dispersão de densidade nesta etapa foi mantida no máximo entre  $\pm 0,035 \text{ g/cm}^3$ .

Para a compactação dos corpos de prova para sinterização no forno tubular foi utilizada uma prensa manual e uma matriz cilíndrica com diâmetro de 10mm. Os pilotos foram compactados com alturas de aproximadamente  $8,5 \pm 0,1 \text{ mm}$  e a densidade foi mantida com uma dispersão de  $\pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ .

#### d) Sinterização

##### d.1) Sinterização em forno semi-contínuo.

A sinterização das peças foi conduzida em um forno semi-contínuo conforme esquematizado na Figura 11. A zona de pré-aquecimento foi mantida à temperatura constante de  $600^\circ\text{C}$ , enquanto que para a zona de sinterização foram utilizadas as temperaturas de 780, 800, 820, 830, 840 e  $850^\circ\text{C}$ .

Como atmosfera protetora foi utilizada uma mistura de  $\text{N}_2/\text{H}_2$  na proporção de 80%/20%, respectivamente, a fim de garantir a redução de possíveis óxidos durante a sinterização, que, conforme Garg et al [29], é mais do que o necessário para a redução de óxidos superficiais nas partículas dos pós da mistura.

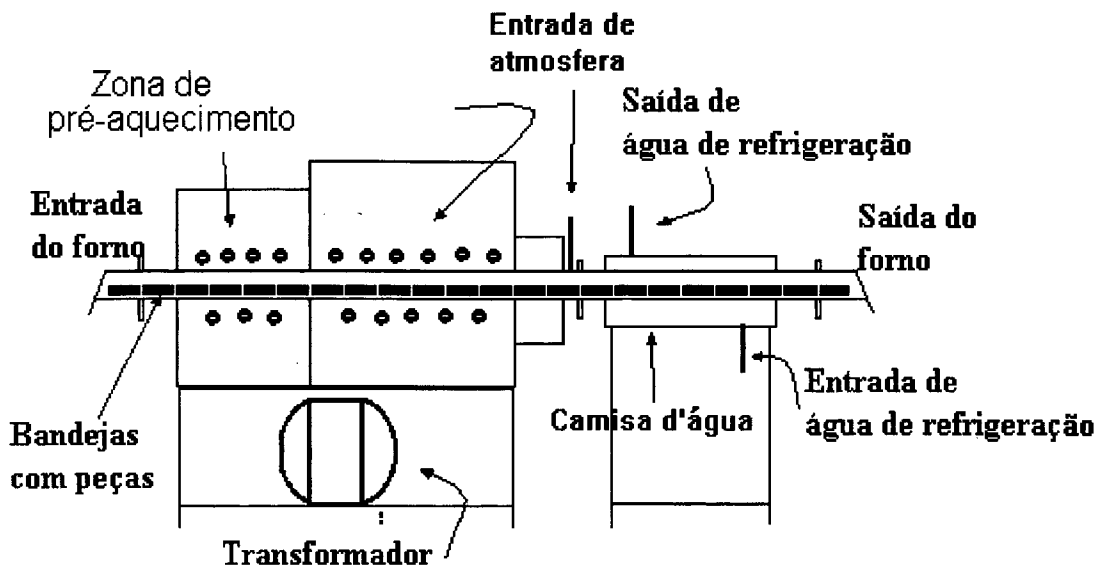


Figura 11 - Forno de sinterização com carga intermitente.

O forno de sinterização utilizado foi do tipo "push-pull" com o comprimento total de 3,1 m, com uma zona de pré-aquecimento de 0,6 m, e uma zona de sinterização de 0,9 m.

As bandejas com peças foram carregadas no forno em intervalos regulares chamados de tempo de carga. Dessa forma, a velocidade de aquecimento era variada através da mudança do tempo de carga, simulando assim, um efeito semelhante à mudança de velocidade da esteira de um forno contínuo. Os tempos de carga utilizados foram de 2 min e 3 min, representando uma condição de 12 e 18 minutos na zona de sinterização, respectivamente.

#### d.2) Sinterização em forno Tubular

A sinterização dos corpos de prova para rastreamento da evolução da sinterização foi executada em um forno tubular com taxa de aquecimento fixa, e controle de temperatura proporcional integral derivativo dentro da câmara. Neste caso a sinterização foi feita sob atmosfera de hidrogênio.

As peças foram aquecidas a 25°C/min até atingir um patamar de 830°C, onde foram mantidas por até 12 min.

A sinterização foi interrompida a 250, 300, 400, 550, 700, 800 e 830°C através do resfriamento rápido do tubo. O resfriamento foi executado puxando-se o tubo para fora do forno e acelerando o seu resfriamento com água.

#### d.3) Sinterização no dilatômetro

O dilatômetro foi utilizado para avaliar a evolução dimensional durante a sinterização a diversas taxas de aquecimento.

A atmosfera utilizada foi de hidrogênio, e as taxas de aquecimento foram 10, 20 e 50 °C/min. Além disso, foi variada a densidade a verde, sendo que as utilizadas foram 6,25 e 6,6 g/cm<sup>3</sup>. Vale lembrar que a liga utilizada não possuía estearato de zinco.

#### d.4) Sinterização em analisador térmico diferencial

Foram realizados ensaios de análise térmica diferencial com o objetivo de avaliar o comportamento dos fenômenos ocorridos durante o aquecimento da liga até a temperatura de sinterização. Para isto foram ensaiadas amostras com diferentes densidades (6,4 g/cm<sup>3</sup> e 6,7 g/cm<sup>3</sup>), que foram aquecidas sob atmosfera de argônio ultra-puro a 10°C/min até atingirem a temperatura de 900°C.

#### e) Coleta dos resultados decorrentes da sinterização em forno tipo push-pull - Análise dimensional

As peças foram medidas antes e depois da sinterização. Uma vez que o processo de compactação intrinsecamente gera gradientes de densidade ao longo da altura da peça, com certeza, considerando-se isoladamente cada ponto, ter-se-ia diferentes comportamentos de variação dimensional no sentido radial. Associando a tudo isso o fato deste trabalho envolver peças com diferentes formas, com gradientes de densidade em diferentes posições, devemos atentar para o cuidado com a comparação dos dados obtidos. Dessa

forma, para que fosse possível o relacionamento dos dados de um tipo de peça com os de outro, utilizou-se a variação dimensional no sentido da altura, o que retrata uma condição de variação dimensional média, convergindo com o fato da densidade utilizada para caracterizar as peças também o ser.

Deve-se notar, porém, que a variação tem comportamento anisotrópico. Para a caracterização destes casos, as buchas tiveram suas dimensões radiais (diâmetro externo e diâmetro interno) medidas em posições equivalentes. Como as condições de fornos e atmosferas também influem na variação dimensional, estes dados não devem ser considerados para projeto de ferramentas. Vale entretanto ressaltar que apesar dos valores diferirem quantitativamente, o fenômeno ocorre da mesma maneira, e sua análise é válida.

Quando a medição tinha por objetivo retratar a altura, foi somente avaliado um valor por peça. No caso do diâmetro foram tomados dois valores em posições defasadas de 90°.

#### f) Avaliação microestrutural

Para a análise microestrutural, as amostras foram lixadas até lixa grana 1000 e polidas em pano de polimento com pasta de diamante de 1 $\mu$ m. Após o polimento as amostras foram atacadas com uma solução aquosa de FeCl<sub>3</sub> e ácido nítrico por tempos que variaram de 5 a 15 segundos. Tanto a análise por microscopia ótica como por microscopia eletrônica foram efetuadas em amostras atacadas.

A microestrutura foi avaliada via microscopia ótica e eletrônica, sendo que neste último caso, principalmente para a verificação da evolução da sinterização, utilizou-se ainda a análise por microsonda. Todas as amostras foram preparadas metalograficamente pela mesma técnica de forma a manter consistência entre as análises.

**g) Medição da densidade e Resistência mecânica (ruptura radial).**

As duas grandezas em questão foram medidas conforme recomendado na MPIF 35 e MPIF 42, respectivamente. Neste caso, foi medida a densidade à seco.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL NA SINTERIZAÇÃO

#### a) Evolução da microestrutura ao longo do aquecimento.

Na figura 12, verifica-se a presença de partículas de cobre e de poros revestidos por uma camada acinzentada. Baseando-se em medidas de microsonda e no diagrama de equilíbrio Cu-Sn, tal figura revela que imediatamente após a fusão do estanho (232°C), ocorre espalhamento do líquido (Sn) e dissolução de cobre neste, formando rapidamente as fases  $\eta$  e  $\varepsilon$ . Nesta temperatura resta ainda líquido em alguns pontos isolados, conforme constatado pela morfologia da fase identificada (pela microsonda) como extremamente rica em estanho. Desta forma, constata-se a ocorrência de seis componentes microestruturais nesta etapa do aquecimento: cobre puro, fase  $\eta$ , fase  $\varepsilon$ , líquido rico em estanho, grafite e poros (primários e secundários).

A 300°C constata-se (Figura 13) a presença das fases  $\eta$  e  $\varepsilon$  (confirmadas pela microsonda). Além disso, através da microsonda constatou-se a presença de regiões com composição superior, em estanho, a da fase  $\eta$ , indicando haver ainda pequena quantidade de líquido presente nesta temperatura. A microestrutura evoluiu no sentido de formar maior quantidade de fase  $\varepsilon$  e poros nas interfaces  $\varepsilon/\text{Cu}$  e  $\varepsilon/\eta$ . Estes poros são formados por mecanismos de condensação de lacunas (porosidade Kirkendall) e contração volumétrica (aumento de densidade quando da formação das fases  $\varepsilon$  e  $\eta$  à medida que o líquido rico em estanho se enriquece com cobre).

Com a evolução do aquecimento, a 400°C, verifica-se maior quantidade ainda de fase  $\varepsilon$  (Figura 14). A região bifásica adjacente ao poro indica que havia presença de fase líquida na temperatura em questão (uma vez que não é termodinamicamente possível obter uma fase precipitada dentro de outra em par de difusão). Tal líquido, após o resfriamento, decompõe-se euteticamente gerando a região bifásica ( Sn e  $\eta$ ) na interface com o poro.

Os resultados das figuras anteriores indicam que a evolução da interface original Cu/Sn se dá na direção do centro das partículas de cobre, formando quantidades progressivamente maiores da fase  $\epsilon$ . Tal aspecto está em concordância com os resultados obtidos por Achaya [19].

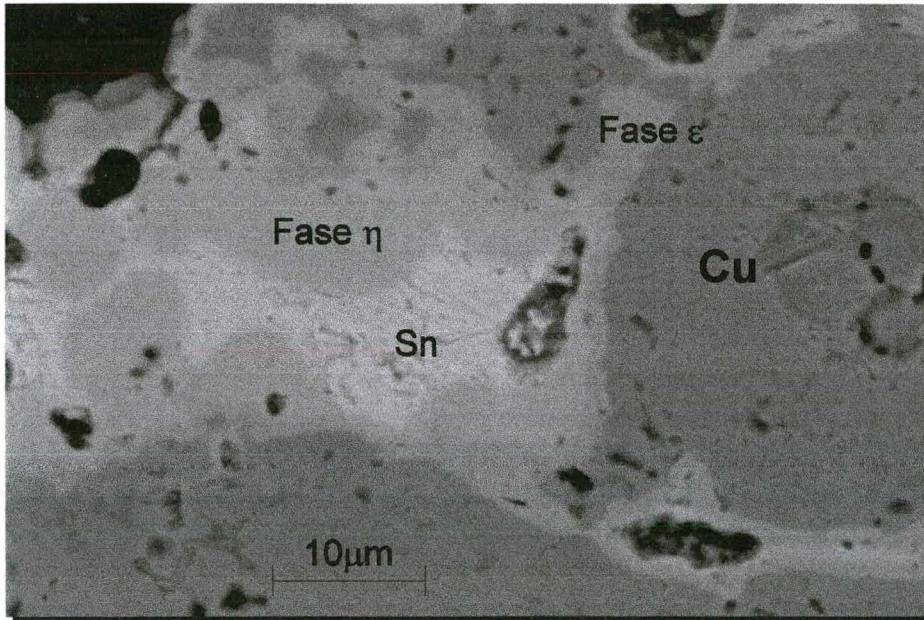


Figura 12 - Amostra aquecida a 250°C e resfriada a 50°C/min.

Na figura 15 constata-se presença de fase intermediária próxima aos poros, não tendo sido possível a identificação por microsonda de tal fase. Constata-se ainda uma região, adjacente à fase intermediária, formada por bronze (comprovação de microsonda) e também uma região central constituída de cobre. Tais características microestruturais, se confrontadas com as apresentadas na figura anterior, evidenciam que houve um retardo na cinética de interdifusão, uma vez que não houve redução significativa da quantidade da fase intermediária em relação à temperatura de 400°C. Esta diminuição da interdifusividade também é verificada por Patel [15].



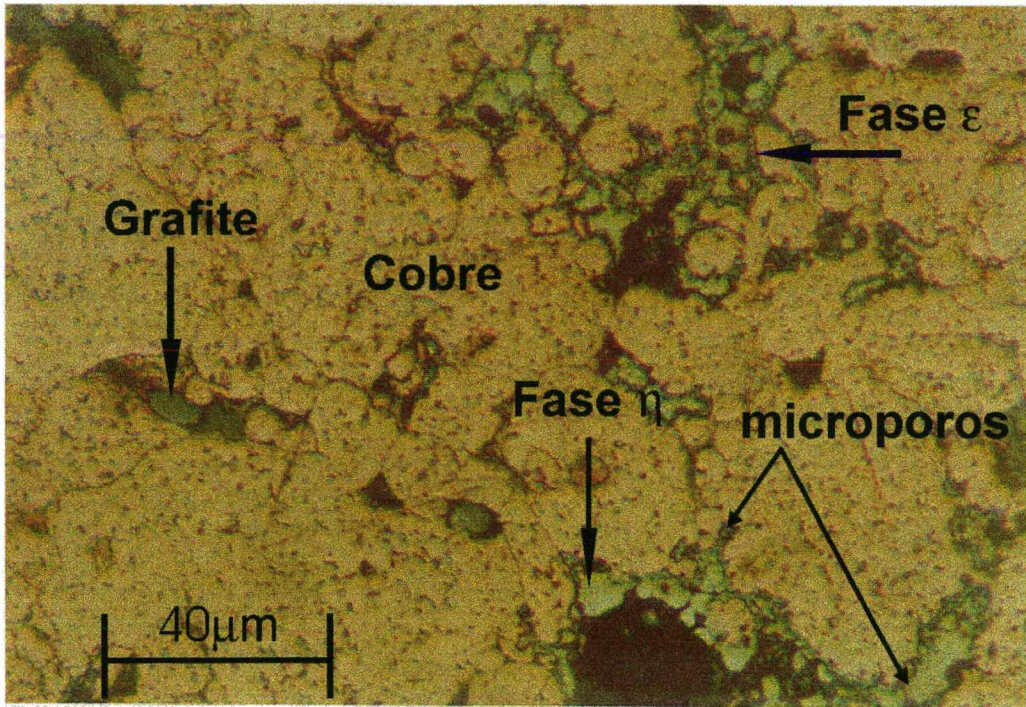


Figura 13 - Aquecimento até 300°C, resfriamento 50°C/min.

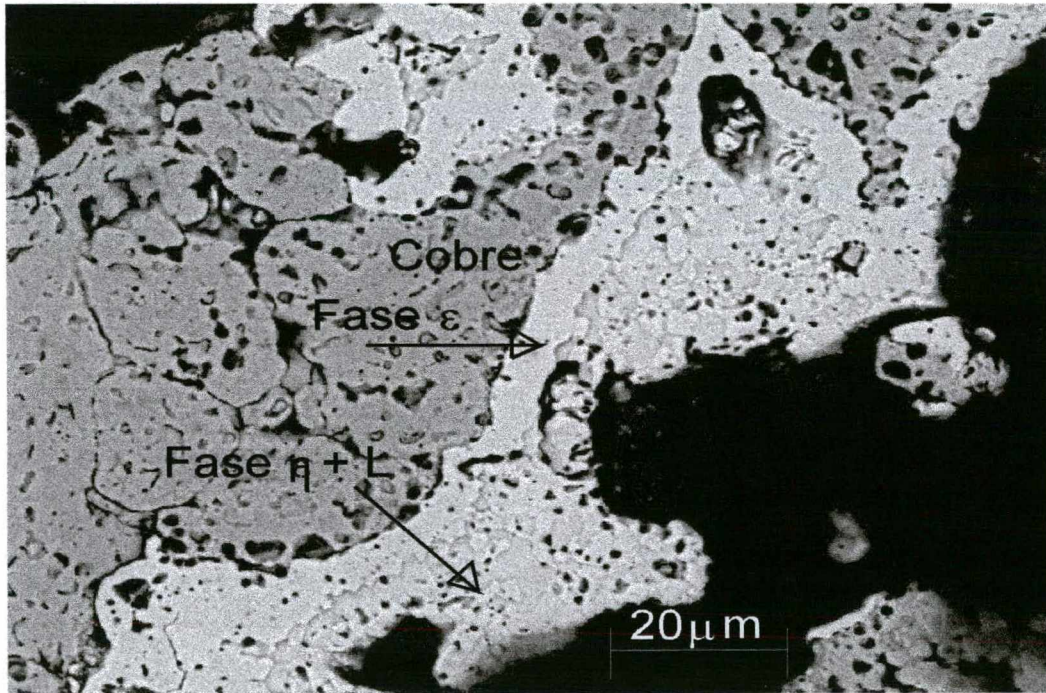


Figura 14 - Aquecimento a 400°C e resfriamento a 50°C/min. (Imagem obtida em MEV utilizando elétrons retro-espalhados)



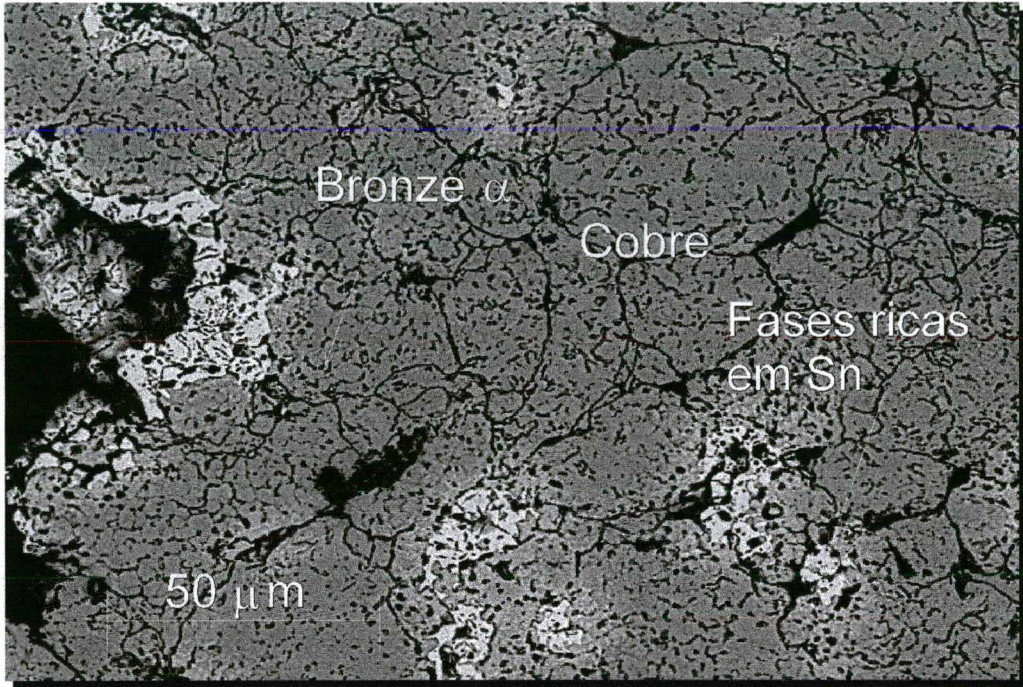


Figura 15 - Aquecimento a 550°C e resfriamento 50°C/min.

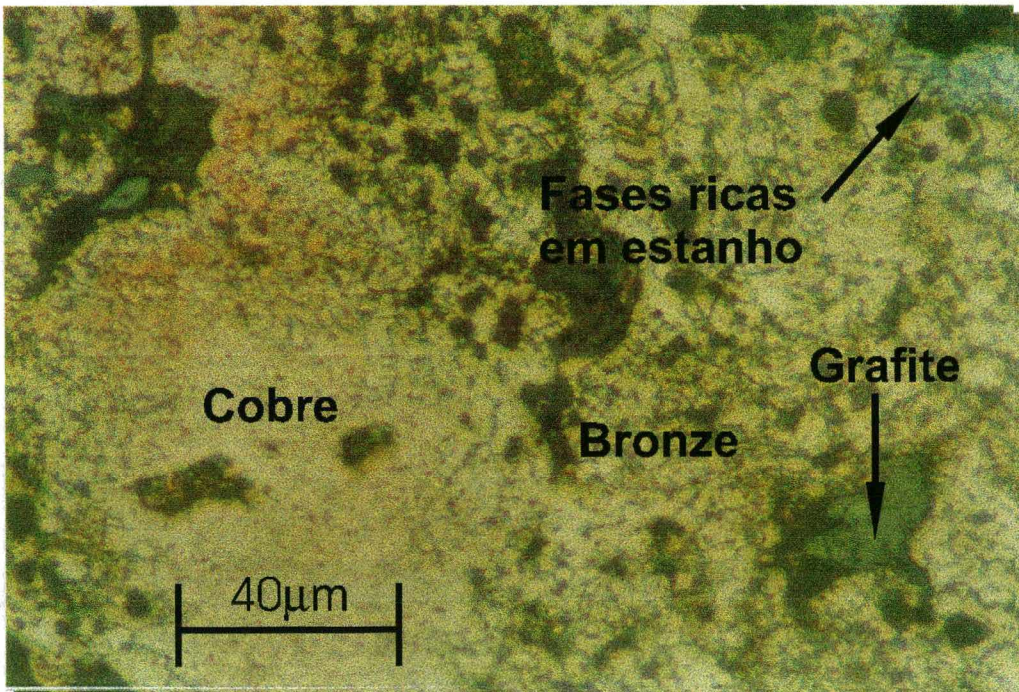


Figura 16 - Aquecimento a 700°C com resfriamento a 50°C/min.



A 700°C verifica-se (Figura 16) a existência de regiões adjacentes aos poros secundários com presença de fases intermediárias. Também não foi possível a identificação por microsonda da composição de tais fases.

Confrontando-se com o aspecto microestrutural da figura anterior (550°C), constata-se um redução da quantidade de tal fase, indicando progresso na interdifusão no sentido de maior homogeneização do material.

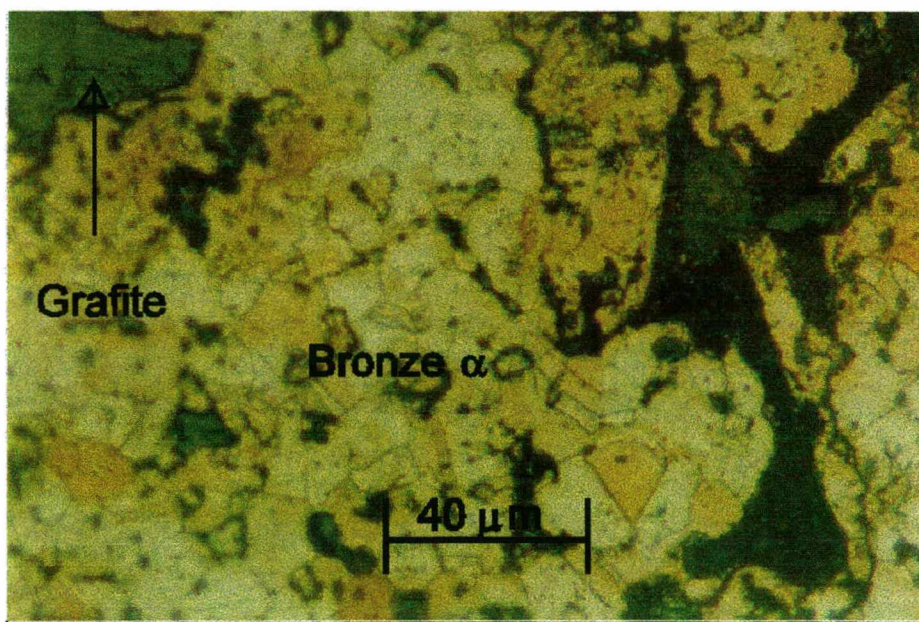


Figura 17- Amostra aquecida a 800°C e resfriada a 50°C/min.

Na figura 17 constata-se que, durante o aquecimento, até se atingir a temperatura de 800°C, o material não apresenta mais elevada quantidade de fase intermediária adjacente aos poros secundários. Todavia constatou-se a presença de resíduos de fase intermediária, em pequenas quantidades, conforme caracterizado na Figura 18. Tal resíduo é resultante da decomposição de fases ricas em estanho presentes em alta temperatura.

#### b) Evolução da microestrutura ao longo do patamar isotérmico

A microestrutura da amostra aquecida a 830°C por 1 min encontra-se na Figura 19. Observa-se menor quantidade de fase intermediária em relação à figura anterior (aquecimento a 800°C).



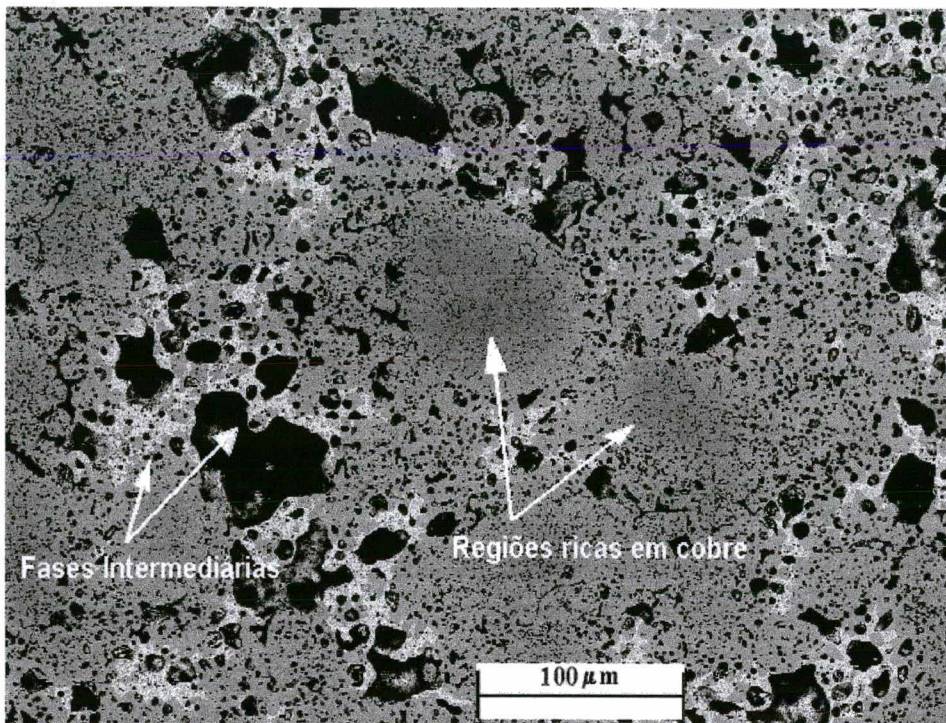


Figura 18- Amostra aquecida a 800°C e resfriada a 50°C/min.  
(imagem obtida em MEV com elétrons retro-espalhados)

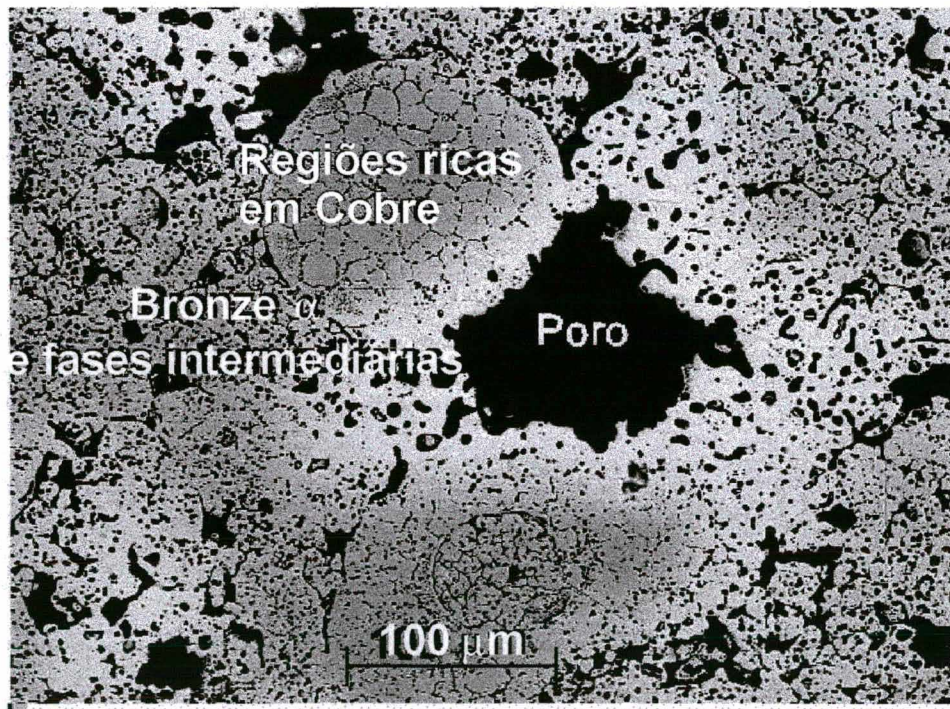


Figura 19- Aquecimento a 830°C com 1 minuto de patamar.



Tais fases intermediárias, de acordo com o diagrama de equilíbrio, são indicativas da presença de fase líquida na temperatura de 830°C. Tal fato confirma que ainda não houve total homogeneização do material, pois o diagrama indica que a 830°C uma liga com 10%Sn é monofásica (sem presença de fase líquida). Por outro lado, a pequena quantidade de fases intermediárias também revela que, na temperatura de 830°C (após 1 minuto de patamar), elevada quantidade do material se encontra monofásico (bronze alfa), e portanto, próximo do final do processo de homogeneização. Assim, infere-se que, até o primeiro minuto de patamar isotérmico (830°C), ocorreu a maior parcela da interdifusão das espécies.

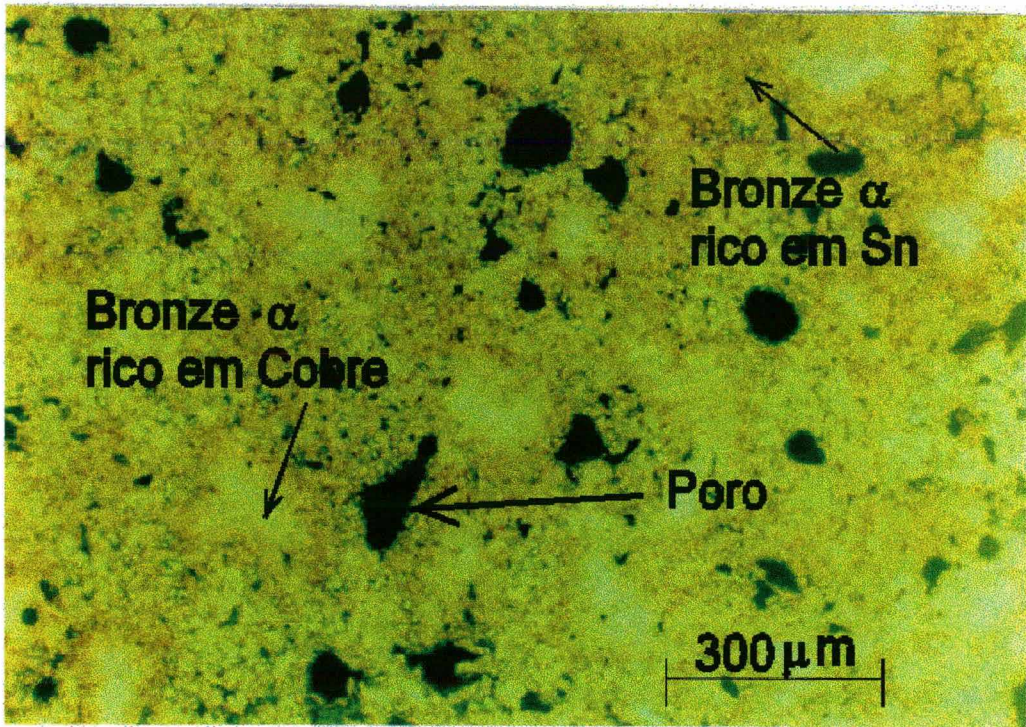
As Figura 20 (a) e (b), ilustram a microestrutura após aquecimento a 830°C por tempos crescentes de patamar (3 e 12 minutos respectivamente).

Com o aumento do tempo é verificada a ocorrência simultânea de coalescimento (de poros e de grãos) e aumento da homogeneidade química do material, de forma que com 12 minutos a 830°C existe uma microestrutura homogênea, com grãos grandes e poros esferoidizados por quase todo o material. Durante o patamar isotérmico a sinterização evolui no sentido de diminuição da fase líquida através da solubilização do cobre para a formação de  $\alpha$ .

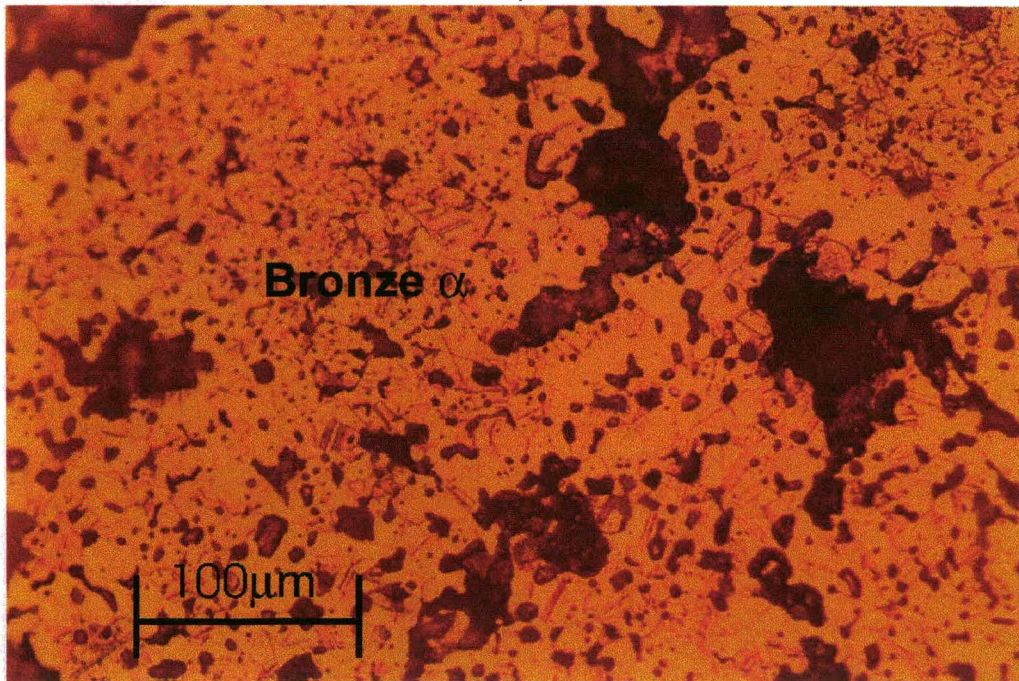
Posteriormente verificar-se-á que, nesta etapa, ocorre o aumento da densidade do material pela retração da amostra.

Os resultados até aqui indicam que a etapa de aquecimento é aquela na qual ocorre a maior parcela das variações microestruturais.





a)



b)

Figura 20 - Sinterização a 830°C com 3 e 12 minutos de patamar, respectivamente.



## 5.2 ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL (DTA)

Os resultados das análises térmicas diferenciais para amostras com densidade de  $6,74 \text{ g/cm}^3$  e de  $6,4 \text{ g/cm}^3$ , com taxa de aquecimento de  $10^\circ\text{C/min}$  sob atmosfera de argônio, são mostrados na Figura 21 e Figura 22.

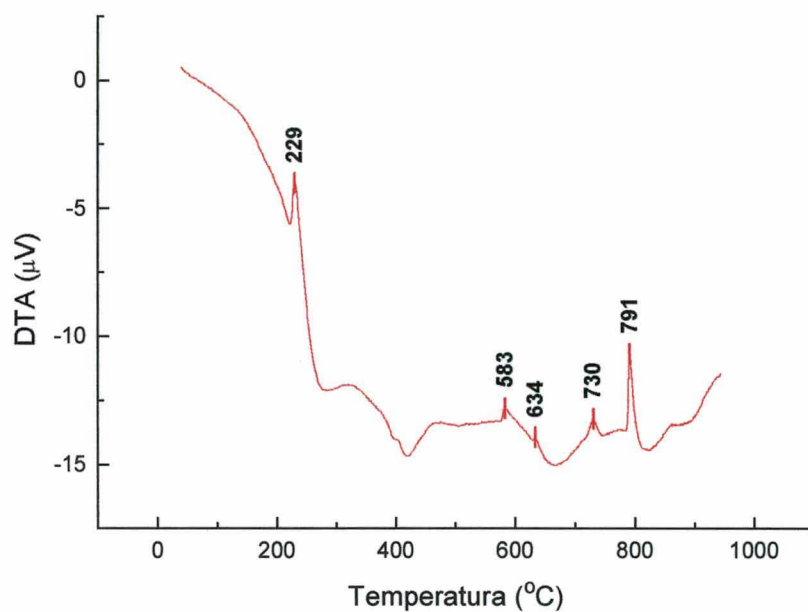


Figura 21 - Análise térmica diferencial de um compactado de Cu 89/ Sn 10/ C 1 com densidade  $6,74 \text{ g/cm}^3$  aquecida a  $10^\circ\text{C/min}$  sob atmosfera de argônio ultra puro.

Conforme o esperado, constata-se que ambas as amostras apresentaram resultados bastante similares entre si. A diferença observável diz respeito a intensidade das reações (principalmente na faixa de  $450^\circ\text{C}$  a  $900^\circ\text{C}$ ) mas a natureza das reações (temperaturas onde ocorrem inflexões) permanece a mesma. Isto é uma indicação de que a variação da densidade a verde do compactado tende a influir mais na intensidade (por propiciar maior ou menor frente de reação) do que no tipo de reação que ocorre ao longo do aquecimento, conforme pode ser verificado na Figura 23, onde está explícito

que a amostra com menor densidade apresentou uma curva mais exotérmica que a com maior densidade.

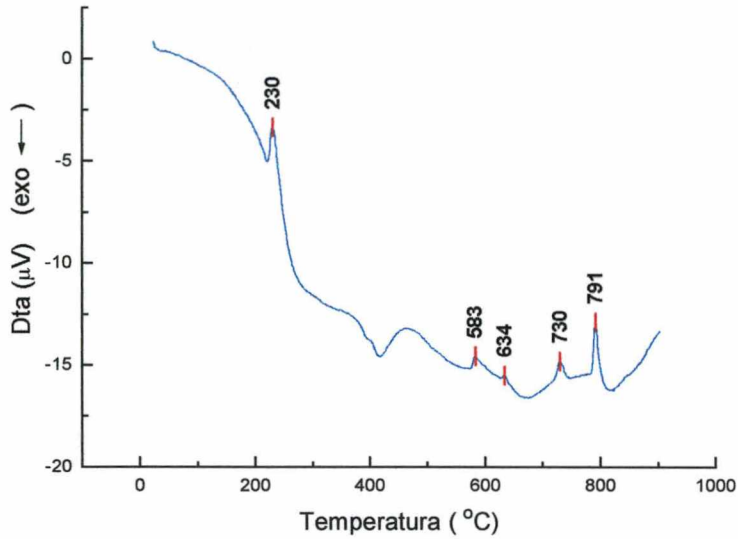


Figura 22 - Análise térmica diferencial de um compactado (de composição Cu 89%/ Sn 10%/ C 1%) com densidade  $6,4 \text{ g/cm}^3$  aquecido a  $10^\circ\text{C/min}$  sob atmosfera de argônio ultra puro.

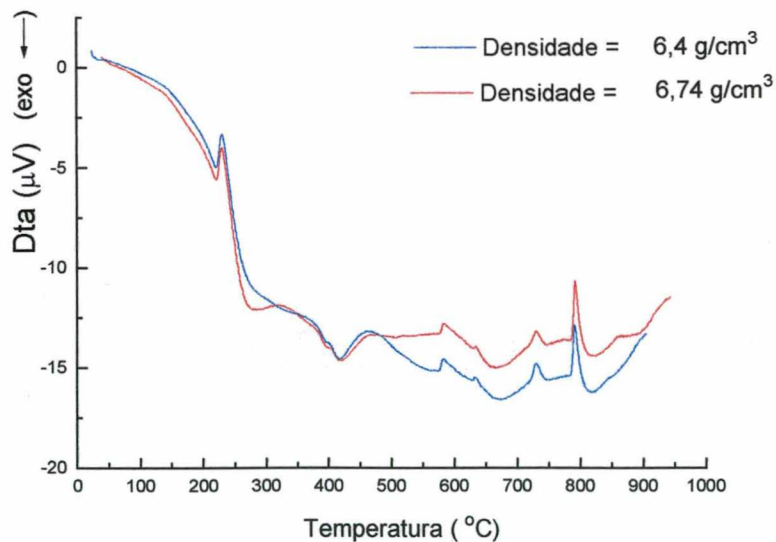


Figura 23 - Análise térmica diferencial de compactados de Cu 89/ Sn 10/ C 1 com densidade  $6,74 \text{ g/cm}^3$  e  $6,4 \text{ g/cm}^3$  aquecida a  $10^\circ\text{C/min}$  sob atmosfera de argônio ultra puro.



Confrontando-se os resultados da Figura 21 e da Figura 22 com o diagrama de equilíbrio, pode-se identificar algumas das reações obtidas nas análises, tal como descrito a seguir.

A 229°C ocorre a fusão do estanho (primeiro pico endotérmico)

A 415°C ocorre a fusão da fase  $\eta$  e respectivo aumento da quantidade de líquido presente no material, conforme pode-se verificar pela inflexão a esta temperatura, pondo fim a um período exotérmico para dar início a um endotérmico, provavelmente decorrente da formação de fase líquida.

A 791°C, ocorre formação de nova fase líquida (possivelmente fusão de beta e fusão de bronze alfa). Este intenso pico deve estar associado à decomposição peritética ( $\beta \rightarrow \alpha + \text{líquido}$ ) a 798°C uma vez que a esta temperatura não existem outras reações as quais pode ser atribuída a responsabilidade por um pico de tal intensidade. A diferença de temperatura (7°C) entre os valores medido e teórico pode ser associada a incertezas de medição.

Nas temperaturas entre os pontos 415°C e 791°C constata-se haver algumas reações que não foram possíveis correlacionar claramente com o diagrama de equilíbrio, entretanto é justamente neste intervalo que se verifica o caráter mais exotérmico das reações ocorridas no compactado de mais baixa densidade.

Os resultados da Figura 21 e da Figura 22, comprovam a ocorrência de diversas reações no material ao longo do aquecimento, apesar de não ter sido possível caracterizar especificamente todas elas. Espera-se que tais reações influenciem as variações dimensionais do material no aquecimento, tal como será estudado no próximo item.

## 5.3 EVOLUÇÃO DIMENSIONAL NA SINTERIZAÇÃO.

### 5.3.1 ASPECTOS DILATOMÉTRICOS.

#### a) Influência da densidade verde.

A Figura 24 mostra a influência da densidade na variação dimensional de compactados de cobre/estanho sinterizados com a mesma velocidade de aquecimento (20°C/min).

Tomando-se como referencial a curva dilatométrica para 6,64 g/cm<sup>3</sup>, constata-se haver forte expansão, durante o aquecimento, a partir de cerca de 640°C. Tal expansão prolonga-se até o final do aquecimento (830°C), atingindo 8,5%. Durante o patamar, praticamente não ocorre variação dimensional do material. Esta expansão acentuada pode ser atribuída à formação de fase líquida em grande quantidade (Note-se que há formação de fase líquida, segundo o diagrama de fases, em temperaturas abaixo de 640°C, porém tais fases são formadas e consumidas durante o aquecimento).

Para o caso da amostra com menor densidade (6,26 g/cm<sup>3</sup>), há um desvio de comportamento (em relação à amostra anterior), já a partir de 400°C. Tal desvio se acentua ainda mais acima de 650°C, pois a expansão significativa ocorre apenas acima de 700°C. A expansão total (5%), até o início do patamar isotérmico, é menor que aquela observada (8,5%) para a amostra de maior densidade. Este comportamento se deve basicamente a: 1- menor expansão a partir de 400°C; 2- temperatura mais elevada para início de expansão acentuada e 3- menor intensidade total de expansão até o início do patamar isotérmico. Todos estes aspectos estão relacionados ao menor espaço disponível para escoamento do líquido formado nas amostras de maior densidade, implicando em maior expansão volumétrica quando da formação de fases líquidas.

Em ambos os experimentos constatou-se que a maior parcela da expansão da amostra ocorre na etapa de aquecimento.

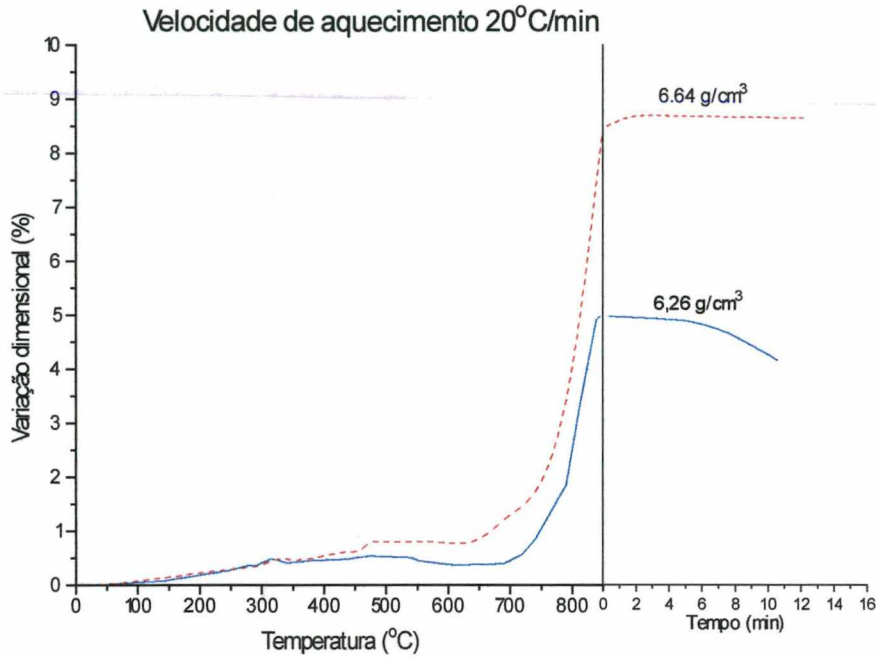


Figura 24 - Influência da densidade a verde na variação dimensional em função da temperatura e do tempo de sinterização

Por fim, constatou-se também maior intensidade de retração ao longo do patamar isotérmico para a amostra de menor densidade inicial.

#### b) Influência da velocidade de aquecimento.

Através da análise da Figura 25, verifica-se que para a maior velocidade de aquecimento é observada maior expansão. Tal aspecto pode ser atribuído a diversos fatores, tais como maior nível de expansão gasosa (sem tempo para saída de gases), retardo da dissolução das fases líquidas formadas em baixa temperatura e disponibilidade de maior quantidade de fase  $\beta$  em alta temperatura.

Também verifica-se (Figura 25) que o aumento da velocidade de aquecimento propicia menor taxa de retração durante o patamar isotérmico. Tal aspecto pode ser atribuído ao fato da reação peritética (formação de líquido) não se completar totalmente para a amostra de maior taxa de



aquecimento e, portanto, a componente de expansão ainda é significativa durante o patamar.

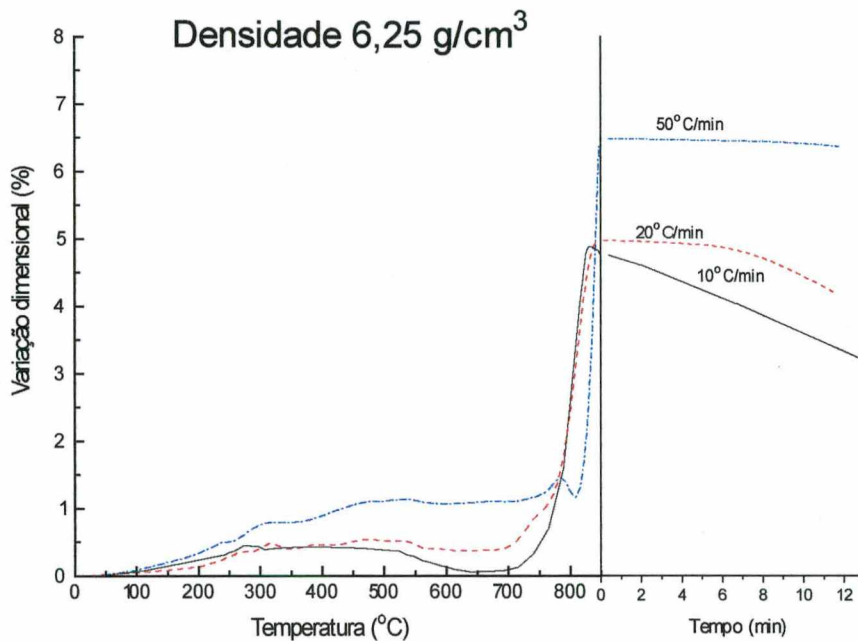


Figura 25 - Variação dimensional em função da temperatura e do tempo de sinterização para cilindros de bronze submetidos a diferentes velocidades de aquecimento.

#### 5.4 INFLUÊNCIA DE ALGUMAS VARIÁVEIS INDUSTRIAIS DE PROCESSAMENTO.

No presente tópico estudou-se a influência da densidade a verde, ciclo térmico (temperatura de patamar e tempo de carga) e forma do mancal nas variações dimensionais ao longo da altura, diâmetro interno e diâmetro externo do mancal. Tais variáveis são aquelas tipicamente controladas no processo produtivo sob contexto industrial.

a) Influência da densidade a verde e da temperatura de sinterização na variação dimensional ao longo da altura do mancal.

Na Figura 26 estão os resultados de variação dimensional ao longo da altura para buchas cilíndricas com flange sinterizadas com tempo de carga de 2 minutos (equivalente a 8 minutos de aquecimento, 12 minutos de patamar e 20 minutos de resfriamento). Os resultados mostrados da Figura 26 indicam que o aumento da densidade a verde resulta em maior expansão da amostra.

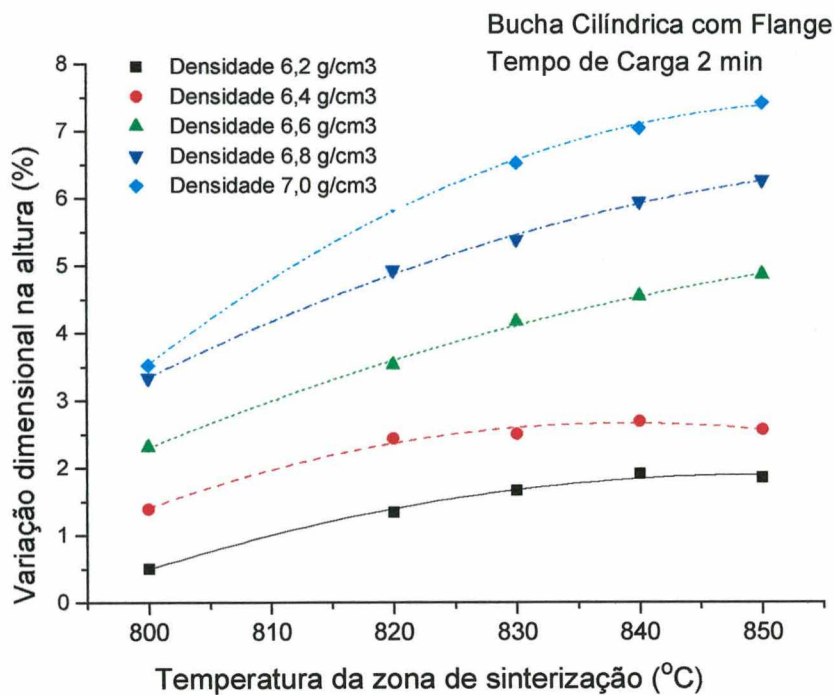


Figura 26 - Influência da densidade a verde na variação dimensional em função da temperatura (para buchas cilíndricas com flange e tempos de 2 min).

Tal resultado confirma o observado na Figura 24 quando dos ensaios de dilatometria e está associado à menor quantidade de poros (menos espaço para escoamento dos líquidos formados) em amostras de maior densidade. Ainda na Figura 26, constata-se que o aumento da temperatura, para o ciclo térmico adotado, resulta em maior expansão da amostra por possibilitar maior formação de fase líquida. O fato do aumento da temperatura gerar maior

expansão deve ser focado sob restrições, pois dependendo do ciclo térmico adotado pode-se atingir um máximo de expansão ao longo da temperatura, conforme ilustra a Figura 27 onde se utilizou de ciclo térmico mais lento que o da Figura 26 (tempo de carga de 3 minutos (equivalente a 12 minutos de aquecimento, 18 minutos de patamar, 30 minutos de resfriamento)).

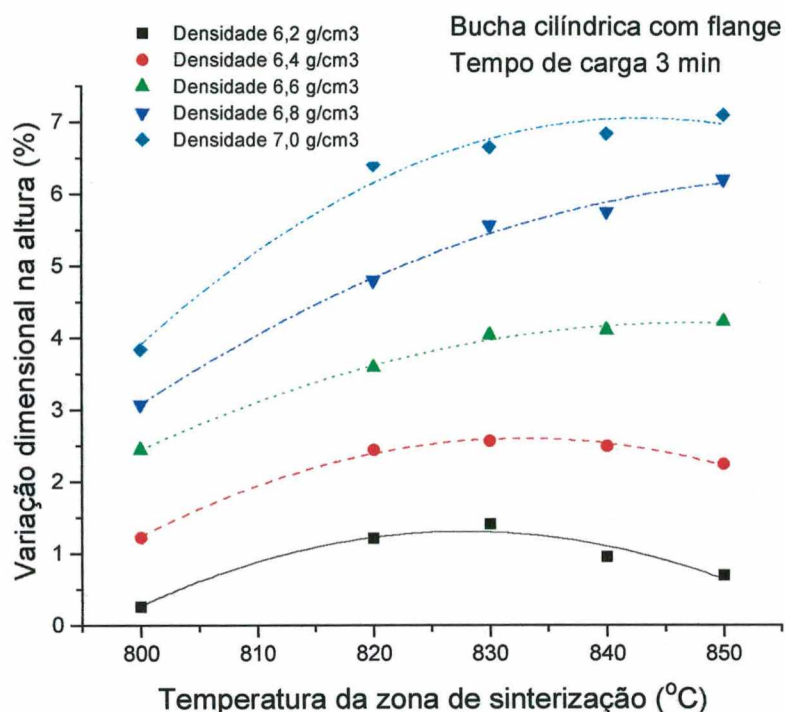


Figura 27 - Influência da densidade a verde na variação dimensional em função da temperatura (para buchas cilíndricas com flange e tempos de 3 min).

Em síntese, o aumento da densidade gera maior expansão e o aumento da temperatura pode gerar maior ou menor expansão em função do ciclo térmico adotado.

#### b) Influência do ciclo térmico na variação dimensional.

Utilizou-se de mancal esférico com tempos de carga de 2 minutos e 3 minutos. Os resultados de variação dimensional são mostrados na Figura 28, onde se constata haver uma inversão de comportamento com o aumento da densidade, ou seja, para baixa densidade (6,2 g/cm<sup>3</sup>, Figura 28.a), a expansão



da amostra é maior para menor tempo de carga. Para elevadas densidades ( $7,0 \text{ g/cm}^3$ , Figura 28.d), tal expansão é menor para menor tempo de carga.

A explicação para tal inversão é aparentemente complexa pois o fenômeno envolvido não está completamente representado na Figura 28. A Figura 29 é um esquema das tendências observadas nas figuras 26,27 e 28 e será utilizada para explicar a inversão de comportamento supracitada.

A Figura 29 explicita que o aumento da densidade gera maior expansão (conforme constatado experimentalmente na Figura 24 e Figura 26, independente do tempo total de ciclo). Tal fenômeno se deve à redução dos espaços para escoamento do líquido.

Por outro lado, para uma dada densidade, o aumento do tempo de ciclo (ou seja, retardo da velocidade de aquecimento, tempo de patamar e velocidade de resfriamento) gera inicialmente aumento da expansão e, posteriormente, redução da expansão. Assim, as curvas apresentam um máximo de expansão para um dado tempo de ciclo. Tal fenômeno evidencia que inicialmente há predomínio das componentes de expansão (tal como constatado experimentalmente na Figura 25 e Figura 27) e que a retração (isto é, menor expansão) tende a ocorrer posteriormente.

Quanto à Figura 28, a referida inversão de comportamento ocorreu por se tomarem condições de contorno (densidade e tempo de ciclo) particulares, tais como evidenciadas na Figura 29. (por setas indicando onde estão os pontos de cada figura) .

É importante observar que as variações dimensionais para as condições da Figura 28.a são bastante inferiores que para as demais condições (figuras 28.b, 28.c, 28.d). Disto resulta o fato de que, industrialmente, se utiliza de baixas densidades a verde, justamente por se obterem as menores variações dimensionais no produto (inclusive corrigidas posteriormente por calibração).

Adicionalmente, na Figura 29, constata-se que os picos de expansão ocorrem sob tempos de ciclo mais curto (maior produtividade) quando do emprego de baixa densidade a verde.

Em síntese, o emprego de baixa densidade a verde resulta industrialmente (para as matérias primas utilizadas) em menor nível de expansão (menor esforço de calibração), maior reprodutibilidade e possibilita maior produtividade.

### Buchas Esféricas

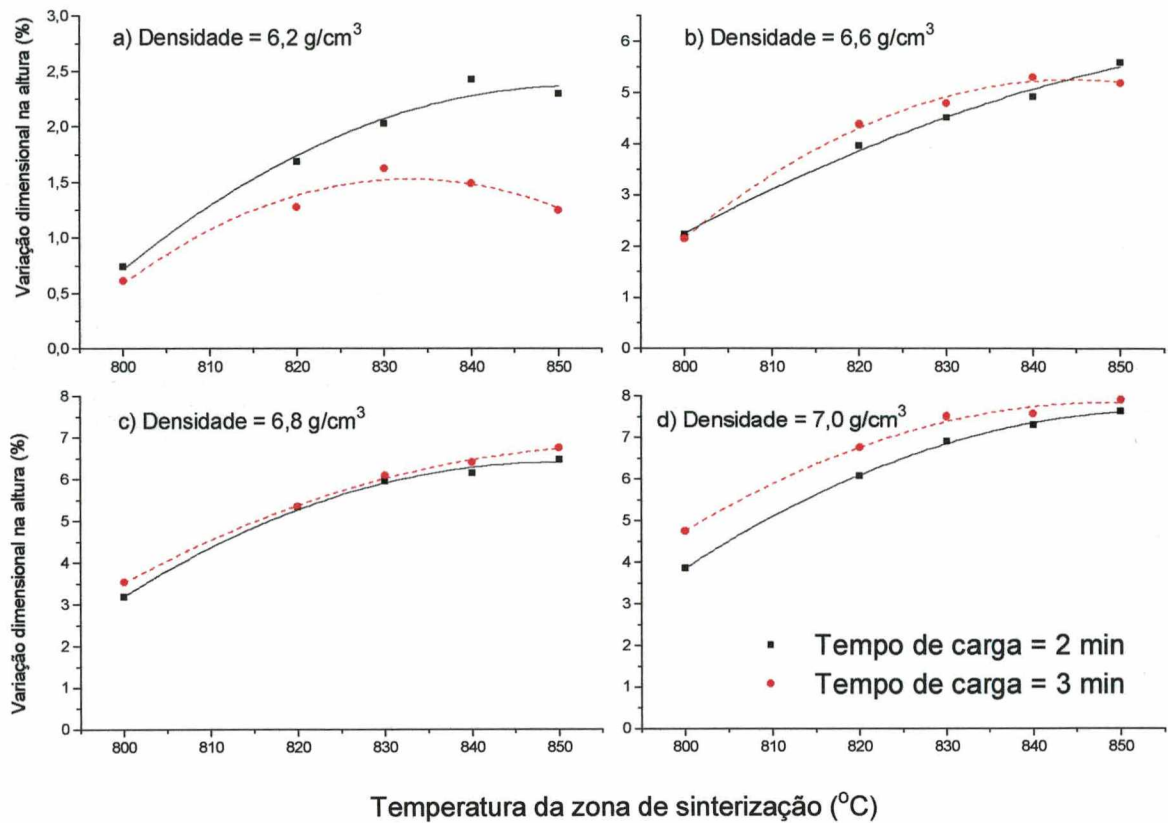


Figura 28 - Comportamento dimensional de buchas esféricas em função da temperatura para diferentes tempos de carga e densidades: a) densidade a verde 6,2 g/cm<sup>3</sup>, b) densidade a verde 6,6 g/cm<sup>3</sup>, c) densidade a verde 6,8 g/cm<sup>3</sup>, d) densidade a verde 7,0 g/cm<sup>3</sup>.



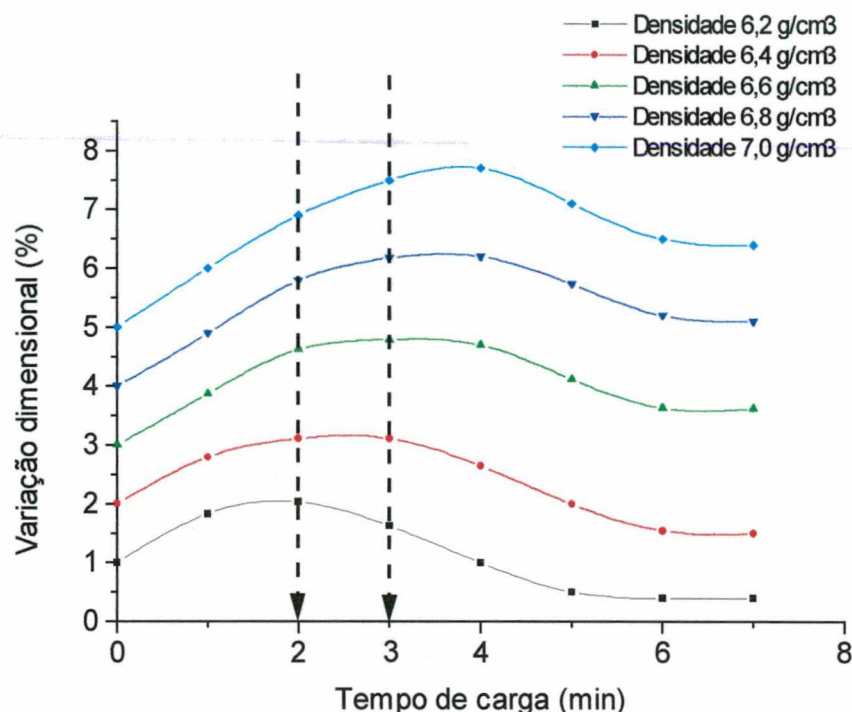


Figura 29- Evolução dimensional (teórica) em função do tempo de carga.

### c) Influência da forma do mancal

A Figura 30 ilustra a influência da forma do mancal nas variações dimensionais ao longo da altura para diversas temperaturas de sinterização.

Constata-se na Figura 30 que buchas esféricas apresentam maior expansão ao longo da altura se comparadas às buchas cilíndricas. Isto se deve ao fato de que, apesar de ambos terem sido compactados para uma mesma densidade média a verde, as buchas esféricas (devido à geometria) apresentam maior densidade no núcleo (linha neutra) e portanto maior expansão.

Considerando que, além da densidade a verde, o diâmetro interno e os volumes de ambas as buchas são os mesmos, constata-se a mudança de geometria gera variações dimensionais diferentes e, por isso, dados experimentais obtidos para uma dada geometria não podem ser generalizados como dados de projeto para outras geometrias.

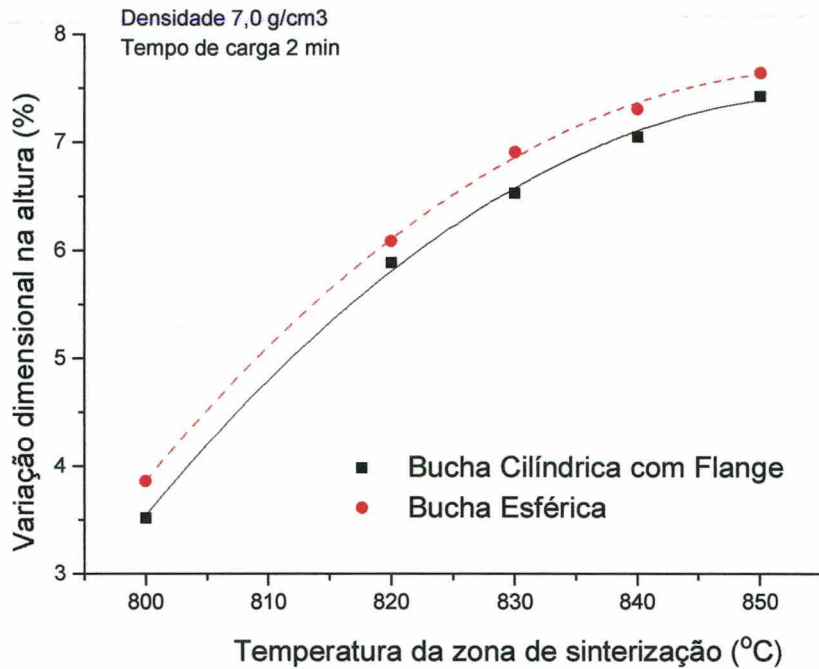


Figura 30 - Variação dimensional na altura em função da temperatura de sinterização para buchas com formas distintas.

#### d) Avaliação da variação dimensional em diferentes posições das peças

A Figura 31 ilustra as variações dimensionais medidas em diferentes posições para buchas esféricas e cilíndricas com flange.

Constata-se que a maior variação ocorre ao longo da altura, se comparadas com aquelas resultantes ao longo do diâmetro, para ambas as geometrias de mancal. Observa-se ainda que as variações ao longo do diâmetro externo são maiores que ao longo do interno para ambas as buchas. Estas diferenças de variações dimensionais são oriundas das diferentes densidades locais e respectivos gradientes.

Os resultados acima implicam em considerações importantes para o âmbito industrial, tal como descrito a seguir.

Variações ao longo da altura podem ser corrigidas na compactação ou na calibração, enquanto ao longo do diâmetro tem-se a limitação da dimensão

das matrizes. As menores variações dimensionais (maior estabilidade dimensional), para uma dada geometria, ocorrem (Figura 31) ao longo dos diâmetros interno e externo, que é justamente a direção onde se tem menor possibilidade de ajuste de processo visando assegurar precisão dimensional.

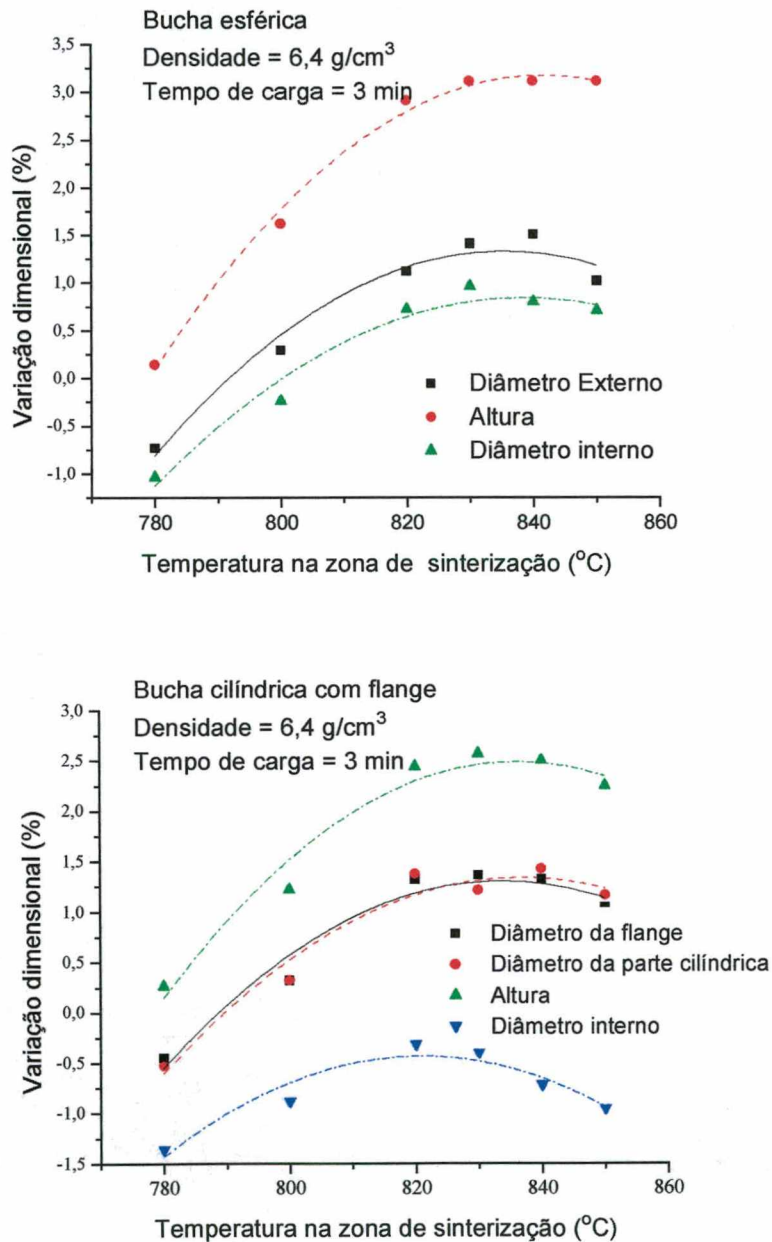


Figura 31- Variação dimensional em diferentes pontos e direções medidas em função da temperatura da zona de sinterização em buchas esféricas e cilíndricas com flange (para densidade 6,4 g/cm<sup>3</sup> e tempo de carga 3 minutos)

A Figura 31 também indica que, para uma dada posição que se pretenda controlar, em termos de variação dimensional, existe uma temperatura ótima a ser estabelecida experimentalmente.

e) Influência da temperatura de sinterização na densidade sinterizada e na constante de resistência  $k$ .

A Figura 32 ilustra a influência da temperatura de sinterização na densidade sinterizada e na constante de resistência  $k$  para buchas cilíndricas com flange com densidade verde de  $6,4 \text{ g/cm}^3$ .

Verifica-se, na Figura 32, que, para temperaturas acima de  $820^\circ\text{C}$ , o aumento da temperatura de sinterização resulta em queda da densidade sinterizada e aumento da resistência, para os dois ciclos térmicos adotados. Tal contradição entre aumento de resistência e queda de densidade se deve ao fato de não ter havido homogeneização completa para os ciclos térmicos adotados, apesar de ambos serem típicos do contexto industrial.

A Figura 32 evidencia que, para os ciclos térmicos adotados, não existe uma correlação monotônica entre densidade e resistência e que a homogeneidade da microestrutura está tendo influência significativa nos resultados.



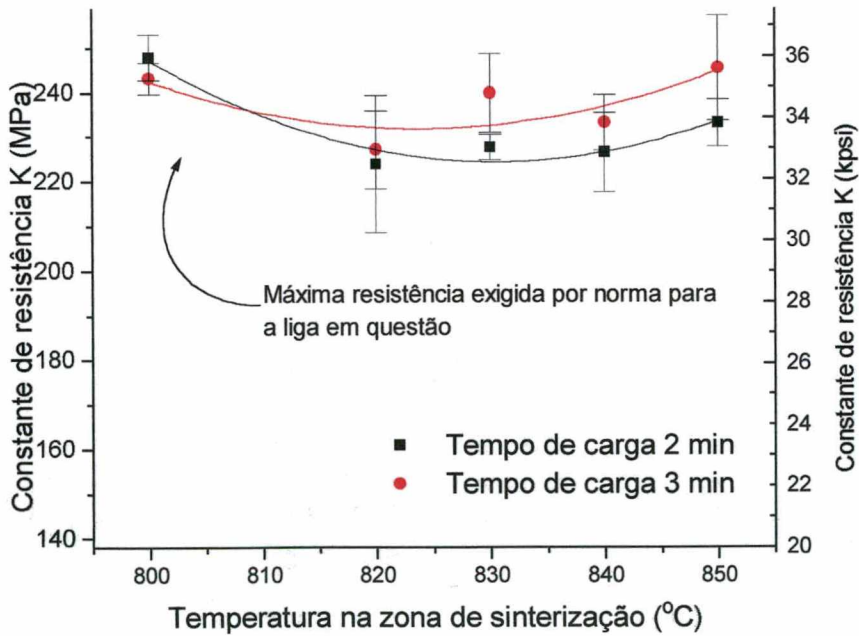
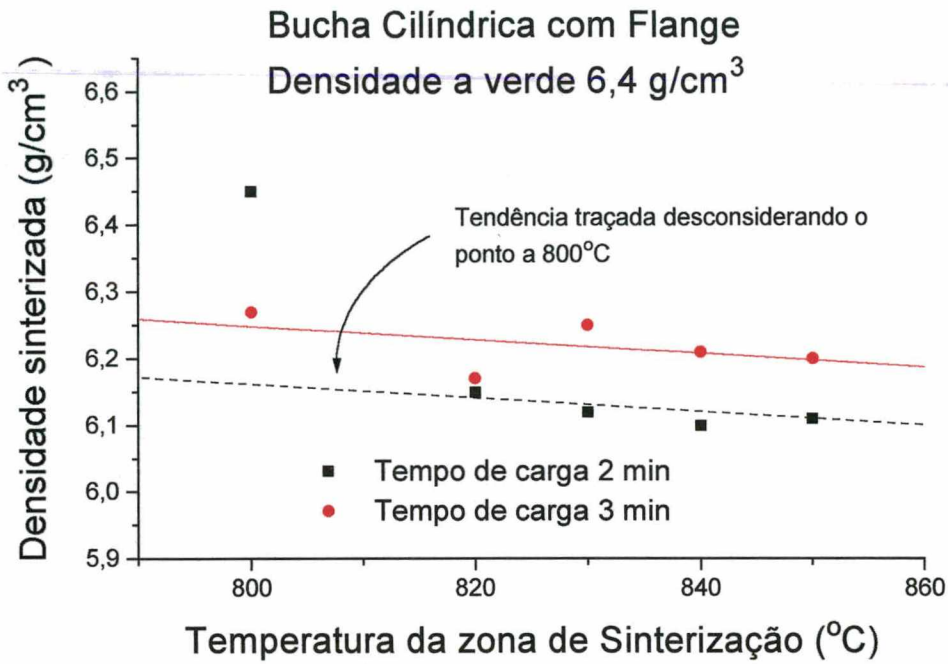


Figura 32 - Variação de densidade sinterizada e da resistência à ruptura radial em função da temperatura para buchas cilíndricas com flange (densidade 6,4 g/cm<sup>3</sup>).

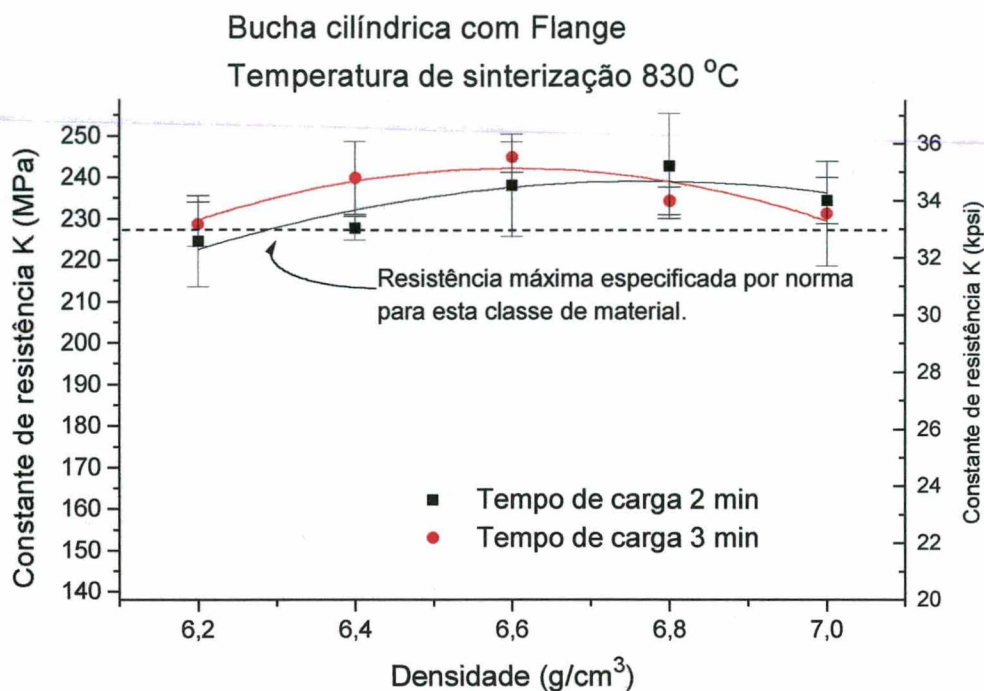


Figura 33 - Constante de resistência em função da densidade a verde (temperatura de sinterização 830°C)

Também se constata, em ambas as figuras, que o ciclo mais rápido (tempo de carga de 2 minutos) resulta em menor densidade sinterizada e menor resistência que o obtido no ciclo mais lento. Tal resultado é consistente com o fato dos fenômenos de expansão predominarem no início do ciclo de sinterização, tal como constatado em itens anteriores. Portanto, ciclos mais rápidos tendem a gerar maior expansão (menor densidade sinterizada) e menor resistência.

Por outro lado, na Figura 32 observa-se uma inversão de comportamento para temperaturas em torno de 800°C. Tal inversão está associada à reação peritética ( $\beta \rightarrow \alpha + \text{líquido}$ , a 798°C) que gera expansão da amostra e menor densidade. A maior resistência observada nesta temperatura se deve à presença de fases duras resultantes da reação peritética.

Cabe observar que industrialmente não se opera (com misturas elementares de pó) na faixa de temperatura peritética justamente por ocorrer

o fenômeno supra citado, isto é, formação de fases duras indesejáveis para o adequado desempenho do mancal e dificuldade de controle da expansão resultante da reação peritética ( conhecido como "abnormal expansion").

Finalmente, resta observar que segundo norma MPIF 35, os níveis de resistência especificados (após calibração) para a formulação adotada neste trabalho situam-se entre 117,21 Mpa (17kpsi) e 227,53 Mpa (33 kpsi), sendo que a especificação usual é de 26 kpsi. Na Figura 33 constata-se que os níveis de resistência obtidos após a sinterização (portanto inferiores àqueles obtidos após calibração) situam-se acima de 206,84 MPa (30 kpsi). Tal fato evidencia que o requisito de resistência exigido por norma é facilmente atingido sob condições industriais de processamento, o que indica que, sob condições industriais, o maior problema reside no controle da variação dimensional (intensidade e estabilidade).

## **6. CONCLUSÕES**

Baseando-se nos resultados experimentais apresentados anteriormente, pode-se obter as seguintes conclusões quanto aos aspectos microestruturais, dilatométricos, dimensionais e de resistência de buchas autolubrificantes sinterizadas sob condições industriais.

### **6.1 QUANTO À MICROESTRUTURA.**

- a) A microestrutura do material, inicialmente segregada (por ser oriunda da compactação de mistura de pós elementares), apresenta-se bastante homogênea (matriz monofásica, bronze alfa) ao final do ciclo industrial de processamento, indicando haver intenso processo de homogeneização ao longo do ciclo térmico.
- b) A maior parcela da homogeneização ocorre ao longo da etapa de aquecimento. Nesta etapa são formadas e solubilizadas fases intermediárias e fases líquidas responsáveis pela intensa variação dimensional do material.
- c) Sob condições de processamento próximas das industriais, dentre todas as alterações microestruturais que ocorrem ao longo da sinterização (formação de fases intermediárias, fases líquidas, poros secundários e alterações das respectivas quantidades), o volume de poros (avaliado pela medição da densidade do material) praticamente não se altera entre o estado verde e o sinterizado.



## **6.2 QUANTO ÀS VARIAÇÕES DIMENSIONAIS.**

- a) Para as condições industriais de processamento, ocorre tipicamente expansão da amostra.
- b) A expansão é anisotrópica e de maior intensidade na direção de compactação (1 a 2 % ao longo da altura e 0,8 a 1,2 % ao longo do diâmetro).
- c) A menor expansão no sentido radial possibilita obtenção de produtos com elevada precisão dimensional justamente nas dimensões críticas para fins de desempenho (diâmetros interno e externo do mancal).
- d) A maior parcela da expansão ocorre na etapa de aquecimento (também etapa de maior intensidade de variação microestrutural).

## **6.3 QUANTO À RESISTÊNCIA À RUPTURA RADIAL (FATOR K)**

Sob condições industriais de processamento, são atingidos valores superiores àqueles tipicamente especificados por norma ou pelos usuários para a categoria de mancal utilizado neste trabalho. Entretanto tal aspecto não garante o bom desempenho do mancal uma vez que este é fortemente influenciado pela microestrutura (presença de fases duras não homogeneizadas) e deve ser avaliado por testes de vida (produto PV).

## **6.4 QUANTO À INFLUÊNCIA DE ALGUMAS VARIÁVEIS DE PROCESSO.**

Dentre as variáveis investigadas (densidade a verde, velocidade de aquecimento, forma do mancal, temperatura de sinterização e ciclo térmico utilizado), apenas a densidade a verde apresentou influência monotônica na variação dimensional (aumento da densidade verde gera maior expansão).

A velocidade de aquecimento, temperatura de sinterização e tempo de carga não apresentam influência monotônica. Assim, o aumento da velocidade de aquecimento, temperatura e tempo, isoladamente, induzem inicialmente a um aumento da expansão e posteriormente uma redução da expansão total.

Além disso, a forma das buchas apresenta influência na variação dimensional na medida em que afeta a distribuição de densidade ao longo do compactado.

De modo geral, pode-se constatar que se as condições de processamento (densidade e o ciclo térmico empregado) propiciarem maior extensão de transporte de massa (tal como no caso de uso de menor densidade, de maior temperatura e/ou tempo de patamar e/ou menor velocidade de aquecimento), haverá possibilidade de iniciar retração da amostra gerando menor expansão total da mesma ao final da sinterização.

Em conjunto, os resultados permitiram constatar que, sob condições industriais de processamento (que garantam ter se atingido homogeneidade microestrutural), a variável que demanda maior atenção é a precisão dimensional ao longo do diâmetro.

## **7. SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS**

Os resultados obtidos nesta dissertação indicam que é interessante uma maior exploração deste tema. Trabalhos futuros poderiam abordar os seguintes assuntos:

1. Influência da adição de carbono na sinterização do bronze 90/10 obtido a partir de misturas de pós elementares;
2. Influência da adição de pré-ligas de bronze na sinterização de bronze 90/10;
3. estudo do comportamento dimensional durante a sinterização de misturas de pós com o objetivo de obtenção de bronze 90/10 variando-se a temperatura de pré-aquecimento do forno (industrial) de sinterização;
4. Estudo da influência das variáveis de processamento na impregnação e calibração de buchas autolubrificantes de bronze.
5. Estudo da influência das variáveis de processamento do bronze 90/10 no desempenho das buchas autolubrificantes;
6. Modelamento do comportamento de mancais autolubrificantes durante o funcionamento em função do processamento;
7. Estudo da relação do desgaste de mancais com o nível de ruído emitido e com as variáveis de processamento.

**Referências bibliográficas:**

- [01] SHIGLEY, J. E., **Mechanical Engeneering Design**, Mc Graw-Hill, 1986.
- [02] METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION, **Materials standards for P/M Self-Lubricating Bearings**, 35, Princeton - NJ, 1986.
- [03] MOSCA, E., **Powder Metallurgy, criteria for design and inspection**, Mechanical, Metalurgical and Allied Manufacturers Association, Turin, p. 39 - 45, 1984.
- [04] FIGUEIRA, D. T. A., SALGADO, L., RAZO, P. F., **Mancais auto-lubrificantes sinterizados; Projeto, desempenho e vida**, Associação Brasileira de Materiais, São Paulo, 1993.
- [05] SCHUNK & EBE GMBH, **Sintered Bearings**, [ca. 1975].
- [06] FACHVERBAND PULVERMETALURGIE, **Sintered Parts: Their Properties and Applications**, 1971.
- [07] KOHNO, T., NISHINO, Y., **Development of PM Bearings for high-speed applications**, **Metal Powder Report**, february/1982, p 65 - 71, 1982.
- [08] ALCAN POWDERS AND PIGMENTS, **A metal powder fact file - bulletin #1A**, USA, 1993, catálogo de produtos.
- [09] METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION, **Copper Powder Metallurgy for Bearings, Copper Base Powder Metallurgy, New Perspectives in Powder Metallurgy**, vol. 7, Princeton - NJ, p. 59 - 63, 1980.
- [10] CHENG, J. A., APELIAN, D., TAUBENBLAT, P. W., **Structure, Property and Performance relations in Self-Lubricating Bronze Bearings: Tailored**

- Premixes, **The International Journal of Powder Metallurgy**, vol. 22, N. 3, p. 163 - 174, 1986.
- [11] LENEL, F. V., Sintering of compacts from mixtures of copper and tin powders, **Powder Metallurgy, Principles and Applications**, Princeton-NJ, Metal Powder Industries Federation, Princeton, 1980, p. 302-305.
- [12] METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION, **Determination of Density of Compacts or Sintered Metal Powder Products**, 42, Princeton - NJ, 1986.
- [13] METALS HANDBOOK, Metallography, Structures and Phase Diagrams, Metals Park - Ohio: American Society for Metals, vol. 8, p. 299, 1973.
- [14] CHENG, J. A., LAWLEY, A., SMITH, W. E., ROBERTSON, J.M., Structure, Property and Performance Relations in Self-lubricating Bronze Bearings: Commercial Premixes, **The International Journal of Powder Metallurgy**, Vol. 22, No. 3, p. 149 - 162, 1986.
- [15] PATEL, K. B., Use of dilatometer to study the sintering response of bronze powder mixes., **Modern Development in Powder Metallurgy**, vol 17, Edward N. Aqua. Charles I. Whitman, p. 853-894, 1985.
- [16] GERMAN, R. M., **Liquid Phase Sintering**, Plenum Press, New York, 1985.
- [17] ACHAYA, N. N., MUKUNDA, P. G., Sintering in Copper-Tin System part I: Identification of Phases and Reactions, **International Journal of Powder Metallurgy**, volume 31, No. 1, p. 63 - 72, 1995.
- [18] WATANABE, T., "Mechanism of Pore Formation During Sintering of Porous Bronze Bearings", **Report of the castings research laboratory**, Waseda University, Japan, no. 14, p. 9 - 17, 1963.

- [19] ACHAYA, N. N., MUKUNDA, P. G., Sintering in Copper-Tin System part II: Alloy Behavior, 1995, **International Journal of Powder Metallurgy**, vol. 31, no. 1, p. 73 - 79, 1995.
- [20] KIM, J. W., KANG, S. J. L., YOON, D. N., The flow behaviour of Sn melt during sintering of 90Cu/10Sn powder compacts, **Powder Metallurgy International**, vol. 19, n. 3, p. 41 - 42, 1987.
- [21] ACHAYA, N. N., MUKUNDA, P. G., Sintering in Copper-Tin System part III: Influence Variables, **International Journal of Powder Metallurgy**, vol. 31, No. 1, p. 81 - 88, 1995.
- [22] JUSTINO, J. G., BERNARDINI, P. A. N., Influência de algumas variáveis de processamento industrial na variação dimensional de mancais autolubrificantes, **IV Seminário de Metalurgia do Pó**, 1995, Associação Brasileira de Materiais, p. 77 - 88.
- [23] SCM METAL PRODUCTS, **Premixed Bronze Powders for P/M Bearings**, Research Triangle Park, 1988, boletim técnico.
- [24] BERRY, D. F., KLAR, E., VELOFF, N., Aspects of dimensional control during manufacture of bronze self-lubricating bearings, **Non-ferrous materials - advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials**, 1992, Vol. 6, Metal Powder Industries Federation, Princeton-NJ, p. 51-61.
- [25] SCM METAL PRODUCTS, INC, **Selecting SCM Bronze Premix Grade and Growth Adjustment for Lot-To-Lot Variation**, Research Triangle Park, 1994.
- [26] BACKENSTO, A J., Changes in Dimensional Changes to Bronze Premixes as Premix Components Change, **Modern Developments in Powder Metallurgy**, vol. 19, ch. 11, p. 641.

- [27] BERRY, D.F., Factors Affecting the Growth of 90/10 Copper/Tin Mixes Based on Atomized Powders, **Powder Metallurgy**, vol. 15, No. 3, p. 247, 1972.
- [28] CHENG, J. A, LAWLEY, A, APELIAN, D., Structure, Property and Performance Relations in Cu-Sn-Ni Bearings: Premixes and Prealloyed Powders, **The International Journal of Powder Metallurgy**, vol. 22, n. 4, p. 245-253, 1986.
- [29] GARG, D., BERGER, K. R., BOWE, D. J., MARSDEN, J. G., Effects of source powder and atmosphere composition on sintering of bronze components, **Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials**, , vol 1, Metal Powder Industries Federation, Princeton-NJ, 1995, p. 141-151.
- [30] DAS, K., BAS, J. A., Control of Delta Phase in 90/10 bronze bearing, **Non-Ferrous Materials - Advances in Powder & Particulate Materials**, 1992, Metal Powder Industries Federation, Princeton-NJ, p. 23 - 34.
- [31] SCM METAL PRODUCTS, INC, **Bronze Sintering Troubleshooting Manual**, Research Triangle Park, 1988.
- [32] DAVALA, A. B., Statistical Design of experiments (Doe) for problem solving in PM sintering, **Sintering - Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials**, 1992, vol. 3, Metal Powder Industries Federation, Princeton-NJ, p. 229 - 243.
- [33] METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION, **Determination of Flow Rate of Free-Flowing Metal Powders Using the Hall Apparatus**, 03, Princeton - NJ, 1986.
- [34] METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION, **Determination of Apparent Density of Free-Flowing Metal Powders Using the Hall Apparatus**, 04, Princeton - NJ, 1986.

- [35] METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION, **Determination of Sieve Analysis of Metal Powders**, 05, Princeton - NJ, 1986.
- [36] PEISSKER, E., Sintered 90/10 Bronze from Powders with Differing Tin Contents, **Metal Powder Report**, vol. 38, No. 5, p. 259-262, 1983.



## 8. APÊNDICE I - TÓPICOS DE LUBRIFICANTES

### a) Viscosidade

Um dos principais critérios é a viscosidade do óleo, que é a medida do atrito interno das moléculas do líquido em movimento.

O movimento molecular é altamente dependente da temperatura, assim, a temperatura é a variável mais importante para a viscosidade assim, as duas devem ser consideradas como função uma da outra.

Alta viscosidade aumenta as propriedades de arraste e manutenção de ruído do filme de óleo. Ao mesmo tempo, entretanto, ela aumenta o atrito dinâmico, e isto é essencial para um compromisso a ser alcançado em todos os casos.

Por um lado, à máxima temperatura, a viscosidade do óleo não deve ser menor que aproximadamente 12 - 17 cSt, de outra forma, o óleo não lubrificará satisfatoriamente. Por outro lado, mesmo a muito baixas temperaturas, o óleo deve ainda fluir.

### b) Faixa de temperatura

Devido à sua composição química, a faixa de trabalho dos óleos é escolhido pelo conhecimento prévio da faixa de temperatura de trabalho do mancal. Para baixas temperaturas, este limite é o ponto de fluidez ou nível de alta viscosidade, e para altas temperaturas, o ponto de evaporação e de craqueamento, ou um nível de baixa viscosidade do lubrificante.

A baixas temperaturas, os óleos podem ser usados até poucos graus abaixo do ponto de fluidez. O ponto de fluidez é a menor temperatura em que uma amostra de óleo em um tubo especial para teste é ainda capaz de fluir, entretanto não existe relação entre o ponto de fluidez e a curva de viscosidade versus temperatura.

A temperaturas mais altas, é muito mais difícil determinar um limite superior crítico para a faixa de trabalho de um óleo lubrificante. Os limites

superiores fixados pelos fabricantes nunca devem ser aplicados, uma vez que são válidas em outras condições. Em vista da relativa pequena quantidade de óleo disponível, as situações fornecidas pelos fabricantes devem ser criticamente consideradas principalmente em casos onde é aplicada carga constante e é requerida uma longa vida em serviço.

Como uma referência na tabela 17 tem-se as temperaturas que podem ser consideradas como limites superiores para situações com carregamento constante.

Tabela 17 - Tipos de óleos e temperaturas máximas de funcionamento. [1]

Óleos minerais	máx 100°C
Esteres	máx 120°C
Hidrocarbonetos Sintéticos	máx 150°C
Poliglicóis	máx 150°C
silicones	máx 200°C
óleos perfluorizados poliéteres	máx 250°C

Para faixas de temperaturas acima de 120°C, é recomendado que testes de vida sejam realizados em cada caso individual.

#### c) Compatibilidade com plásticos

Quando buchas sinterizadas são utilizados em alojamentos de plástico deve-se ter em mente que, com exceção dos silicones, todos os lubrificantes atacam ou modificam as propriedades destes materiais. O grau de agressividade é variável, mas é mais pronunciado no caso de ésteres do que no caso de óleos minerais, hidrocarbonetos sintéticos ou poliglicóis.

Elastômeros tais como o politetrafluoretileno (PTFE), fluorino e borracha de fluorino-silicone são compatíveis com os óleos mais agressivos, os ésteres. Revestimentos com uma resina epoxy ou poliuretano são também muito resistentes.

#### d) Miscibilidade dos óleos

Segundo Mosca[03], não é possível afirmar nada que generalize a miscibilidade entre óleos para impregnação de buchas sinterizadas. Ao mesmo tempo deve-se ter em mente que a informação fornecida pelos fabricantes de lubrificantes se refere em cada caso a grandes quantidades e não pode, desta forma, ser diretamente relacionada ao campo de aplicação dos mancais sinterizados.

Se os óleos em questão são de tipos-séries, a mistura não é recomendada devido aos resultados inevitáveis e inesperados devidos à modificação das propriedades. Isto também é verdade em relação à delubrificação (extração do lubrificante) e re-impregnação de buchas sinterizadas com um óleo diferente. Uma vez que é praticamente impossível de executar uma retirada completa do lubrificante de grandes quantidades de peças.

Em alguns casos os usuários preferem impregnar as buchas em suas fábricas. Assim, mancais sinterizados em ferro devem ser protegidos contra corrosão durante o transporte ou armazenamento. Desta forma devem ser selecionados agentes anti-corrosão compatíveis com o óleo a ser impregnado. Por razões de segurança, entretanto, as buchas devem ser limpas antes da impregnação em cada caso.

Este tema é tratado em detalhe por W. Gross - Mischbarkeit von Schmierstoffen (Lubricant Miscibility) - VDI - Berichte N°111, 1966, pg.55-61.

#### e) Adição de lubrificantes sólidos

Em mancais autolubrificantes, a adição de lubrificantes sólidos tais como  $\text{MoS}_2$  usualmente promove um efeito somente temporário. Isto ocorre porque os poros do mancal sinterizado agem como um filtro, segurando as partículas de lubrificante sólido. Desde que diversas melhorias, particularmente durante o período de início de funcionamento, foram verificadas, por exemplo, a redução do nível de atrito e do ruído. É

recomendado que qualquer decisão sobre o uso de lubrificante sólido seja sustentada por ensaios.

#### f) Lubrificação adicional

Durante a operação de um mancais sinterizado, perdas de óleo ocorrem como resultado da centrifugação e da evaporação. Um mancais sinterizado se torna inviável para o uso quando aproximadamente 2/3 de sua reserva de óleo original é perdida. O suprimento de óleo a partir de um reservatório ao mancal pode, desta forma, aumentar consideravelmente a vida de um mancal sinterizado. Perdas como resultado da ação centrífuga podem ser reduzidas por algumas medidas estruturais tais como o uso de chanfros maiores nas bordas, colocação de chapas de proteção, arruelas elásticas, e feltros retentores para promover a realimentação do óleo.

Na prática existe uma grande quantidade de formas para acumular óleo para prover lubrificação completa:

1. feltro impregnado com óleo;
2. graxa absorvente;
3. fibras expandidas impregnadas com óleo e;
4. metais sinterizados com alta porosidade.

Feltros impregnados com óleo são colocados em torno do mancais na forma de anéis. O feltro deve ser de qualidade tal que o óleo seja mantido aprisionado no mancal por capilaridade a altas temperaturas, mas ao mesmo tempo permitindo que o mancal absorva e troque o óleo (circule). Além do mais, o feltro deve ser livre de resíduos causadores de corrosão e devem ser compatíveis com o óleo impregnado.

## TIPOS DE ÓLEOS LUBRIFICANTES

#### a) Óleos minerais

Em função de suas boas propriedades lubrificantes, os óleos mais utilizados em mancais sinterizados são os óleos minerais. Estes são capazes

de operar a temperaturas entre  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A maior parte dos óleos são cobertos pela DIN 51519 e pela classificação SAE. Os óleos minerais situam-se nos graus de viscosidade ISO VG 10 a ISO VG 1500.

Todos os óleos minerais contêm aditivos para alcançarem propriedades específicas. Como resultado, um índice de viscosidade e ponto de fluidez variam em faixas muito amplas. Em vista da diversidade de óleos com diferentes composições, a performance em áreas marginais é somente conhecida pelos fabricantes de buchas sinterizadas para alguns óleos.

Os óleos básicos derivam do óleo cru e conseqüentemente apresentam variações em sua composição. Óleos minerais são em princípio lubrificantes caros para mancais sinterizados.

#### b) Óleos sintéticos

Óleos sintéticos são lubrificantes produzidos por síntese. Existem diversos grupos, quais são quimicamente muito diferentes e dos quais os abaixo são utilizados para a impregnação de buchas sinterizadas:

- hidrocarbonetos sintéticos;
- poliglicóis;
- ésteres (ésteres carbônicos ácidos);
- silicones (incluindo silicones perfluorizados)
- óleos polieter perfluorizados.

É uma característica comum de todos os óleos sintéticos que devido ao método de fabricação eles sejam muito puros e devido à sua "estreita" distribuição de peso molecular eles sejam substâncias mais uniformes que os óleos minerais.

Isto tem uma influência favorável em várias propriedades importantes, tais como resistência ao envelhecimento e à oxidação, perdas por evaporação, índice de viscosidade e faixa de temperatura de trabalho.

Da mesma forma que os óleos minerais, os óleos sintéticos também são tratados com aditivos para que alcancem certas propriedades.

#### b.1) Hidrocarbonetos sintéticos

Hidrocarbonetos sintéticos são similares, em sua estrutura química básica, aos óleos minerais. Entretanto, em contraste com estes, ao invés de uma ampla gama de grupos de hidrocarbonetos de tamanhos variados, eles contêm uma combinação muito mais estreita de tamanhos de um único tipo molecular. Desta maneira um melhor comportamento viscosidade/temperatura e uma melhor lubrificação são obtidos.

#### b.2) Poliglicóis

Poliglicóis são distinguidos pela boa lubrificação e uma alta capacidade de carga do mancal, especialmente sob condições de atrito misto. Eles desta forma apresentam vantagens em baixas velocidades de deslizamento e altas solicitações. Um outro campo de aplicações é a altas temperaturas. Com poliglicóis, o envelhecimento é manifestado com uma diminuição da viscosidade. Poliglicóis não podem ser misturados com óleos minerais.

#### b.3) Ésteres

Em comparação com os óleos minerais, os ésteres possuem um menor efeito lubrificante. Com o uso de hidrocarbonetos sintéticos e poliglicóis, sua importância diminuiu bastante. Além disso, eles são mais caros. A faixa de temperatura de funcionamento não é muito larga e não pode ser muito estendida tanto para cima como para baixo. Com óleos ésteres devem ser mantidas temperaturas extremamente baixas. Em comparação com os outros grupos os ésteres são muito agressivos aos plásticos e sua compatibilidade deve ser verificada em cada caso individual.

#### b.4) Silicones

Os óleos silicones devem ser classificados como maus lubrificantes. Eles também possuem a tendência a se espalharem e são caros e seus vapores podem interferir negativamente em contatos elétricos. Desta forma

eles devem ser utilizados somente após a verificação de sua eficiência através de testes. Existem entretanto alguns casos onde ocorrem vantagens que são de importância primordial:

- alta resistência à temperatura (podem ser utilizados até 150 °C);
- apresentam o maior índice de viscosidade dos diversos tipos de óleo;
- são fisiologicamente pouco agressivos e quimicamente neutros;

Melhores condições de lubrificação em particular, maior capacidade de carga são obtidas com óleos silicões perfluorizados. Sob condições de laboratório, foram obtidos resultados muito bons mesmo a altas temperaturas.

#### b.5) Óleos perfluorizados poliéteres

Óleos perfluorizados poliéteres são de longe os melhores a altas temperaturas. Estes óleos possuem excelente estabilidade térmica e resistência à oxidação. Durante os testes com estes óleos não foi verificada nenhuma falha em mancal até que o óleo no reservatório fosse gasto. Infelizmente o seu alto preço inviabiliza o seu uso.

### CUIDADOS COM BUCHAS IMPREGNADAS

Depois da impregnação, as buchas são embaladas em caixas ou sacos plásticos, desta forma o óleo impregnado não é perdido pela absorção por outros materiais. Durante o armazenamento prolongado, pode ocorrer que o excesso de óleo da superfície do mancal se deposite no fundo da embalagem, o que não reduz a quantidade de óleo do mancal.

Quando o mancal é montado automaticamente, recomenda-se a sua centrifugação com o objetivo de limpar sua superfície de algum excesso de óleo.

Um pequeno excesso de óleo pode ser vantajoso para o início do funcionamento dos mancais. Quando conveniente, este excesso de lubrificante pode ser provido durante a etapa de montagem.



## 9. APÊNDICE 2 - CARACTERÍSTICAS DE EIXOS A SEREM UTILIZADOS EM BUCHAS AUTOLUBRIFICANTES

Uma vez que sempre existem poros abertos no lado de pressão do mancal, a espessura do filme de óleo obtido em funcionamento sempre será consideravelmente menor que aqueles obtidos com mancais sólidos nas mesmas condições. Na prática isto significa que devem ser impostas mais restrições à qualidade da superfície do eixo, com o objetivo de prevenir o contato metálico entre o eixo e o mancal, ou para manter o menor desgaste possível durante o contato metálico. Assim, a rugosidade do eixo deve estar certamente abaixo de  $1\mu\text{m}$ , sendo que rugosidades  $R_t$  entre  $0,1$  e  $0,5\mu\text{m}$  são usuais.

Os eixos a serem utilizados com buchas sinterizadas podem ser confeccionados em aços ligados ou não, tratados termicamente ou não. A utilização de aços inoxidáveis não é descartada, entretanto são observadas piores propriedades lubrificantes, pois o óleo adere menos à superfície passivada do eixo. Dificuldades em relação à molhabilidade podem também ocorrer em eixos revestidos com cromo ou níquel.

10. APÊNDICE 3 - FLUTUAÇÃO DA VARIAÇÃO DIMENSIONAL, NO SENTIDO DA ALTURA, MEDIDA PARA OS LOTES PROCESSADOS NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE SINTERIZAÇÃO.

Buchas Esféricas

T <sub>sint.</sub> (°C)	T <sub>C</sub> (min)	P <sub>verde3</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	3σ
780	2	6,2	0,06
780	2	6,4	0,06
780	2	6,6	0,06
780	2	6,8	0,05
780	2	7	0,05
780	3	6,2	0,06
780	3	6,4	0,05
780	3	6,6	0,01
780	3	6,8	0,11
780	3	7	0,06
800	2	6,2	0,01
800	2	6,4	0,03
800	2	6,6	0,11
800	2	6,8	0,08
800	2	7	0,14
800	3	6,2	0,12
800	3	6,4	0,05
800	3	6,6	0,12
800	3	6,8	0,08
800	3	7	0,09

T <sub>sint.</sub> (°C)	T <sub>C</sub> (min)	P <sub>verde3</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	3σ
820	2	6,2	0,05
820	2	6,4	0,06
820	2	6,6	0,07
820	2	6,8	0,06
820	2	7	0,06
820	3	6,2	0,06
820	3	6,4	0,07
820	3	6,6	0,05
820	3	6,8	0,06
820	3	7	0,09
830	2	6,2	0,04
830	2	6,4	0,06
830	2	6,6	0,04
830	2	6,8	0,04
830	2	7	0,12
830	3	6,2	0,12
830	3	6,4	0,05
830	3	6,6	0,06
830	3	6,8	0,08
830	3	7	0,07

T <sub>sint.</sub> (°C)	T <sub>C</sub> (min)	P <sub>verde3</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	3σ
840	2	6,2	0,10
840	2	6,4	0,07
840	2	6,6	0,08
840	2	6,8	0,07
840	2	7	0,08
840	3	6,2	0,08
840	3	6,4	0,05
840	3	6,6	0,09
840	3	6,8	0,08
840	3	7	0,07
850	2	6,2	0,06
850	2	6,4	0,009
850	2	6,6	0,08
850	2	6,8	0,07
850	2	7	0,08
850	3	6,2	0,09
850	3	6,4	0,06
850	3	6,6	0,06
850	3	6,8	0,05
850	3	7	0,07

## Buchas cilíndricas com flange

T <sub>sint.</sub> (°C)	T <sub>c</sub> (min)	P <sub>verde</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	3σ
780	2	6,2	0,05
780	2	6,4	0,05
780	2	6,6	0,05
780	2	6,8	0,04
780	2	7	0,04
780	3	6,2	0,08
780	3	6,4	0,05
780	3	6,6	0,05
780	3	6,8	0,08
780	3	7	0,04
800	2	6,2	0,04
800	2	6,4	0,09
800	2	6,6	0,10
800	2	6,8	0,04
800	2	7	0,18
800	3	6,2	0,02
800	3	6,4	0,05
800	3	6,6	0,05
800	3	6,8	0,07
800	3	7	0,08

T <sub>sint.</sub> (°C)	T <sub>c</sub> (min)	P <sub>verde</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	3σ
820	2	6,2	0,05
820	2	6,4	0,05
820	2	6,6	0,04
820	2	6,8	0,05
820	2	7	0,09
820	3	6,2	0,03
820	3	6,4	0,05
820	3	6,6	0,08
820	3	6,8	0,07
820	3	7	0,05
830	2	6,2	0,05
830	2	6,4	0,04
830	2	6,6	0,07
830	2	6,8	0,04
830	2	7	0,04
830	3	6,2	0,09
830	3	6,4	0,04
830	3	6,6	0,05
830	3	6,8	0,05
830	3	7	0,14

T <sub>sint.</sub> (°C)	T <sub>c</sub> (min)	P <sub>verde</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	3σ
840	2	6,2	0,08
840	2	6,4	0,08
840	2	6,6	0,10
840	2	6,8	0,09
840	2	7	0,04
840	3	6,2	0,05
840	3	6,4	0,08
840	3	6,6	0,05
840	3	6,8	0,05
840	3	7	0,11
850	2	6,2	0,05
850	2	6,4	0,11
850	2	6,6	0,11
850	2	6,8	0,07
850	2	7	0,05
850	3	6,2	0,05
850	3	6,4	0,08
850	3	6,6	0,07
850	3	6,8	0,11
850	3	7	0,11

FLUTUAÇÕES NAS MEDIÇÕES DE VARIAÇÃO DIMENSIONAL, NO SENTIDO DIÂMETRO, DE BUCHAS ESFÉRICAS E CILÍNDRICAS COM FLANGE COM DENSIDADE  $6,4 \text{ g/cm}^3$  E TEMPO DE CARGA 3 min.

MANCAL	$T_{\text{sint.}}$ (°C)	$3\sigma_{\text{di}}$	$3\sigma_{\text{de}}$	$3\sigma_{\text{d.flange}}$
esférico	780	0,05	0,04	
esférico	800	0,09	0,04	
esférico	820	0,05	0,06	
esférico	830	0,11	0,04	
esférico	840	0,09	0,05	
esférico	850	0,12	0,04	
flangeado	780	0,05	0,04	0,03
flangeado	800	0,05	0,04	0,03
flangeado	820	0,07	0,04	0,04
flangeado	830	0,05	0,10	0,04
flangeado	840	0,07	0,07	0,04
flangeado	850	0,14	0,07	0,05