

**PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA BASEADA NA TRIZ, PARA O PROJETO
CONCEITUAL DE MANCAIS AEROSTÁTICOS CERÂMICOS POROSOS RADIAIS
APLICADOS A CABEÇOTES DE MÁQUINAS DE ULTRAPRECISÃO**

R. D. Ximenes; Z. C. Silveira; C. A. Fortulan; B. M. Purquerio
Avenida Trabalhador São-Carlense, 400, Centro, São Carlos – SP
CEP: 13566-590. e-mail: silveira@sc.usp.br
LTC-SEM-EESC-USP

RESUMO

Este trabalho apresenta a concepção e o desenvolvimento de um protótipo de mancal aerostático poroso, baseado na técnica de metodologia de projeto TRIZ. A partir de um conjunto de amostras de material cerâmico, com diferentes concentrações de agentes porogênicos selecionou-se a melhor composição, em função das propriedades de permeabilidade indicadas para mancais lubrificados com ar. Para a conformação dos mancais radiais foi utilizada uma prensa isostática, seguida de usinagem à verde e sinterização a 1550°C. O protótipo é constituído de três mancais aerostáticos e um eixo. Os mancais aerostáticos são montados em buchas de aço inoxidável, que provêm uma câmara de alimentação de ar. A metodologia proposta para a fase conceitual foi validada, através da construção e realização de testes com o protótipo. A estrutura cerâmica porosa obtida também foi validada, através de testes de formação de um filme de ar lubrificante estável, sob a aplicação de uma carga de 10 N no eixo.

Palavras chave: metodologia de projeto; mancais aerostáticos porosos; cabeçotes de ultraprecisão; TRIZ.

INTRODUÇÃO

A tendência atual de miniaturização de equipamentos e dispositivos tem acelerado o desenvolvimento de microcomponentes, aplicados as mais diversas áreas do conhecimento humano. A fabricação de ferramentas e componentes como microfresadoras, micro-serras, mini-mancais de rolamentos e estruturas capilares são exemplos tecnológicos de demanda na área de Nanotecnologia. O projeto de máquinas de ultraprecisão, principalmente máquinas com tecnologia *dicing*, requer novas opções de materiais e tecnologia para componentes mecânicos, no qual a seleção e desenvolvimento do par tribológico mancais-eixo é específico para fornecer rigidez, precisão e repetibilidade nos movimentos de micro-usinagem. A possível substituição do conceito construtivo de injeção de ar através de orifícios para poros ou superfícies porosas, implica em uma série de vantagens, principalmente pela redução de custo, refletida pela usinagem onerosa e dificultada pelas tolerâncias estreitas. Esta condição atribui ao mancal com estrutura cerâmica porosa uma série de vantagens representadas, por exemplo, pela redução nos custos de manufatura, facilidade de montagem, menor tempo e periodicidade de manutenção e melhores resultados de projeto e operação, considerando parâmetros de capacidade de carga e rigidez. Para a manutenção da pressão na folga radial, a permeabilidade é uma propriedade física fundamental no desenvolvimento e projeto de mancais aerostáticos porosos. A permeabilidade é a medida quantitativa da capacidade de um meio poroso conduzir um fluido, sendo fundamental para o projeto e manufatura de mancais lubrificados a ar com superfícies porosas. Portanto, este trabalho propõe o desenvolvimento de mancais cerâmicos porosos lubrificados com ar, no qual o projeto conceitual é guiado pela metodologia de projeto TRIZ, para cabeçotes de alta-rotação com aplicação em máquinas com tecnologia *dicing*, para fabricação de microcomponentes e fatiamento de amostras de alta dureza na área de biomateriais.

Metodologia TRIZ (Teoria da Resolução de Problemas Inventivos)

Segundo Back *et al.* (2008), a TRIZ (*Teorija Rezhenija Izobretatel'skisch Zadach*) é uma metodologia ou uma filosofia de projeto, na qual se busca uma solução ideal para um problema dentro do campo de conhecimento atual, que permite sua

evolução sistemática conforme o avanço do conhecimento. A pesquisa da TRIZ (ou inovação sistemática) considera a hipótese de que há princípios inventivos universais, que formam uma base para soluções inovadoras, e que estes princípios poderiam ser identificados e codificados e sistematizados. O método proposto por Altshuller G. na antiga Rússia, na década de 40 era voltado ao estudo sistemático de problemas técnicos ou *hard TRIZ*, uma vez que ele verificou que os métodos intuitivos demandavam muito esforço e muitas vezes, não forneciam soluções viáveis. Considerando essa sistemática, Altshuller procurou através do levantamento de um elevado de número de patentes determinar um modo de solucionar problemas que conduzisse a invenções. Uma solução inventiva é aquela que resolve uma contradição, como por exemplo, aumentar a capacidade de carga de um componente, não elevando seu custo ou peso. Na TRIZ são definidos 39 parâmetros de engenharia que tem origem nas patentes pesquisadas por Altshuller. As soluções de engenharia se situam entre modificações e melhorias desses parâmetros. Os princípios foram identificados e descritos, através da repetição em muitos campos de conhecimento, como soluções para muitos problemas de engenharia. O cerne filosófico da TRIZ consiste nos fundamentos de Idealidade, Contradição, Recursos, Sistemática e Funcionalidade. A TRIZ fornece um padrão, no qual as soluções descritas nas patentes utilizavam certos princípios para resolver as contradições ou conflitos entre parâmetros de engenharia que em conjunto, denominaram-se de 40 princípios inventivos ou Método dos Princípios Inventivos (MPI). O MPI é o método da TRIZ mais difundido, e os princípios inventivos são heurísticas obtidas a partir da generalização ou agrupamento de soluções repetidamente utilizadas na criação, desenvolvimento e melhoria de sistemas técnicos de diferentes áreas, com base em patentes. A forma mais direta da utilização dos princípios inventivos consiste na análise de cada um desses princípios, tentando aplicá-los para a melhoria do sistema técnico. As técnicas básicas de TRIZ são: a teoria da matriz de contradição, Resultado Final Ideal (RFI), Fonte de Recursos e as mais avançadas como o algoritmo ARIZ (Algoritmo de Resolver de Problemas Inventivos) e a modelagem campo-substância (Su-C) (Slocum, *et al.* 2009), que apresentam o procedimento de busca de solução, representada pela Figura 1.

Análise preliminar e definição do problema: O par tribológico eixo-mancal é fundamental para o projeto de um eixo-árvore de alta velocidade (*High Speed Spindle*). Neste trabalho, a escolha do tipo de mancal mais indicado, dentre os

diversos tipos de mecanismos, é o objetivo principal da aplicação da metodologia TRIZ.

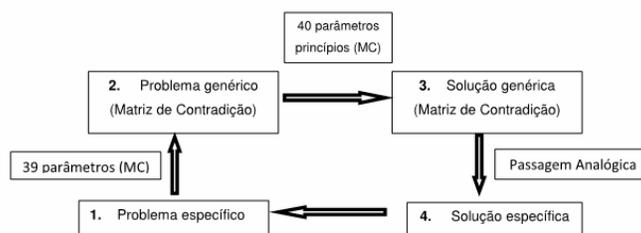


Figura 1 – Fluxograma genérico da TRIZ (adaptado de Slocum, et al. 2009)

MATERIAIS E MÉTODOS

Todo o sistema técnico possui uma *função positiva principal* que pode ser apresentado como um conjunto de funções elementares executadas em uma determinada seqüência; um mancal pode ser definido como um elemento, no qual o movimento de translação em qualquer direção deve ser minimizado, tendo como único grau de liberdade a rotação relativa ao eixo.

Aplicação da TRIZ para o problema de engenharia

A *Idealidade*, é uma solução ideal para um sistema. Se o eixo do protótipo em questão girasse a uma elevada velocidade, por exemplo, em torno de 100.000 RPM representaria qualidade de usinagem, a precisão de produtos e o ganho de produtividade. O *Resultado Final Ideal* é a descrição de uma situação sem as restrições técnicas existentes, para efetivar a solução que norteia a busca da solução final. O mancal, parte integrante (subsistema) do sistema do eixo-árvore como elemento de conexão entre uma parte fixa (eixo) e a parte móvel (alojamento da carcaça), deve fornecer as suas funções de apoiar o eixo (absorvendo as forças inerentes do trabalho) impedindo que ocorra o atrito entre a parte fixa e parte móvel. Para que o sistema técnico se torne mais próximo do *Resultado Final Ideal* pode-se remover ou minimizar a função prejudicial que é o atrito e o calor por ele gerado (reduzir o consumo de energia) que mantêm as funções úteis. Essa condição pode ser alcançada obtendo-se um mancal com uma tecnologia/material, que resulte em baixo coeficiente de atrito.

A *Contradição atual do sistema*, para a metodologia TRIZ, vem a ser um conflito entre dois requisitos mutuamente excludentes, de uma mesma característica de um elemento do sistema. A *contradição atual do sistema* pode ser definida como uma **contradição técnica** representada pela velocidade do eixo: produção elevada *versus* atrito entre as superfícies. Essa condição implica no aumento do calor gerado e no desgaste das superfícies eventualmente em contato. Na análise do problema, o algoritmo ARIZ (Algoritmo para solução de Problemas Inventivos), que é uma das ferramentas de solução da TRIZ, pode ser aplicado. A formulação do problema é feita através do Questionário de Situação Inovadora (ISQ), que procura obter respostas ao maior número possível de informações relevantes (Demarqui, 2005) sendo apresentados apenas os itens de maior relevância.

Questionário de Solução Inovadora (QSI): Resultados Parciais

1. Informações Sobre o Sistema

1.1 Nome do Sistema: Mancal

1.2 Funções Úteis Principais: Apoiar o eixo, facilitar a rotação (reduzindo o atrito) e limitar os outros movimentos.

1.3 Estrutura Atual ou desejada do sistema: O mancal como elemento de conexão entre uma parte fixa (eixo) e a parte móvel (alojamento da carcaça) deve fornecer as funções de apoiar o eixo (absorvendo as forças inerentes do trabalho), impedir que ocorra o atrito entre a parte fixa e parte móvel e limitar outros movimentos, sem existir, sem ocupar lugar no espaço, sem dissipar energia.

1.4 Funcionamento do Sistema (breve descrição): Elemento de máquina que serve de apoio e guia para o eixo, possuindo a característica de diminuir o atrito provocado pelo movimento relativo de rotação entre a parte fixa e a parte girante conectadas por ele.

1.5 Ambiente dos Sistemas (condições em torno do sistema): O sistema inteiro interage com o ar ambiente e o motor como fonte de força para girar.

2. Recursos Disponíveis

2.1 Recursos de Substância: Os recursos da substância que estão atualmente no sistema são o eixo, o alojamento, o mancal, o ar, a umidade, o calor e o lubrificante.

2.2 Recursos de Campo: Os recursos do campo atuais no sistema são o campo do tipo mecânico que sustenta o eixo inibe os outros movimentos decorrentes das forças que atuam no processo e, cria o atrito entre as partes, e o campo do tipo térmico que é gerado pelo atrito.

2.3 Recursos de Espaço: O recurso de espaço é o volume ocupado pelo sistema de mancal.

2.4 Recursos de Tempo: O recurso do tempo é o tempo de usinagem.

2.5 Recursos Funcionais: O recurso funcional é a função mecânica pela qual o alojamento e o mancal sustentam o eixo e o mantêm girando com o mínimo esforço durante o processo de usinagem.

3 Informações Referentes à Situação do Problema

3.1 Melhoria desejada no sistema e/ou à função a eliminar (problema a ser resolvido). A melhoria a ser conseguida é o aumento da velocidade do eixo, que aumenta por sua vez a velocidade da ferramenta que torna o sistema mais produtivo. Outra melhoria é a qualidade da usinagem (rigidez dinâmica).

4. Alterações no Sistema

4.1 Alterações permissíveis ao sistema: O sistema deve cumprir as suas funções úteis utilizando tecnologia disponível.

4.2 Limitações às alterações no sistema: As mudanças no sistema devem ser tecnologicamente aplicáveis na indústria atual e não devem aumentar o custo de produção.

Parâmetros (PE) representativos do problema: Velocidade (9); a estabilidade do objeto móvel (13) (desgaste); a durabilidade do objeto móvel (15); a perda de energia (22) – dissipação do calor; o desperdício de substância (23) – desgaste; a quantidade de substância (26) – desgaste e a produtividade (39).

Para resolver o problema descrito citado, deve-se combinar os parâmetros mais representativos para a solução. O parâmetro a ser melhorado refere-se ao nº. “09 Velocidade”, e o parâmetro que não deve degradar-se é o de nº 13, “estabilidade do objeto móvel”. Os quatro princípios genéricos correspondente nos parênteses são os Princípios (PI): 02 – Extração; 28 – Substituições mecânicas; 33 – Homogeneidade e 40 – Materiais compostos.

Um princípio promissor é o de nº 28 que diz para mudar o sistema mecânico, ou que pode se mudar o sistema mecânico para um sistema de campos (filme fluído, magnético e eletromagnético, de modo que o atrito entre o eixo e mancal seja reduzido. O problema também pode ser descrito como: o parâmetro a ser melhorado é nº 15 "Durabilidade do objeto móvel", e o parâmetro que não deve degradar-se é o de nº 13 "Estabilidade do objeto móvel". Os três princípios genéricos correspondentes são os Princípios (PI): 03 – Qualidade local; 13 – Inversões (ao contrário) e 35 – Mudanças de parâmetros e/ou propriedades. O princípio promissor neste caso é o de nº 35 que diz para mudar o estado do objeto, que pode entendido como mudar a dureza, a densidade e/ou o revestimento da superfície, ou seja, obter uma estrutura porosa, no caso.

Seleção e processamento do material

Foi obtido um conjunto de amostras, para a fabricação dos mancais cerâmicos porosos utilizando diferentes concentrações de agente formador de poros e diferentes tempos de moagens do material cerâmico. A determinação da forma e da distribuição dos poros da estrutura porosa foi obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por porosimetria por intrusão de mercúrio. O método para obtenção de poros escolhido considerou a adição de um componente que fosse disperso, degradável e volátil com o aumento da temperatura.

Materiais

Como componente estrutural do mancal foi utilizada a Alumina Calcificada A1000 SG (Almatis) com diâmetro médio de partícula de 0,5 µm e área superficial de 6,0 a 8,0 m²/g. Como agente formador de poros foi utilizada a sacarose PA (Synth). e como ligante o termoplástico PVB (Poli-Vinil-Butirol - Butvar B-98).

Conformação dos mancais cerâmicos porosos radiais

As amostras porosas no formato de um mancal radial foram processadas com o material que apresentou a melhor permeabilidade (Silveira, 2006), ou seja, uma porosidade induzida na proporção de 55%. Os mancais porosos foram conformados a partir dos aglomerados por prensagem isostática do tipo *wet bag* a 100 MPa e em seguida foram usinados à verde, para se obter a seguintes dimensões nominais,

após a sinterização: 14,0 mm (Diâmetro externo); 11,0 mm (Diâmetro interno) e 17 mm de comprimento.

Sinterização

Após a usinagem à verde a sacarose, foi removida quase completamente dos mancais em temperatura gradativa até 180°C. Em seguida, os mancais porosos foram sinterizados em forno elétrico, seguindo as taxas de 1°C/min da T_{amb} até 370°C, 5°C/min até atingir a temperatura de 600°C, e 10°C/min até 1500°C com patamar de 50 minutos a 1500°C.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A superfície do mancal foi desgastada com lixas de carbetto de silício (*mesh* #240, #320, #400 e #60, respectivamente) em meio aquoso. Em seguida, a superfície foi polida com pastas diamantadas (6 mm, 3mm e 1mm, respectivamente) e atacadas ao ar à 1420°C durante 6 minutos, para revelação dos contornos de grãos, conforme Figura 2, na qual observa-se uma porosidade homogênea e uniforme.

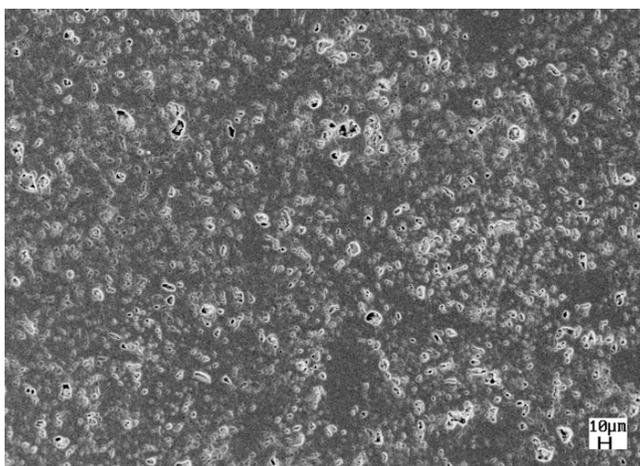


Figura 2 – Microscopia por Varredura de Imagem (MEV), para uma concentração induzida de 55% de agente poroso.

Porosimetria por Intrusão de Mercúrio

A avaliação por porosimetria estabelece as relações entre as partes de sacarose adicionada e a porosidade volumétrica final. Pode-se avaliar também por esse

método, a distribuição de tamanhos de poros na matriz de alumina em função das concentrações de agente poroso, como apresentado na Figura 3. A distribuição dos tamanhos dos poros apresentou-se satisfatória, com uma curva de distribuição normal bem definida, com pouca dispersão em relação ao valor médio de poros de 0,8 μm . A porosidade induzida de 55% em volume de sacarose resultou em um valor aproximado de 25% de porosidade final no mancal.

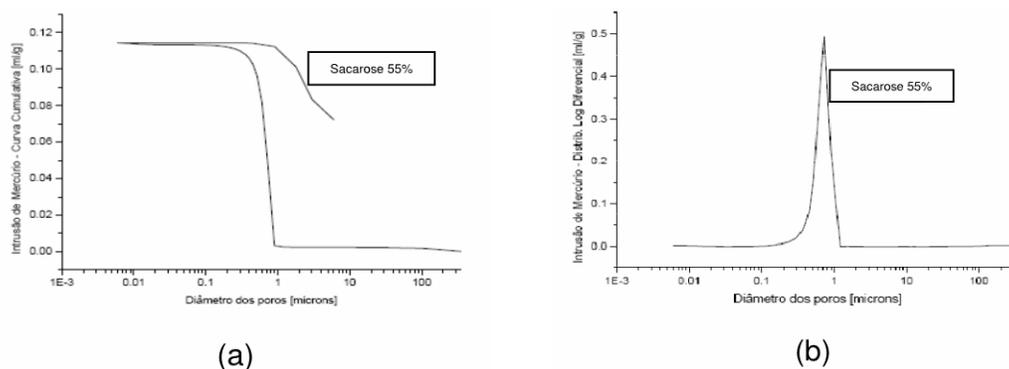


Figura 3 - Resultado da porosimetria por intrusão de mercúrio para concentração de 55%.
(a) Curva cumulativa. (b) Curva Normal (Silveira, 2006).

A permeabilidade da amostra com 55% de porosidade induzida apresentou um coeficiente de permeabilidade viscoso k_1 de $6,81 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ e um coeficiente de permeabilidade inercial de $1,2 \times 10^{-4} \text{ m}$, com porosidade média de 26,26 % e área superficial de $2,304 \text{ m}^2/\text{g}$, no qual o valor de k_1 contempla os valores mínimos de permeabilidade viscosa indicada pela literatura pertinente (Silveira, 2006).

Projeto do mancal e montagem para ensaio

Foram projetados mancais aerostáticos cerâmicos porosos radiais, para um eixo de diâmetro 11 mm. Cada mancal é composto por um elemento cerâmico poroso (bucha), revestida por uma bucha em aço inoxidável, que forma a câmara de alimentação de ar no mancal. Os dois elementos mancal e camisa, são montados e colados com resina epoxi. A Figura 4 ilustra um esquema deste mancal e as dimensões da bucha cerâmica. Observa-se que embora o comprimento do mancal seja de 17 mm, os 3 mm excedentes de cada lado foram utilizados para fixação em montagem não tendo a permeabilidade considerada. A Figura 5 ilustra o projeto conceitual gerado e a Figura 6 apresenta o protótipo concebido, para validar a metodologia e o material poroso desenvolvido. As propostas de validação constituiram-se em: testar a permeabilidade do material poroso, conformado sob a

forma de um mancal radial, e baseado no giro livre do eixo, à pressão de alimentação de ar de 7 kgf/cm^2 ($0,7 \text{ MPa}$) e estabelecer o carregamento limite, para exceder a folga de $0,02 \text{ mm}$, no qual deverá ocorrer o contato do eixo com a bucha cerâmica.

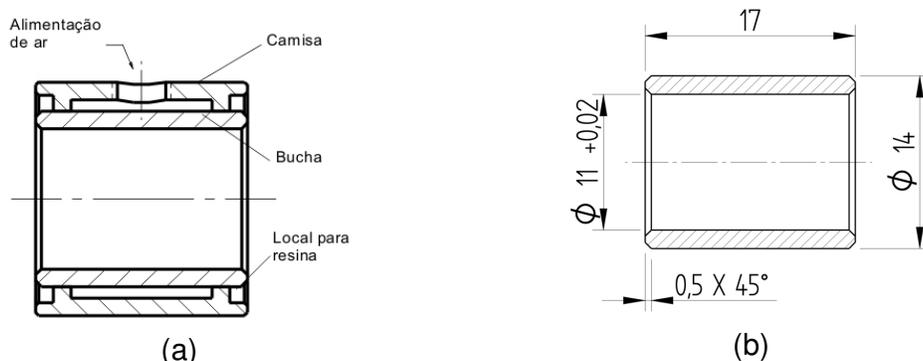


Figura 4 – Mancal aerostático poroso. (a) Montagem. (b) bucha cerâmica porosa.

Um peso foi posicionado no mancal intermediário conforme mostra a Figura 6, para verificar se a porosidade induzida seria suficiente, para que houvesse uma permeabilidade mínima que permitisse a sustentação e giro livre do eixo.

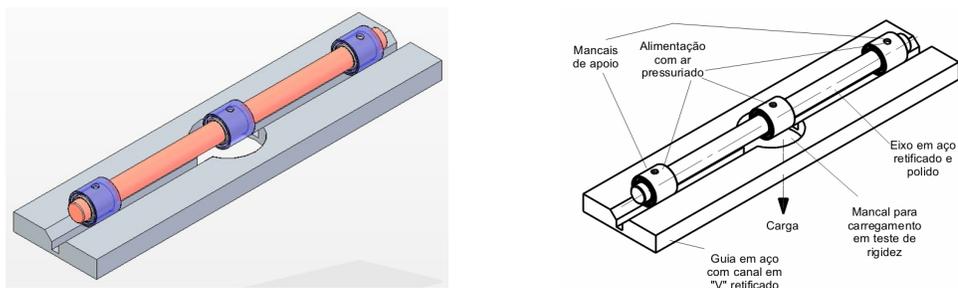


Figura 5 – Protótipo conceitual do banco de ensaio, para estimativa da capacidade de carga.

Verificou-se através dos ensaios, que houve a efetiva passagem de ar pela estrutura porosa, com a formação aparentemente uniforme de um filme lubrificante de ar. Com a pressão de alimentação de 7 kgf/cm^2 o sistema suportou uma carga estática de até 10 N . Valores acima dessa carga, promoveu o contato entre o mancal e o eixo.

CONCLUSÕES

A aplicação da metodologia TRIZ conduziu adequadamente uma solução construtiva de mancais aerostáticos cerâmicos porosos especificados para cabeçotes de usinagem de ultra-precisão, através dos parâmetros de engenharia e princípios

inventivos. O filme de ar gerado na folga radial do mancal-eixo, com aparente estabilidade, forneceu uma capacidade de carga de 10N, sem geração de calor. O projeto ainda demanda melhorias, quanto ao sistema e distribuição de alimentação.

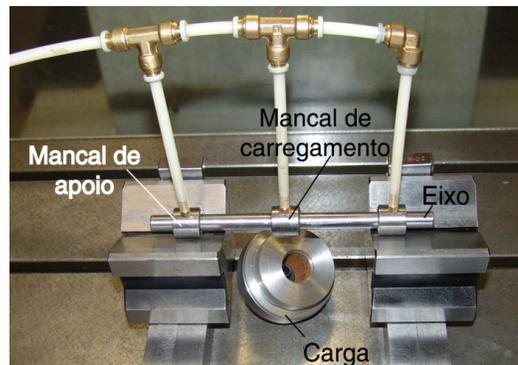


Figura 6 – Protótipo inicial, obtido pela TRIZ.

A partir das amostras desenvolvidas, o material manufaturado com 55% de agente porogênico se mostrou adequado e funcional quanto à porosidade e a permeabilidade, gerando um filme de ar lubrificante aparentemente estável na folga radial dos mancais cerâmicos porosos. Na seqüência deste trabalho o comportamento estático e dinâmico, envolvendo melhorias da capacidade de carga, rigidez e amortecimento deverão ser investigados. Em termos de fabricação, o mancal aerostático cerâmico poroso oferece uma vantagem significativa sobre os mancais porosos metálicos, porque a usinagem por retificação não ocasiona a deformação nos poros, que pode eventualmente bloquear a passagem de ar, como ocorre com os materiais metálicos porosos, que são dúcteis.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP e ao CNPq pelo suporte financeiro fornecido ao projeto; ao técnico mecânico José Risardi, do Laboratório de Máquinas-Ferramenta do SEM, EESC-USP pelo auxílio na fabricação do protótipo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BACK, N.; OGLIARI, A.; DIAS, A.; da SILVA, J.C. *Projeto integrado de produtos*. Editora: Manole. 2008.

2. CARVALHO, M.A.C.; BACK, N. Uso de conceitos fundamentais de TRIZ e do MPI, no desenvolvimento de problemas. *3º. Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto*. Florianópolis, SC, Brasil. 2001.
3. DEMARQUI, E. TRIZ – *Teoria para resolução de problemas inventivos aplicada ao planejamento de processo na indústria automotiva*. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 140p. 2005.
4. SILVEIRA, Z.C; PURQUERIO, B.M.; FORTULAN, C.A. Projeto, fabricação e caracterização de estruturas cerâmicas porosas, para aplicação em mancais aerostáticos. *17º. CBECIMat, 17º. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*. Foz do Iguaçu, PR, 2006.
5. SLOCUM, M.S.; DOMB, E.; LUNDERG, C.; Solution Dynamics as a function of resolution method (physical contradiction v. technical contradiction). *The TRIZ Journal*. 2005.

METHODOLOGY DEVELOPMENT BASED ON TRIZ TO THE CONCEPTUAL
DESIGN TO AEROSTATIC RADIAL POROUS BEARING APPLIED TO SPINDLES
OF THE ULTRAPRECISION MACHINES

ABSTRACT

This work presents a design conceptual and development of a prototype of the aerostatic ceramic porous bearings based on design methodology TRIZ. Considering a set of the samples from ceramic material, with different concentrations of pore forming agents was chosen the porous structure, in function of permeability properties indicated to the lubricated air bearings. The wet bag process was used to manufacturing of the bearings, following of green machining and sintering at 1550°C. The prototype is constituted by three bearings and one shaft. The aerostatic porous bearings were glued in stainless steel bush to provide chamber of the air alimentation. The proposed methodology to the conceptual design was validated with construction and experimental tests of physical prototype. The technical viability of the porous structure manufacturing was confirmation. The porous ceramic structure developed, with 55% pore forming agent allowed the stable formation of an air film in the radial clearance with application of a maximum load of 10N on the shaft.

Key-words: *design methodology; porous bearings; spindle; TRIZ.*