

A resolução de problemas de física: uma possibilidade de independência cognitiva

Elinoel Júlio dos Santos Valverde
Professor do CEFET-BA
Valverde@cefetba.br

Nildon Carlos Santos Pitombo
Professor da UEFS

Elias Ramos de Souza
Professor do CEFET-BA

Resumo

Com o objetivo de desenvolver a independência cognitiva dos alunos do Ensino Médio do Centro Federal de Educação Tecnológica da Bahia, CEFET-BA, formula-se uma proposta metodológica no ensino de física à qual é incorporada uma estratégia genérica de resolução de problemas baseada em etapas.

Para atingir esse objetivo, realizou-se uma intervenção na prática pedagógica em turmas da 2ª e 3ª séries, com um total de 68 alunos na faixa etária de 16 a 18 anos. Os resultados indicam que, após a aplicação da metodologia, constataram-se mudanças cognitivas e afetivas que favoreceram o atuar dos estudantes de forma eficaz, estimulando o desenvolvimento da independência cognitiva e permitindo aproximar mais o processo de ensino aprendizagem do processo investigativo.

Palavras-Chave

Ensino de física. Construção do conhecimento. Cognição e autonomia.

Introdução

Na contemporaneidade há um conjunto de problemas e necessidades gerais, que nos são apresentados cotidianamente e, para tanto, precisamos demonstrar um preparo psicológico para resolvê-los satisfatoriamente. São eles: a sobrevivência humana, a conservação da cultura criada pelo homem, a transformação e desenvolvimento para melhores condições de vida de toda a humanidade.

Desse modo, a sociedade tem necessidade de um homem capaz de enfrentar tais situações críticas e, independentemente, sendo capaz de tomar decisões e comprometido com transformações técnicas, econômicas e sociais.

Assim, a tendência construtivista é tomada como paradigma explicativo atual do processo de aprendizagem. Esse fenômeno obedece ao resgate da subjetividade, da participação do sujeito e está presente nas tendências humanísticas de hoje que se distinguem pelo seu caráter progressista. Em países da Europa, dos Estados Unidos, da América latina e no Brasil, o construtivismo, como movimento e base de

modelos pedagógicos, sustenta as reformas educativas que esses países estão implantando, CARRETERO, 1997.

As Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio buscam reconciliar humanismo e tecnologia, exercício real da cidadania plena e conhecimento dos princípios científicos que presidem a produção moderna, formação ética e autonomia intelectual.

A assimilação e a aplicação das novas descobertas da ciência e da técnica é um instrumento para o trabalho criativo dos profissionais de diversas áreas do conhecimento. Sobretudo os professores, devem sistematicamente aperfeiçoar o processo de ensino aprendizagem.

É nesse contexto que a pedagogia, como ciência, tem, atualmente, grandes desafios. Dentre eles, está a criação de condições que permitam a participação ativa, reflexiva e independente dos estudantes no processo de aprendizagem.

A Física, como disciplina que integra os três anos do Ensino Médio, tem um papel estratégico no desenvolvimento econômico e social do país em virtude do seu alcance na compreensão do universo produtivo, conforme assinalam os Parâmetros Curriculares Nacionais, PCNs 1999, um documento revelador do aperfeiçoamento da organização do sistema educacional brasileiro.

A resolução de problemas ocupa um lugar relevante no processo educacional do Ensino Médio, como estratégia de ensino, como atividade de aprendizagem e como instrumento de avaliação. A resolução de problemas tem sido objeto de interesse de investigação na área do ensino de física.

Entre os trabalhos sobre estratégia de resolução de problemas, destacam-se aqueles realizados por Reif, Larkin e colaboradores. Em seus primeiros trabalhos, o grupo demonstrou interesse em ensinar estratégias gerais de resolução de problemas baseadas em etapas: *compreensão e descrição do problema, planejamento da solução, desenvolvimento de um plano de ação e revisão do processo de resolução*, REIF, apud CONCARI e GIORGI, 2000. Tem também contribuído dentro dessa área de conhecimento, os

trabalhos do grupo de Gil Pérez e outros investigadores da Universidade de Valência que concebem a resolução de problemas como um processo que se aproxima de procedimentos de investigação científica, GIL PEREZ et al., apud CONCARI e GIORGI, op. Cit.

Um problema, entendido como uma situação que apresenta certo nível de dificuldade e para o qual não se tem, de imediato, uma solução, requer a utilização de determinados procedimentos que envolvem complexos processos intelectuais e operatórios semelhantes aos processos seguidos em uma investigação científica.

O modelo de resolução de problemas como investigação científica desenvolvido por Gil Pérez, integra processos gerais da seguinte forma:

Discussão da situação;
Estudo qualitativo;
Emissão de hipótese;
Resolução comentada;
Análise de resultados.

No Brasil, PEDUZZI, 1998, utilizou uma estratégia de resolução baseada em passos, na qual os alunos foram estimulados a resolver problemas de lápis e papel em física, mediante processos de socialização e comunicação.

De VIGOTSKY, 1997, 1998, depreende-se que a intervenção na Zona de Desenvolvimento Próximo (ZDP) cria um espaço para ocorrer a aprendizagem. O conceito de ZDP tem uma implicação pedagógica na relação aprendizado e desenvolvimento. O bom aprendizado é aquele que se adianta ao desenvolvimento, VIGOTSKY, 1998; op. cit. O ensino na ZDP não se reduz à interação professor-aluno, mas, também, na interação entre alunos do grupo escolar que provoca modificações na estrutura psíquica e conduz a novas formas de interação do sujeito com a realidade social.

A proposta metodológica aqui apresentada foi desenvolvida com a intervenção no processo pedagógico em duas turmas do ensino médio, do CEFET-BA, uma da 2ª série em 1999 e outra na 3ª série de 2000, com um total de 68 alunos na faixa etária de 16 a 18 anos com o objetivo de aplicar a estratégia pedagógica, enfatizando aspectos conceituais, procedimentais e atitudinais, tendo em vista a análise de sua eficiência no desenvolvimento da independência cognitiva dos alunos.

No CEFET-BA, os instrumentos de avaliação, que se costumam utilizar, geralmente enfatizam a resolução de problemas. Das dificuldades apresentadas com essa atividade que caracteriza o estado atual, tornou-se necessário implementar a busca de novos métodos e o aperfeiçoamento dos professores para que os alunos compreendam melhor o conteúdo, desenvolvam habilidades intelectuais e práticas, apontando soluções para os problemas que devem enfrentar, independentemente, nas mais variadas situações.

Metodologia

As orientações gerais sobre as questões pedagógicas

buscaram facilitar o estabelecimento de um sistema de atuação dos alunos para alcançar os objetivos expressos em termos de valores e atitudes, de competências e habilidades. O planejamento do trabalho metodológico teve como objetivo tornar o processo de ensino-aprendizagem mais eficiente.

Foi elaborada e introduzida uma estratégia metodológica de resolução de problemas teóricos, em grupo e de modo independente, com situações-problema elaboradas, selecionadas e modificadas de livros texto. Para avaliar o nível de desempenho atingido pelos alunos, foi elaborada uma estratégia de resolução baseada em etapas e passos.

Com a finalidade de propiciar condições favoráveis à aprendizagem, as atividades de ensino foram desenvolvidas, intercaladamente, através do livro texto, aulas expositivas ilustrativas, trabalhos de grupo, trabalhos independentes e laboratório.

Os trabalhos desenvolvidos em grupo tiveram como objetivo ampliar a extensão dos conhecimentos e foram relacionados, sempre que possível, com a física do cotidiano. Serviram para estabelecer uma suave transição da estrutura cognitiva do aluno na resolução de problemas mais elaborados.

Os problemas, para serem resolvidos de modo independente, foram mais abrangentes, com nível de complexidade crescente e relacionados com aplicações práticas e inovações tecnológicas relevantes. As informações adicionais adquiridas para o trabalho de busca, durante o processo de resolução, ampliaram o conhecimento já elaborado. Os alunos que apontavam dificuldades para resolução dos problemas eram atendidos em horários especiais, ocasião em que se discutiam problemas correlatos para, através das analogias, chegarem à resolução dos problemas propostos.

As aulas de resolução de problemas e avaliação da aprendizagem

Reconhecendo o importante papel que a resolução de problemas tem na construção do conhecimento e no desenvolvimento da independência cognitiva dos alunos, foi estabelecida uma ordem de prioridades na realização das atividades, aumentando gradativamente o grau de dificuldade. Os problemas básicos selecionados, para fixação ou aplicação do conteúdo, foram discutidos com o objetivo de fazer com que os alunos compreendessem o fenômeno físico, sedimentassem as assimilações dos conteúdos e consolidassem o entendimento da teoria.

Para isso foram escolhidos os casos considerados exemplares com maior poder de transferência para suas variantes. Esses casos levaram o aluno a integrar, na sua estrutura cognitiva, os aspectos teóricos mais gerais através da incorporação dos conceitos. A diretriz, para se potencializar os problemas, foi a seleção ou elaboração criteriosa de situações atualizadas e ajustadas à realidade.

A resolução de problemas pelo professor foi substituída pela discussão de problemas orientados por uma estratégia que leva em consideração a necessidade de uma análise fenomenológica da situação proposta pelo

enunciado e o desenvolvimento de procedimentos que levaram à obtenção de resultado numérico ou algébrico.

A técnica utilizada que se revelou eficaz em sala de aula foi o trabalho de grupo. Para a formação dos grupos, usamos ora o critério da afinidade dos alunos, com a vantagem de que o coletivo se sentisse confortável, ora a forma dirigida pelo professor, tornando os grupos mais equilibrados. Os grupos, sob orientação do professor, expunham suas argumentações, explicando as discordâncias que eram então exploradas como meio de desenvolver a crítica construtiva, o espírito de cooperação e a objetividade. As aulas de discussão de problemas, em grupo, constituíram-se em um espaço privilegiado de intercâmbio professor-aluno e até mesmo entre alunos, para a resolução de problemas gradualmente mais complexos, atualizados, próximos da realidade vivencial de cada um.

A avaliação como parte integrante da aprendizagem buscou identificar quais as relações conceituais, procedimentais e atitudinais foram centradas pelos alunos e que significados foram incorporados à sua estrutura cognitiva. O nível de desempenho cognitivo foi avaliado, através da estratificação em categorias, obedecendo a critérios previamente estabelecidos.

Estratégia para resolução de problemas de física

Nesse trabalho, a estratégia é assimilada como procedimento utilizado para dar orientação ao processo de resolução de problemas e facilitar a aprendizagem. A estratégia traz duas funções fundamentais: a primeira leva o aluno a compreender e familiarizar-se com os conceitos, leis e princípios da Física, garantindo o entendimento dos seus significados no mundo vivencial, nos equipamentos e procedimentos tecnológicos. A segunda função consiste em desenvolver nos estudantes a habilidade para manipular os conceitos fundamentais da física e de aplicá-los na análise de situações conceituais. O modelo proposto aborda as dificuldades frequentemente encontradas pelos estudantes na resolução de problemas as quais são pontuadas em cinco etapas: o problema, a compreensão do problema, a elaboração de um plano de ação, a resolução do problema e a comprovação do resultado. A figura 1 ilustra o esquema sintético da estrutura metodológica:

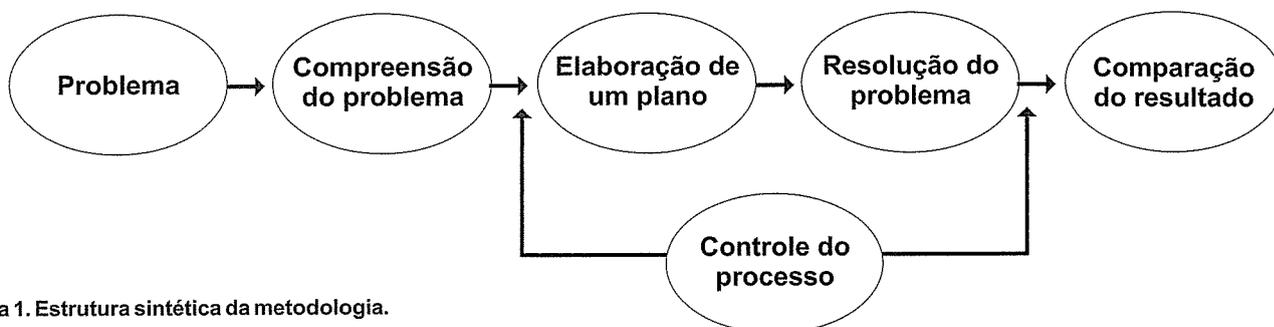


Figura 1. Estrutura sintética da metodologia.

O esquema básico é o de POLYA, 1986, porém o autor considera a necessidade de desdobramento de cada etapa em passos através dos quais se evidenciam os processos heurísticos destinados ao cumprimento de cada meta.

Assim, o aluno pode ser transformado em um agente ativo de sua própria aprendizagem, por meio de ações sucessivas.

Considerações finais

Após a aplicação da estratégia metodológica, foi possível constatar mudanças cognitivas durante o processo de resolução por meio de alguns indicadores:

- Comportamento de ajuda mútua no encaminhamento das previsões elaboradas.
- Capacidade de organização dos conhecimentos prévios e capacidade de tomar decisões.
- Registro de busca de alternativas para resolver problemas de modo independente das orientações do professor, como confirmação da estrutura da independência cognitiva, pois os alunos buscaram especialistas dentro do seu espaço de convivência para proferir conferências, seminários e palestras.

O nível de independência cognitiva se mediu em concordância com os resultados dos procedimentos metodológicos, atendendo fundamentalmente: a) à estrutura metodológica que os estudantes utilizaram como base orientadora para a direção do processo de resolução de problemas; b) à atividade dos estudantes, consideravelmente superior ao curso tradicional e ao conhecimento dos nexos entre conceitos, leis e princípios gerais, favorecendo o desenvolvimento das tarefas novas; c) à capacidade dos alunos em orientarem-se diante de situações novas referentes ao conteúdo teórico e experimental.

Estes aspectos, representativos da qualidade e eficácia do processo de ensino aprendizagem, redundaram na elevação de um estágio superior do conhecimento e no modo de atuar dos estudantes, proporcionando desenvolvimento da personalidade dentro de um espectro de variantes ou níveis que se podem obter como resultado desse processo (campo de possibilidades).

Esse trabalho constitui-se numa tentativa de articulação entre uma estratégia de resolução de problemas e o desenvolvimento da independência cognitiva do estudante, rompendo com o modo atualmente dominante de ensino de Física. A experiência educacional, descrita nesse trabalho, confirma e reforça conclusões de pesquisas recentes que mostram o importante papel do processo de resolução de problemas na atividade cognitiva (PEDUZZI, 1998) vinculado com o desenvolvimento da independência cognitiva do aluno (PEREZ GARCIA, 2001).

Referências

AUSUBEL, D. P.; NOVAK, HANESIEN, H.. Psicologia Educacional. Tradução por Eva Nick et al, Rio de Janeiro: Interamericana, 1980.

BARROLI, E.; VILANI, A.. O trabalho em grupo no laboratório didático: reflexões a partir de um referencial psicanalítico, *Ciência & Educação*, São Paulo: v. 6, N.1, 2000.

CARRASCOSA, A. J.; GIL PERÉZ, D. Concepciones alternativas: sus implicaciones didacticas en la renovacion de la ensenanza de las ciencias. Colección Promet. La Habana, Cuba: Editorial Academica, 1999.

CARRETERO, M. Construtivismo e Educação. Porto Alegre: Artes Medicas, 1997.

CONCARI, S. B.; GIORGI, S. M. Los Problemas Resueltos en Testos Universitarios de Fisica. *Revista Enseñanza de las Ciencias*. Espanha: 18 (3), 2000. P. 381-90.

MITJANS MARTINEZ, A. Creatividad, personalidad y educación. La Habana, Cuba: Editorial Pueblo y Educación, 1995.

MOREIRA, M. A. Aprendizagem significativa. A teoria de David Ausubel. São Paulo: Editora Moraes, 1982.

PARÂMETROS CURRICULARES NACIONAIS-PCN. Ensino Médio, Brasília, 1999.

PEDUZZI, L. O. Q. Sobre a resolução de problemas no ensino de física. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 14, n.3, dez. 1997.

_____ As concepções espontâneas, a resolução de problemas e historia e filosofia da ciência em um curso de mecânica. Tese de Doutorado, Florianópolis, SC, 1998.

PEREZ GARCÍA, C. El Trabajo Independiente: Via y accion para un pensamiento creador. Evento Internacional de pedagogia. La Habana, Cuba, 2001.

POLYA, G. A arte de resolver problemas (Tradução de How to Solve it, 1945), Rio de Janeiro, Interciência, 1986.

VIGOTSKY, L. S. Pensamiento y Lenguaje. La Habana, Cuba: Editorial Pueblo y Educación, 1998.

Sobre redes elétricas infinitas e transfinitas - parte I: paradoxos em redes elétricas infinitas

José Mário Araújo
Professor do CEFET-BA
e-mail: jomario@cefetba.br

Resumo

Os circuitos e redes elétricas infinitas e transfinitas têm recebido atenção de alguns poucos pesquisadores internacionais de renome, estando o tema ainda completamente inexplorado no meio acadêmico brasileiro. A construção de uma teoria para o estudo de tais redes tem revelado caminhos intrigantes e o número de paradoxos que surgem de seu estudo é algo assombroso. Este trabalho tem como objetivo resumir alguns dos principais resultados disponíveis na literatura, e, ao mesmo tempo, despertar os estudiosos da teoria de circuitos sobre este ramo completamente novo e desafiador. Uma breve introdução sobre os conceitos básicos é apresentada, passando a uma descrição de alguns exemplos que trazem em si paradoxos e comportamentos “estranhos”, completamente adversos daqueles conhecidos e bem estudados das redes elétricas finitas.

Palavras-chave

Redes elétricas infinitas. Paradoxos em redes elétricas. Regimes de potência finita e infinita. Perceptibilidade no infinito.

1-Introdução

Redes elétricas infinitas diferem das convencionalmente finitas num aspecto fundamental: uma quantidade infinita de braços ou nós é permitida, em contraste com as últimas. O estudo dessas redes parece, em princípio, ser puramente teórico, mas, em diversos problemas físicos, estes inusitados modelos surgem naturalmente. Alguns exemplos são o potencial de Yukawa e polarização das equações de Maxwell (ZEMANIAN, 1991). De um modo ou de outro, ainda que aplicações no mundo físico não sejam tão óbvias, as redes elétricas infinitas e também as transfinitas, que serão objeto da segunda parte deste trabalho, constituem um desafio ao intelecto de pesquisadores. Exemplos clássicos de redes elétricas infinitas são as cascatas e as grades, sendo que as primeiras serão tratadas nos exemplos aqui abordados. Vejamos um caso motivador para irmos adiante: considere a rede da figura 1a, onde os ramos são puramente resistivos. Considere ainda que todas as resistências são unitárias e que a fonte fornece uma tensão $e = 1$ V. Pela regra de resistores em paralelo,

um curto-circuito é então induzido entre os nós n_a e n_b , e uma corrente de 1 A penetra no nó n_a . Por cada um dos resistores conectados entre os referidos

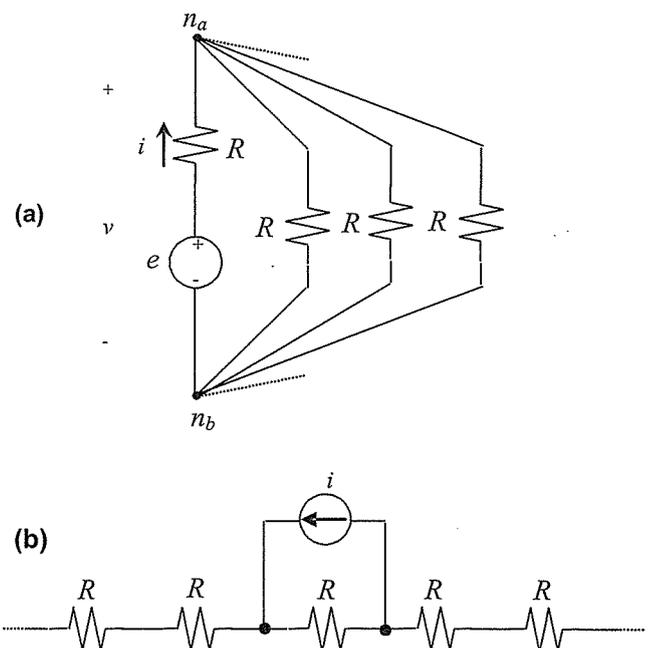


Fig. 1 rede que viola a lei das correntes (a) e seu dual (b), que viola a lei das tensões de Kirchhoff.

nós, flui uma corrente de 0 A, de forma que a soma das correntes, saindo do nó n_a é 0 A. verifica-se, assim, uma violação da lei das correntes de Kirchhoff. Mas, como nosso raciocínio pode estar errado, suponha que a tensão terminal v entre os nós n_a e n_b seja diferente de zero. Assim, uma corrente $i = 1 - v$ penetra no nó n_a , e, em cada um dos infinitos ramos, teremos uma corrente v . A soma de todas estas correntes de igual magnitude tem infinitas parcelas diferentes de zero, devendo desta forma divergir. Uma corrente finita penetra no nó n_a e uma corrente infinita sai do mesmo. Novamente, a lei das correntes de Kirchhoff é violada. Mesmo, analisando matematicamente, isto é, considerando que podemos truncar a rede no m -ésimo resistor, obtendo a equação 1:

$$i = \sum_{j=1}^m i_j = \sum_{j=1}^m \frac{1}{m+1} \quad (1)$$

e, em seguida, tomando a soma dos limites das parcelas do segundo membro quando $m \rightarrow \infty$, teremos o resultado de 0 A, já intuitivamente analisado. Vale lembrar que o cálculo Standard, utilizando números reais é ambíguo com respeito ao limite mencionado. Uma teoria arrojada, utilizando cálculo não-standard (hiperreais) já está praticamente construída (ZEMANIAN, 2004), e é perfeitamente capaz de responder ao paradoxo analisado. O caso dual, mostrado na figura 1b,

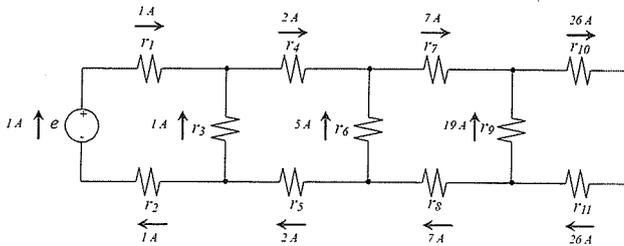


Fig. 2 rede que viola a regra fundamental de dissipação de potência finita nos resistores.

pode ser abordado de forma semelhante, demonstrando que a lei das tensões de Kirchhoff falhará ao ser aplicada na malha infinita com as extremidades ligadas em curto-circuito no infinito. Nos exemplos das seções 2 e 3, vamos introduzir os conceitos de regimes de potência finita e infinita e de perceptibilidade no infinito.

2-Regimes de potência finita e infinita

Considere a cascata infinita mostrada na figura 2, com a tensão da fonte e todos os resistores unitários. Um exame atencioso leva-nos a concluir que a aplicação da lei de Ohm juntamente com a lei das correntes e a lei das tensões de Kirchhoff (exceto para a malha infinita), determina um regime de tensões-correntes de ramo, com a condição adicional de que, como a rede é infinita, temos liberdade para assinalar a corrente em um dado ramo e determinar todas as outras tensões e correntes de ramos. No exemplo considerado, assinalando uma corrente de 1 A na fonte de tensão, teremos para o primeiro resistor shunt uma corrente de 1 A com o sentido mostrado. Na medida em que aplicamos a lei de Ohm e as leis de Kirchhoff seqüencialmente, notamos que a corrente torna-se cada vez maior na medida que nos afastamos em direção ao infinito. A fonte, então, fornece uma potência finita de 1 W, e a potência total dissipada nos resistores é infinita, fato que contradiz a regra padrão para redes resistivas finitas, onde a potência total fornecida pelas fontes $\sum v_i i_i$ é igual à potência total dissipada nos resistores $\sum r_i i_i^2$. Mais um paradoxo destes formidáveis modelos. De onde vem o excesso de potência dissipada nos resistores? Certamente, de uma fonte que nós especificamos indiretamente ao assinalar uma corrente em um dos ramos do circuito, fonte localizada na extremidade infinita da cascata. Isto é conhecido como regime de potência infinita (ZEMANIAN, 1991). A imposição de que a potência total

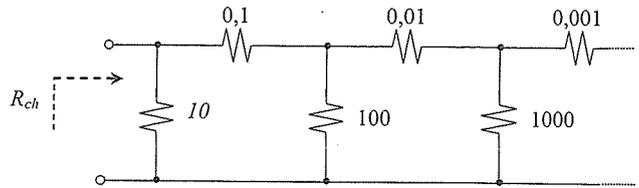


Fig. 3 resistência característica de uma escada que depende de que está "conectado no infinito".

dissipada nos resistores é finita e igual à potência fornecida por um número finito de fontes presentes em alguns ramos conduz a um teorema de existência e unicidade seminal no estudo de redes infinitas (FLANDERS, 1971), que diz que este regime é dado por um único conjunto de tensões e correntes de ramos, em contraste com o regime de potência infinita.

3-Perceptibilidade no infinito

Analisemos a cascata da figura 3, também conhecida como escada não uniforme. Em suma, a aplicação de reduções série-paralelo em tal escada leva-nos a estabelecer, em um regime de potência finita, a resistência característica R_{ch} da escada como sendo:

$$R_{ch} = \frac{1}{0.1 + \frac{1}{0.1 + \frac{1}{0.01 + \frac{1}{0.01 + \frac{1}{0.001 + \frac{1}{0.001 + \frac{1}{0.0001 + \dots}}}}}} \quad (2)$$

tal expressão é conhecida como fração continuada, e é do tipo divergente (WALL, 1948), pois seus truncamentos pares e ímpares convergem para limites diferentes. O truncamento par da fração dada pela equação 2 equivale, fisicamente, a substituir o n-ésimo resistor vertical da rede por um curto-circuito e movê-lo para o infinito, e, em particular, este valor converge para $R_{ch} = 0,1098\dots$ Por outro lado, o truncamento ímpar é obtido substituindo-se o n-ésimo resistor horizontal por um circuito aberto e movendo-o para o infinito, e o valor, neste caso, converge para $R_{ch} = 9,001\dots$ É impressionante, mas para a escada em questão, o que está "conectado no infinito" é "perceptível" a partir dos terminais de entrada. Caso a escada seja uniforme, com, por exemplo, todos os resistores iguais a 1Ω , a fração continuada.

$$R_{ch} = \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \dots}}}} \quad (3)$$

tem seus truncamentos par e ímpar convergindo para o mesmo valor. Neste caso, $R_{ch} = \frac{\sqrt{5}-1}{2}$. Conclui-se, assim, que para a escada uniforme, em regime de potência finita, a conexão no infinito é imperceptível.

4-Conclusões

Foram apresentadas para redes elétricas infinitas novas situações bastante diferentes daquelas bem definidas em redes elétricas finitas. Violações das leis de Kirchhoff, da potência total dissipada nos resistores da rede, ser um número finito e o conceito de perceptibilidade no infinito são abordados de modo a tornar clara a necessidade de uma teoria mais avançada no estudo das redes elétricas infinitas quando comparada à teoria de redes finitas. Na parte II deste trabalho, serão abordadas as redes elétricas transfinitas, que dão uma melhor explicação e sentido ao termo "conexões no infinito".

Referências

FLANDERS, H. Infinite networks I: Resistive networks, IEEE Transaction on Circuit Theory. v.18. s.l., 1971. p. 326-31.

ZEMANIAN, A. H. Infinite electrical networks. New York: Cambridge University press, 1991.

_____ Graphs and networks: transfinite and non-standard. Boston: Birkhauser, 2004.

WALL, H. S. Analytical theory of continued fractions. New York: Van Nostrand, 1948.

Caracterização de ligas de alumínio produzidas por metalurgia do pó

Rodrigo Estevam Coelho
Professor do CEFET-BA
roesco@cefetba.br

Genival Bastos Almeida
Professor do CEFET-BA

Francisco Ambrózio
IPEN-Cidade Universitária, Tr.R 400 - CEP05508-900 - SP

Resumo

A liga Al-Fe-Nb-Si foi obtida por moagem de alta energia, a partir da mistura dos pós elementares na composição Al_{90,8}Fe_{6,2}V_{1,0}Si_{2,0} (at%). Os tempos de moagem foram definidos em 1, 5 e 10 horas e a mistura de pós foi processada em moinho atritor a 1400 rpm. Após o processamento por moagem de alta energia, os pós processados durante 1, 5 e 10 horas foram compactados a quente sob vácuo e extrudados pelo processo de extrusão indireta. Na caracterização das amostras obtidas, foram utilizados difratômetro de raios X, microscópios eletrônicos de varredura e de transmissão com análise de micro-região por energia dispersiva (EDS). Nas barras extrudadas, foram realizados ensaios de dureza e tração. Verificou-se a formação de uma microestrutura bastante refinada nas barras obtidas com o pó processado durante 10 horas de moagem a 1400 rpm, cujo material apresentou elevada resistência mecânica. O valor da resistência mecânica obtida neste estudo, à temperatura de 200 e 350°C superior aos das ligas convencionais, ocorre devido à formação do precipitado nanométrico α -Al₁₂(Fe,Nb)₃Si.

Palavras-chave

Metalurgia do pó. Ligas de alumínio. Caracterização microestrutural.

1.Introdução

A liga Al-Fe-Si, obtida através da moagem de alta energia seguida de compactação ou extrusão a quente, apresenta uma fase matriz (alumínio) e uma fase metaestável Al₁₂Fe₃Si na forma de um precipitado de estrutura cúbica de corpo centrado, cujo material se torna frágil quando aplicado acima de 300°C. Quando aquecido nesta temperatura, a fase metaestável, dissocia-se em duas novas fases, Al₈Fe₂Si e Al₄Fe, mantém a fase matriz, tornando-se impossível manter as boas propriedades mecânicas. Com a adição de um quarto elemento que pode ser (V, Mo, Cr, Ni ou Nb), é possível estabilizar a liga, proporcionando a excelente resistência mecânica e estabilidade térmica em temperaturas de até 550°C.

Em geral, a perda de resistência desse material, na composição Al-12,4Fe-1,2V-2,3Si (peso%), obtida via solidificação rápida ("melt-spinning") e extrusão a quente, ocorre quando exposto à temperatura de 550°C e tempo acima de 50 horas.

Nestas condições, observaram-se por microscopia eletrônica de transmissão mudanças na microestrutura das amostras.

O quarto elemento de adição mais utilizado na obtenção desse sistema de liga é o vanádio, o qual resulta em uma liga com excelentes combinações de resistência, ductilidade e tenacidade, tanto para aplicações à temperatura ambiente como a temperaturas elevadas. O vanádio é um elemento essencial para estabilizar a fase cúbica α -Al₁₂(Fe,V)₃Si na liga Al-Fe-V-Si. Dependendo do processo e da composição inicial da liga, a porcentagem de precipitados Al₁₂(Fe,V)₃Si pode variar de 15 a 40%.

O precipitado intermetálico α -Al₁₂(Fe,V)₃Si, de estrutura atômica, cúbica de corpo centrado (CCC), foi estudado baseando-se na estrutura cristalina das ligas ternárias AlMnSi e AlFeSi. A composição da fase pode variar de acordo com a razão Fe:V. Essa fase possui uma faixa de valores nas composições Al_{12,0-14,0}(Fe,V)₃Si_{0,9-1,28} para a razão Fe:V, variando de 5:1 a 11,5:1. O parâmetro de rede dessa fase pode ser alterado por mudanças nas razões Fe:V e Al:Si. A razão Fe:V tem efeito na fração volumétrica de precipitado, no tamanho de grão, na distribuição e tamanho de partícula e altera as propriedades mecânicas do material.

A liga Al-Fe-V-Si já foi obtida por "melt-spinning", atomização a gás e conformação por spray com a finalidade de aplicação em componentes estruturais.

Na elaboração de ligas de alumínio desta natureza, pela mistura de pós elementares, a moagem de alta energia (MAE) é um processo aplicado recentemente, desta forma utilizado ainda em laboratório. Observa-se a potencialidade deste processo que poderá ser empregado em larga escala, pois permite elaborar ligas com excelentes propriedades mecânicas para aplicações na temperatura ambiente e temperaturas acima de 150°C, quando comparado com as ligas convencionais à base de alumínio.

A formação de fase metaestável em vários sistemas de ligas por MAE indica que este é um processo que possibilita a obtenção de materiais com microestruturas semelhantes às da solidificação rápida. A diferença entre os dois processos é que a

solidificação rápida envolve transformação do estado líquido para o sólido, enquanto que no MAE, a transformação ocorre completamente no estado sólido.

A composição inicial de uma mistura de pós, submetida ao processo de MAE, pode influenciar na síntese da liga. Quando o equipamento entra em funcionamento, ocorre o movimento, promovendo impactos entre as partículas de pó, os meios de moagem e o recipiente. Inicialmente, ocorre a mistura e, paralelamente, a deformação do material seguida de fratura e soldagem das partículas de pó. A energia de ativação necessária para a ocorrência da reação de formação de novas fases é obtida por liberação nos choques entre o material e as bolas. A velocidade de reação varia exponencialmente com a taxa de acúmulo de deformação, de maneira análoga ao que ocorre em reações químicas induzidas termicamente, em que o mesmo tipo de relação ocorre entre a velocidade de reação e a temperatura. Esta taxa varia de acordo com a energia cinética das bolas. A formação de partículas nanocristalinas, durante a moagem, auxilia o processo, pois minimiza o comprimento das rotas de difusão. O mesmo ocorre em função da taxa de defeitos induzidos pela deformação.

A energia é absorvida pelo material, obtendo-se características diferentes, dependendo de cada sistema. A ação do MAE pode ser classificada em dois grupos, de acordo com a presença ou não de reações químicas. As reações químicas podem ocorrer pela troca de átomos vizinhos e/ou pela modificação do tipo de ligação. Desta forma, quando ocorre a quebra de ligações do tipo metálica entre átomos similares (A-A) e formação de novas ligações, também metálicas, entre átomos dissimilares (A-B), obtém-se uma liga por solução sólida substitucional. As reações químicas induzidas pela ação da energia mecânica promovem a formação de um novo produto, caracterizado por mudanças no tipo de ligação, como, por exemplo, a troca de ligações do tipo metálica por ligações de caráter covalente ou iônico. Isto engloba materiais como intermetálicos, cerâmicos e compósitos.

Quando não ocorrem reações químicas durante o processo, mas apenas deformação, soldagem e fratura, a característica básica dos materiais obtidos, é sua estrutura refinada composta de interfaces que propicia a formação de materiais nanocristalinos ou até mesmo amorfos. A energia contida nesses materiais, decorrente do processamento, pode ser liberada por meio de aquecimento, podendo ocorrer ou não a formação de novas fases.

2. Materiais e métodos

As ligas à base de alumínio, que estão sendo utilizadas para a caracterização microestrutural e o estudo das propriedades mecânicas, foram elaboradas por moagem de alta energia seguida de compactação a quente sob vácuo e extrusão a quente. O trabalho foi executado observando a seqüência representada na Fig. 1.

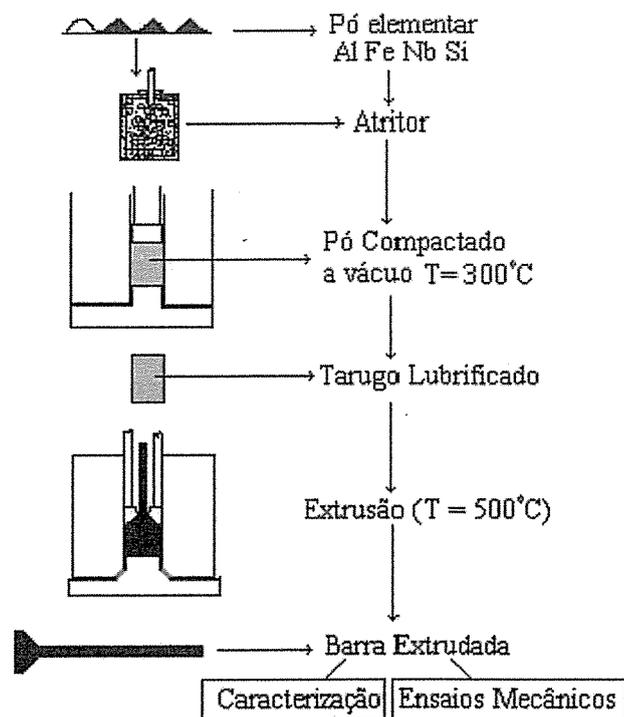


Figura 1. Seqüência utilizada para o desenvolvimento do trabalho.

Os elementos em forma de pó, na composição $Al_{90,8}Fe_{6,2}Nb_{1,0}Si_{2,0}$ (at. %), foram processados em um moinho atritor de alta energia durante 1, 5, e 10 horas de moagem a 1400 rpm. O equipamento de moagem utilizado para o processamento dos pós foi um moinho da Netsh-Molinex do tipo atritor vertical. Este equipamento tem três opções de velocidade, 800, 1400 e 2200 rpm. Os parâmetros da moagem utilizados estão apresentados na Tab. I.

Volume do jarra (cm ³)	550
Massa de pó (g)	100
Massa de bola / Massa de pó	9:1
Diâmetro de bola (mm)	7
Velocidade da haste (rpm)	1400
Atmosfera passante	Nitrogênio
Refrigeração	Água
Tempo de processo (h)	1, 5, 10

Os pós processados foram compactados a 300°C, sob vácuo de 6×10^{-3} torr em forma de tarugos, com dimensões de, aproximadamente, 30mm de diâmetro por 40 mm de comprimento. A carga máxima aplicada na compactação dos pós foi de 400kN. Os tarugos foram lubrificadas com graxa molykote, resistente a altas temperaturas, e extrudados a 500°C, na razão de extrusão de 6:1. Foram obtidos, do processo de extrusão, barras com diâmetros de 13mm e comprimento de, aproximadamente, 150mm.

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada nas amostras de pós para 10 horas de moagem. A preparação de amostra foi feita, espalhando-a sobre uma fita condutora autocolante dupla-face colocada sobre um porta amostra. A observação foi realizada com um microscópio eletrônico de varredura Leo Steroscan 440.

As amostras retiradas das barras foram caracterizadas por difratometria de raios-X e microscopia eletrônica de transmissão. A difração de raios-X foi uma das técnicas utilizadas para identificação das fases nos materiais obtidos neste estudo. Os valores da distância interplanar e das posições angulares 2θ , obtidos para cada material, foram analisados por meio de comparação com as tabelas internacionais de cristalografia, JCPDS (Joint Committee for Powder Diffraction Standards). As fases elementares e os compostos intermetálicos das amostras foram identificados, então, com o padrão encontrado no JCPDS. As análises por difração de raios-X foram realizadas em um difratômetro Rigaku com radiação $\text{CuK}\alpha$, nas amostras de pós obtidos em 10 horas de moagem, e nas barras extrudadas, destes mesmos pós. As amostras, preparadas para microscopia eletrônica de transmissão, foram inicialmente cortadas na Isomet, obtendo-se lâminas de, aproximadamente, $200\mu\text{m}$ de espessura. Do equipamento de eletroerosão, Servomet SMD, foi retirado um disco de 3mm de diâmetro de cada lâmina. Os discos foram afinados com, aproximadamente, 300nm em seu centro por duplo jato eletrolítico no Tenupol 3 (tensão de aproximadamente 25 V e corrente elétrica de 300mA) em uma solução contendo 10 % de ácido perclórico e 90 % de metanol a uma temperatura de 10°C negativo. Foi utilizado para análise um microscópio de transmissão Philips CM 200, equipado com detetor de raios-X EDAX, dopado com lítio/silício, com janela de berílio.

Nas amostras das barras extrudadas foram realizados ensaios de dureza e ensaio de tração, à temperatura ambiente ($\sim 250^\circ\text{C}$) e a temperaturas de 200 e 350°C .

Os ensaios de tração foram realizados com base na norma ASTM-E8- 96 em uma máquina Instron modelo 4400R, com uma célula de carga de 5kN à velocidade de $1,67 \times 10^{-3}$ mm/s. Os valores da resistência mecânica e seus respectivos desvios padrão foram calculados, utilizando-se 3 determinações obtidas em amostras de 3 diferentes extrusões. Os valores da dureza Vickers foram determinados com a utilização de uma carga estática de 0,98 N, à temperatura ambiente, em um microdurômetro Wolpert-Werke com aumento de 250 x. A dureza e seus respectivos desvios padrão foram calculados, utilizando-se 12 determinações em cada amostra.

3. Resultados e discussão

A morfologia, observada no microscópio eletrônico de varredura, das partículas de pó em 10 horas de moagem, a 1400 rpm, para a composição $\text{Al}_{90,8}\text{Fe}_{6,2}\text{Nb}_{1,0}\text{Si}_{2,0}$ (at. %), está representada na micrografia da Fig. 2. Observa-se que a morfologia do pó processado apresenta a forma arredondada e irregular. Esta característica morfológica apresentada foi observada em estudo anterior, é típica do material em pó que inicialmente sofreu o mecanismo de deformação e, paralelamente, "soldagem", encruamento e, conseqüentemente, a "fratura" em um longo ciclo, o qual se repetiu durante todo o tempo de moagem.

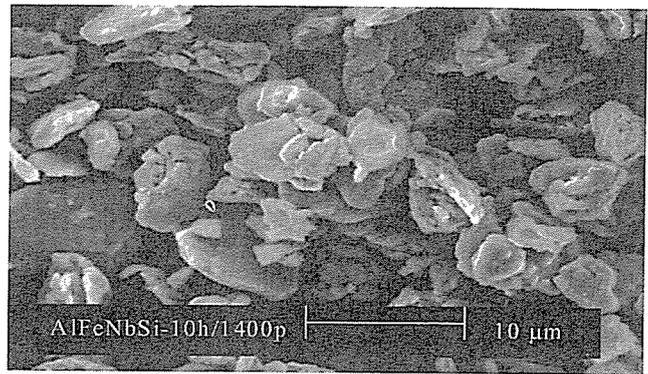


FIGURA 2. Morfologia das partículas AlFeNbSi observadas no MEV após um tempos de 10 horas de moagem, a 1400 rpm.

Na Fig. 3, representam-se os difratogramas de raios-X, do pó obtido em 10 horas de moagem a 1400 rpm e da barra extrudada. No difratograma do pó, são identificados os picos da matriz alumínio e o pico da fase (AlNb_2), cuja fase é facilmente formada, quando a quantidade de nióbio utilizada é, acima do balanço estequiométrico, encontrado na fase $\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{Nb})_3\text{Si}$. A fase AlNb_2 é uma fase tetragonal, com parâmetros de rede $a=9,97 \text{ \AA}$ e $c=5,17 \text{ \AA}$. O pico da fase AlNb_2 , no difratograma do pó processado, permaneceu no difratograma das barras extrudadas, indicando sua estabilidade na temperatura de realização de extrusão, 500°C . Além de permanecer a fase AlNb_2 , nas amostras das barras extrudadas, identificou-se a fase cúbica de corpo centrado $\alpha\text{-Al}_{12}(\text{Fe},\text{Nb})_3\text{Si}$.

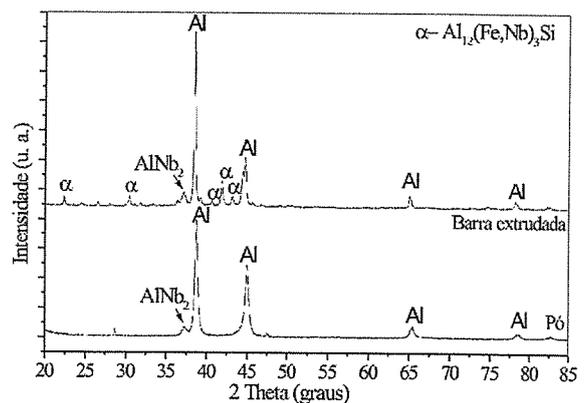


Figura 3. Difratogramas de raios-X do pó AlFeNbSi- 1400 rpm em 10 horas de moagem e da barra extrudada.

Na microestrutura, da barra de extrusão, da liga AlFeNbSi (10 h 1400 rpm), analisada por microscopia eletrônica de transmissão, observaram-se os dois tipos diferentes de precipitados, anteriormente identificados nos picos de difração de raios-X. Um tipo de precipitado apresenta morfologia poligonal, diâmetro na faixa de 50 a 65nm , cuja composição é rica em Nb e Al (fase AlNb_2). Esta fase foi identificada na difração de raios-X, tanto para o pó como para a amostra da barra extrudada. Uma imagem de campo escuro da fase AlNb_2 está apresentada na Fig. 4 e o espectro referente a esta imagem está representado na Fig. 5.

O outro tipo de precipitado, mostrado na Fig. 6, apresenta morfologia aproximadamente esférica ou poligonal, diâmetro na faixa de 20 a 45nm , cuja composição ($\text{Al}_{17,95}\text{Fe}_{13,55}\text{Nb}_{2,97}\text{Si}_{5,53}$ at%), observada por EDS, corresponde à fase $\alpha\text{-Al}_{12}(\text{Fe},\text{Nb})_3\text{Si}$ identificada na difração de raios X.

O espectro referente à imagem da fase α - $\text{Al}_{12}(\text{Fe,Nb})_3\text{Si}$ na liga extrudada está apresentado na Fig. 7.

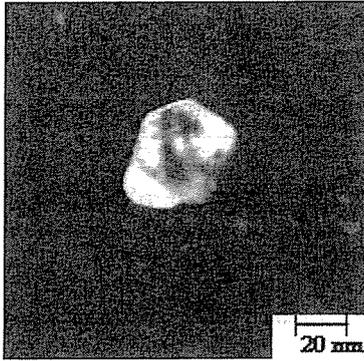


Figura 4. Imagem de campo escuro da fase AlNb_2 .

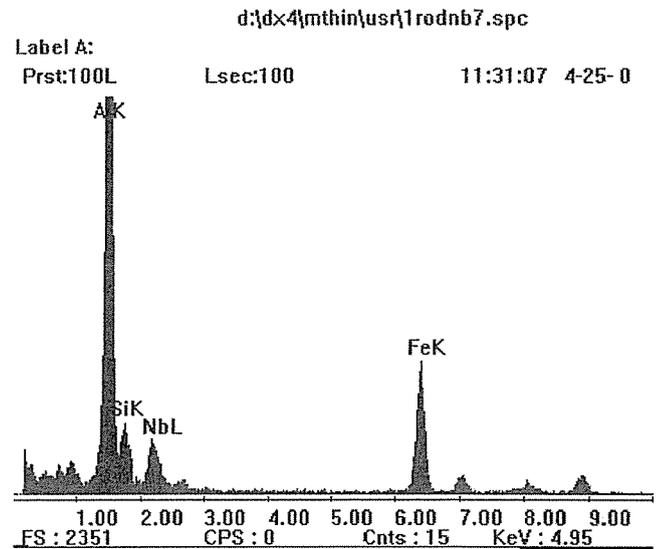


Figura 7. Espectro obtido no microscópio eletrônico de transmissão referente à fase α - $\text{Al}_{12}(\text{Fe,Nb})_3\text{Si}$ apresentada na imagem da Fig. 6.

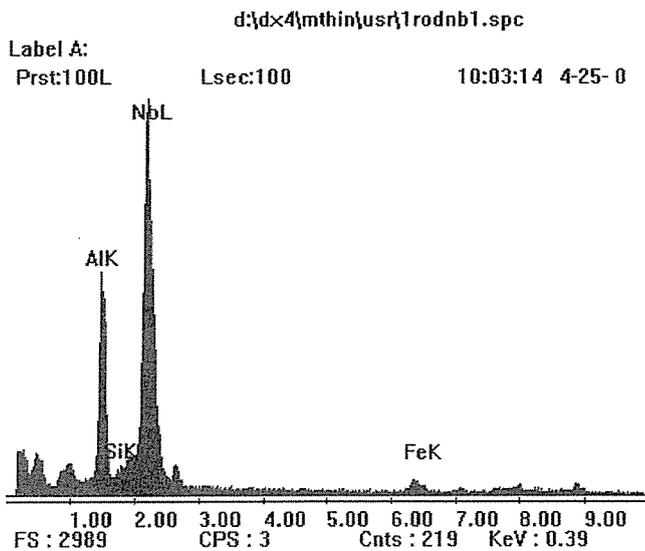


Figura 5. Espectro obtido no microscópio eletrônico de transmissão referente à fase AlNb_2 apresentada na imagem da Fig. 4.

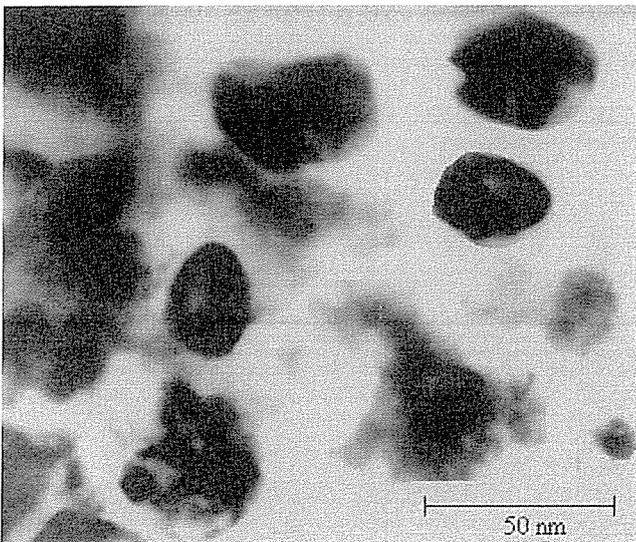


Figura 6. Microscopia eletrônica de transmissão da liga AlFeNbSi (10 h 1400 rpm) barra de extrusão.

No gráfico da Fig. 8, representam-se os resultados dos ensaios de microdureza Vickers em função do tempo de moagem (1, 5 e 10 horas). A dureza do material aumenta com o aumento do tempo de moagem. Verifica-se que na barra estrudada do pó processado em 10 horas no moinho atritor, a dureza é muito mais elevada. Segundo experiências observadas na literatura, esta já era esperada, pois o material, conforme seu processo, moagem de alta energia, aumenta o encruamento, conseqüentemente, sua dureza aumenta. Por outro lado, a formação de fases intermetálicas com o aumento do tempo de moagem, contribui para a melhoria nas propriedades do material. As fases intermetálicas em estudo feito anteriormente, aparecem distribuídas pela matriz alumínio e a quantidade volumétrica depende do tempo de moagem e também da composição inicial dos elementos de adição.

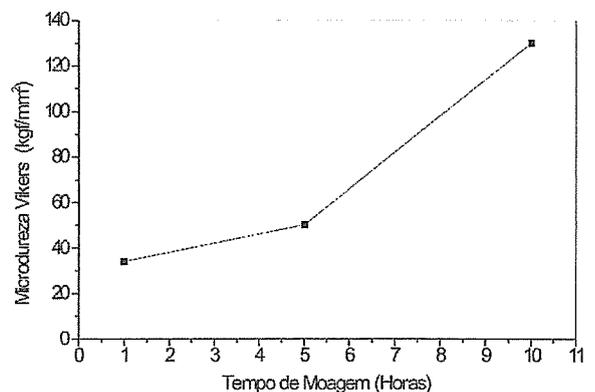


Figura 8. Dureza Vickers em função do tempo de moagem.

A resistência mecânica do material extrudado utilizando o pó processado em 10 horas de moagem a 1400 rpm, é maior que a resistência mecânica das ligas convencionais 2014 T6 e 7075 T765, processadas por lingotamento, como pode ser observado na Fig. 9. O material extrudado também apresentou maior resistência mecânica às temperaturas de 200 e 350°C. O valor da resistência mecânica da liga extrudada obtidos acima de valores das ligas convencionais, e

semelhantes aos valores das ligas, obtidas por solidificação rápida, a 200 e 350°C, são decorrentes dos precipitados nanométricos da fase α -Al₁₂(Fe,Nb)₃Si. Portanto, os resultados aqui obtidos, referentes à adição de um quarto elemento, no caso o nióbio, estão de acordo com os resultados encontrados na literatura.

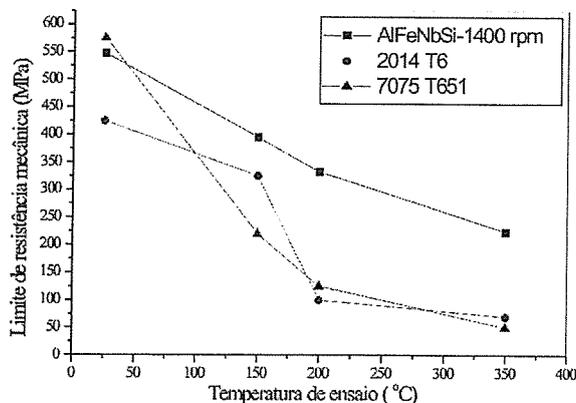


Figura 9. Resistência mecânica da liga AlFeNbSi obtida por moagem de alta energia seguida de extrusão a quente, comparada com a resistência mecânica das ligas convencionais 2014 T6 e 7075 T651.

4. Conclusão

Utilizando-se os pós elementares Al-Fe-Nb-Si, foi elaborada a liga Al_{90,8}Fe_{6,2}Nb_{1,0}Si_{2,0} (at. %) por moagem de alta energia, seguida de compactação a quente sob vácuo e extrusão a quente. Observou-se que a dureza Vickers, das barras obtidas por extrusão, aumenta com o tempo de moagem e que microestrutura é composta da fase intermetálica - Al₁₂(Fe,Nb)₃Si, distribuída na matriz alumínio, a qual é a responsável por manter a resistência mecânica a 200 e 350°C, superior às resistências das ligas convencionais 2014 T6 e 7075 T651 processadas por lingotamento.

Referências

BASSET, D.; MATTEAZZI, P.; MIANI, F. Measuring the impact velocities of balls in high energy mills. *Mater. Sci. Eng.*, v. A174, n. 1, p. 71-74, 1994.

BYE, R. L.; KIM, N. J.; SKINNER, D. J.; RAYBOUD, D.; BROWN, A. M. Rapidly solidified powder metallurgy aluminum alloys prepared from melt spun ribbons. *Allied-Signal Corporation*. p.283-9, 1987.

CHAMPIER, G. *New Light Alloys. Lecture Series, Advisory Group for Aerospace Research Development*, n.174, 6E1-21, 1990.

COELHO, R. E.. Obtenção das ligas Al-Fe-X-Si (X=V ou Nb) por moagem de alta energia e extrusão a quente, 2001. 121 folhas. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear-Materiais)-Ipen-Autarquia Associada à Universidade de São Paulo.

COELHO, R. E.; LIMA, S. J. G.; AMBROZIO, F. Extrusion of aluminum alloys prepared from mechanical alloying powder, *Mat Sci. Forum. Switzerland*: v.416-18, p.176 - 182, 2003.

COOPER, Malcolm. The crystal structure of the ternary alloy (AlFeSi). *Acta Cryst.*, 23, p.1106-7, 1967.

COOPER, Malcolm; ROBINSON, K. The crystal structure of the ternary alloy (AlMnSi). *Acta Cryst.*, 20, p.614-7, 1966.

DAS, S. K. *Al-Rich intermetallics in aluminum alloys, Intermetallic Compounds. John Wiley & Sons*, v.2, cap.8, p.175-198, 1994.

FRANCK, R. E.; HAWK, J. A. Effect of very high temperatures on the mechanical properties of Al-Fe-V-Si alloy., *Scr. Metall.* V.23, p.113-8, 1989.

KOCK, C. C. Research on metastable structures using high energy ball milling at North Carolina State University. *Mater. Trans., JIM*. v.36, n.2, p.85-95, 1995.

MURTY, B. S., RANGANATHAN, S. Novel materials synthesis by mechanical alloying/milling. *Int. Mater. Rev.*, v. 43, n.3, p. 101-41, 1998.

RAMANAN, V. R. V.; SKINNER, D. J.; ZEDALIS, M. S. On the nature of icosahedral phases in Al-(Fe,V,Si) alloys. *Mater. Sci. Eng.*, p. 912-6, 1991.

RODRIGUEZ, M. A.; SKINNER, D. J. Compositional analysis of the cubic silicide intermetallics in dispersion strengthened Al-Fe-V-Si alloys. *J. Mater. Sci. Letters*, 9, p.1292-93, 1990.

SKINNER, D. J. The physical metallurgy of dispersion strengthened Al-Fe-V-Si alloy. *J. Min. Metals Mater. Society*, p.181, 1988.

SKINNER, D. J.; BYE, R. L.; RAYBOULD, D.; BROWN, A. M. Dispersion strengthened Al-Fe-V-Si alloys. *Scr. Metall.*, v. 20, p.867-72, 1986.

SRIVASTAVA, A. K.; OJHA, S. N.; RANGANATHAN, S. Microstructural Features and heat flow analysis of atomized and spray- formed Al-Fe-V-Si alloy. *Metall. Trans.* 29A, 2212, 1998.

SURYANARAYANA, C.; CHEN, G-H.; FROES F. H. Milling maps for phase identification during mechanical alloying. *Scr. Metall.* v.26, p.1727-32, 1992.

Estado da arte sobre técnicas de otimização de rendimento aplicada a motores de indução

Durval de Almeida Souza

Professor do CEFET-BA / UNED-Vitória da Conquista e Mestre em Engenharia Elétrica (Automação) pela Universidade Federal do Espírito Santo UFES.

Resumo

Este artigo apresenta as técnicas de otimização do rendimento empregadas a motores de indução sob controle escalar ou vetorial. Tais técnicas são divididas em três grupos, a saber: Controle de Estado Simples; Controle Baseado no Modelo Matemático do Motor e do Inversor; e Controle por Procura.

Palavras-chave

Motor de Indução. Otimização do rendimento. Técnicas de Otimização.

Introdução

Devido à sua robustez e baixo custo, os motores de indução são usados largamente na indústria. A energia consumida por estes motores chega a representar cerca de 54% da energia gerada no planeta.

O uso de forma otimizada da energia nos motores de indução representa não só uma economia no custo da energia, mas também uma melhora significativa na qualidade do meio ambiente, uma vez que boa parte da energia consumida nos países industrializados vem de combustíveis fósseis. A otimização da energia representa a maior relação possível entre a energia entregue e a energia realmente convertida no trabalho a que o sistema se destina. Esta relação, chamada de rendimento, é definida como a relação entre a potência mecânica de saída e potência elétrica de entrada em um motor elétrico. Como nem toda energia entregue ao motor é convertida em energia mecânica, parte dessa energia é perdida no motor.

As perdas em um motor de indução são basicamente: 1) perdas no cobre do estator; 2) perdas no cobre do rotor; 3) perdas no núcleo; 4) perdas mecânicas; e 5) perdas adicionais. Essas perdas têm naturezas diversas e praticamente toda a energia de perdas é convertida em calor. Nos motores de indução em condições de torque e velocidade nominais, o rendimento é elevado, no entanto, em condições de carga leve, as perdas são excessivas e o rendimento é reduzido.

Os métodos de controle empregados para se obter um rendimento ótimo são divididos em três categorias:

1) controle de estados simples; 2) controle baseado no modelo; e 3) controle por procura.

Otimização do Rendimento

O rendimento de uma máquina é definida como sendo a razão entre a potência mecânica de saída e a potência elétrica de entrada. Lembrando-se que a potência mecânica, P_m , é o produto entre torque e velocidade rotórica ($T_e \times \omega_m$) e que a potência elétrica de entrada é a soma da potência mecânica de saída e as perdas no motor, tem-se:

$$\eta = \frac{P_m}{P_m + P_{perdas}} = \frac{1}{1 + \frac{P_{perdas}}{T_e \cdot \omega_m}}$$

O rendimento pode, desta forma, ser melhorado reduzindo a potência elétrica de entrada por meio da redução das perdas totais. Portanto, a otimização do rendimento significa minimização das perdas.

Normalmente os motores de indução são dimensionados para tensão e frequência constantes de tal modo que eles têm rendimento ótimo com, aproximadamente, 75% de carga e rendimento sub ótimo com carga parcial. Um meio para se obter rendimento ótimo é empregar adequadamente uma estratégia de controle dentro dos métodos de controle clássico que permita alcançar uma melhoria no rendimento.

De certa forma, pode-se dizer que a otimização do rendimento pode ser alcançada através de: a) seleção e modelo do motor; b) melhoria das formas de onda supridas pelo inversor; e c) utilizando um apropriado método de controle. Nos parágrafos seguintes serão discutidas as estratégias de controle para otimização do rendimento.

Métodos de Otimização do Rendimento

Os métodos de otimização do rendimento são divididos em três categorias:

- Controle de estado simples;
- Controle baseado no modelo da máquina e do conversor;
- Controle por procura.

Controle de Estado Simples

O controle de estado simples significa que um parâmetro do motor é medido ou derivado de uma medida e usado como realimentação em uma simples malha de controle. Este controle utiliza o fato que, em operação com rendimento ótimo, certas grandezas do motor são facilmente medidas. O estado normalmente controlado do motor é a frequência de escorregamento do rotor ou o fator de potência fundamental.

• Controle da frequência de escorregamento do rotor: Nesta estratégia é necessário o conhecimento da velocidade e dos parâmetros do motor. Em operação de rendimento ótimo, a frequência de escorregamento do rotor é constante se o motor não estiver saturado, no entanto, como o motor é projetado para trabalhar saturado, sob fluxo nominal, esta frequência será variável, por isso há necessidade do conhecimento de ambos parâmetros acima citados.

• Controle do fator de potência: a aquisição do fator de potência requer as medidas de potência ativa de entrada do motor e da potência aparente ou a medida da defasagem entre a tensão e a corrente do estator. Nesta estratégia de controle, o fator de potência $\cos(\varphi)$ é quase constante quando o rendimento é ótimo. O controle do $\cos(\varphi)$ constante é uma estratégia de baixo custo e de bom desempenho, isso porque o $\cos(\varphi)$ é fácil de se medir. A figura 1 mostra o esquema de controle do $\cos(\varphi)$, que pode ser implementado sob controle escalar ou vetorial da máquina.

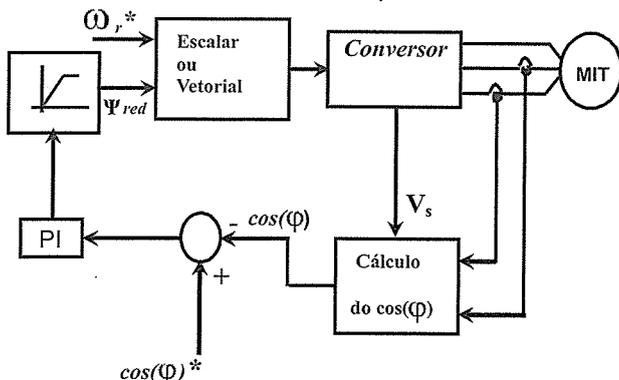


Figura 1- Esquema de controle para o rendimento ótimo pelo controle do $\cos(\varphi)$

Controle Baseado no Modelo

Este tipo de estratégia do rendimento ótimo consiste na modelagem do motor e do conversor envolvido no acionamento, e, através desse modelo, encontrar o ponto de operação ótima definido para um torque de carga e velocidade. Este ponto de operação é calculado diretamente ou por interação. Um problema deste método é a determinação de um estimador de torque de carga. Porém existem várias possibilidades, desde técnicas avançadas de estimação dinâmica a técnicas simples como medir a potência de entreferro e dividi-la pela velocidade angular do estator. O problema dessa técnica, no entanto, são as variações dos parâmetros causadas pela temperatura e efeito da saturação que interfere no modelo da máquina, produzindo, assim, operação com rendimento sub

ótimo. A vantagem deste método em relação àquele, de controle de estados simples, está no fato de que neste tipo de controle, as perdas no inversor são incluídas nos cálculos.

Um esquema de rendimento ótimo para controle baseado no modelo é mostrado na figura 2 que pode ser combinado com as estratégias de controle escalar ou vetorial da máquina. Abrahamsen et al, propõem um modelo de perdas, usando a potência invariante no eixo de transformação trifásico para bifásico, observando que as perdas no motor em regime consistem basicamente em perdas no cobre do estator, P_s , perdas no cobre do rotor, P_r , e as perdas no núcleo, P_{fe} . Estas perdas são representadas no referencial d-q nos seguintes componentes:

$$P_{eixo d} = \left[(\omega_e L_m)^2 \cdot \frac{1}{R_{fe}} + R_s + (\omega_e L_m)^2 \cdot \frac{R_r}{R_{fe}^2} \right] i_{ds}^2$$

$$P_{eixo q} = (R_r + R_s) \cdot i_{qs}^2$$

$$P_{dq} = -2\omega_e L_m \cdot \frac{R_r}{R_{fe}} \cdot i_{ds} \cdot i_{qs}$$

Que usando a expressão do torque fica:

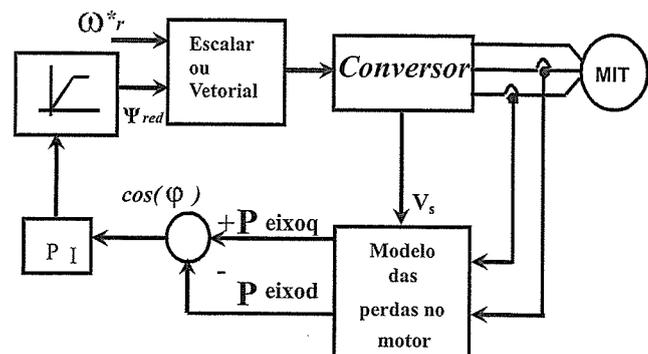
$$P_{Total} = \frac{2}{P} \cdot \frac{T_e}{L_m} \left\{ \left[(\omega_e L_m)^2 \cdot \frac{1}{R_{fe}} + R_s + (\omega_e L_m)^2 \cdot \frac{R_r}{R_{fe}^2} \right] i_{ds} + (R_s + R_r) \cdot \frac{i_{qs}}{i_{ds}} - 2\omega_e L_m \cdot \frac{R_r}{R_{fe}} \right\}$$

onde: T_e é torque eletromagnético, P é o número de pólos do motor, ω_e é a velocidade angular do estator, R_s é a resistência equivalente do estator, R_r é a resistência equivalente do rotor e R_{fe} é a resistência equivalente do núcleo.

Diferenciando a equação acima, com respeito à relação i_{qs}/i_{ds} , encontra-se a expressão que define as mínimas perdas, ficando evidente que as perdas no motor dependente da corrente direta com o fluxo do rotor são iguais às perdas dependentes da corrente em quadratura com o fluxo

$$P_d = P_q$$

Figura 2 - Esquema do rendimento ótimo para o controle baseado no modelo.



Controle por Procura

No controle por procura, também conhecido como controle adaptativo, o controle do rendimento ótimo é feito "on-line". O princípio deste controle é manter a potência de saída do motor constante e encontrar o ponto de operação onde a potência de entrada seja mínima. Este mínimo é encontrado medindo a potência de entrada e mudando iterativamente o nível de fluxo em pequenos degraus até que a potência mínima de entrada seja encontrada. Este método é muito atrativo, pois apresenta algumas vantagens:

- O ponto de rendimento ótimo é encontrado sem o conhecimento dos parâmetros da máquina e do conversor e por isso é completamente insensível às mudanças de parâmetros provocados pela variação da temperatura e os efeitos de saturação, sendo o algoritmo aplicado universalmente a qualquer motor e com diferentes tipos de inversores.

- A potência pode ser medida em qualquer parte do sistema, porém se a potência de entrada é medida do lado da fonte do retificador, a minimização não é restrita apenas às perdas do motor, mas afeta o sistema inteiro. Além disso, as formas de onda de tensão e corrente têm muito pouco conteúdo harmônico que as correspondentes formas de onda do motor e, portanto, a potência a ser medida é mais precisa e fácil de se obter.

Uma malha de otimização do rendimento adaptativo impõe várias limitações importantes no sistema de acionamento, Kirschen et al, tais como:

- A variável que é ajustada para minimizar a potência de entrada deve ser relacionada às perdas do motor por uma função convexa. A convergência será fácil se o mínimo desta função for bem definido. Isto quer dizer que a variável ajustada terá que ter impacto direto na repartição das perdas.

- O controlador de máximo rendimento tenderá reduzir a potência entregue ao motor se a malha de controle de torque não a mantém em um nível especificado

- Idealmente, as malhas de minimização das perdas e de torque serão desacopladas, pois, se este requisito não for alcançado, a malha de controle de torque será incapaz de manter a potência de saída em seu nível original

- O nível de fluxo deve ser reduzido para um máximo rendimento em carga leve. Assim, uma redução lenta diminui a resposta do sistema para uma mudança de torque de carga e decresce o pico de torque que pode ser desenvolvido pelo motor.

Além dessas limitações, pode-se dizer, também, que a maior desvantagem deste método é a necessidade de se medir a velocidade. A figura 3 mostra um esquema de otimização do rendimento, usando o método de controle por procura com a minimização da corrente do estator que pode ser combinada com as estratégias de acionamento de controle escalar e vetorial.

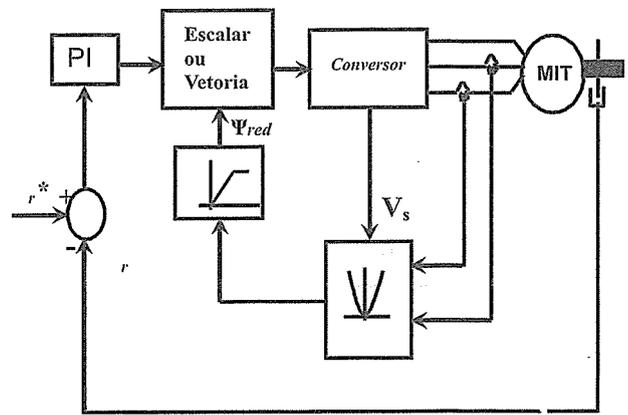


Figura 3 - Esquema para controle por procura do rendimento ótimo com minimização da corrente do estator.

Filosofia dos Métodos de Procura

Em regime permanente, a potência ativa de entrada do acionamento do motor de indução é uma função convexa dependente de muitas variáveis que a torna muito complexa. A filosofia do método de procura é considerar todas as variáveis constantes, exceto uma e variar esta a fim de reduzir as perdas. A idéia dos métodos, aqui apresentados, é variar o fluxo em função da potência, $\Delta = f(\Delta P)$, até encontrar o ponto de mínimas perdas e alcançar, com isso, um equilíbrio entre as perdas no ferro e no cobre que produzam rendimento ótimo.

A filosofia da otimização do rendimento para um acionamento com controle vetorial indireto baseado na medição da potência ativa consumida é mostrada na figura 4. Esta figura ilustra que em regime permanente, com torque e velocidade constantes, a componente da corrente de fluxo, i_{ds} , é decrescida gradualmente, enquanto que a componente da corrente de torque, i_{qs} , é aumentada proporcionalmente, também de maneira gradativa. Com o decréscimo de i_{ds} , o fluxo do rotor diminui também, provocando a redução nas perdas no ferro, porém, com o aumento de i_{qs} , as perdas no cobre são aumentadas. Assim, chega-se a um ponto de mínimas perdas onde, as perdas no núcleo e as perdas no cobre junto com as perdas no conversor alcançam uma potência mínima consumida.

É importante observar que:

- Para carga muito leve, pode haver uma redução da corrente de estator no início do processo de otimização e, com isso, uma redução simultânea nas perdas do motor e do sistema conversor;

- A redução do fluxo ocasiona um aumento de perdas do conversor, devido ao aumento da componente da corrente de torque, i_{qs} .

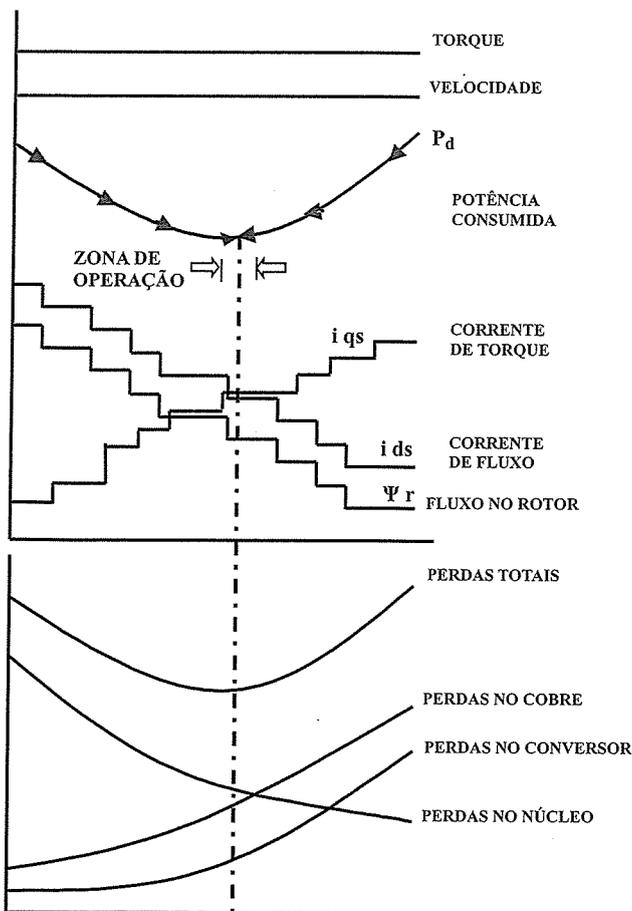


Figura 4 - Filosofia da otimização do rendimento via o método de procura

Alguns Métodos de Procura

A potência de entrada para um acionamento do motor de indução é uma função dependente do fluxo. Os algoritmos propostos na literatura para otimização do rendimento por controle por procura são baseados em métodos matemáticos, tradicionais e heurísticos, de minimização de funções. Nos parágrafos seguintes alguns desses métodos serão definidos de forma sucinta.

Método de Rosenbrock

O método de minimização de função de Rosenbrock aplicado ao algoritmo de procura do rendimento ótimo é um método simples e converge sempre, sendo definido matematicamente por:

$$\Psi_{n+1} = \Psi_n + k \Delta \Psi_n; \quad \begin{cases} k = 1; & \text{se } \Delta P_n < 0 \\ k = -\frac{1}{2}; & \text{se } \Delta P_n > 0 \end{cases}$$

onde, $\Delta P_n = P_n - P_{n-1}$ e $\Delta \Psi_n = \Psi_n - \Psi_{n-1}$.

Neste método o fluxo é alterado gradualmente em uma direção enquanto se aproxima do fluxo ótimo, $\Delta P_n < 0$. Quando o algoritmo detecta o afastamento do ponto ótimo, $\Delta P_n > 0$, o fluxo é alterado em outra direção, até que a exatidão seja alcançada.

Método Proporcional

O algoritmo de procura para este método é representado matematicamente por:

$$\Psi_{n+1} = \Psi_n - k \cdot \Delta P_n \cdot \sin al(\Delta \Psi_n)$$

onde, K é um número positivo.

Este método é usado para acelerar o processo de procura do fluxo ótimo, usando não apenas o sinal da variação de potência ativa consumida, mas também o módulo da potência de entrada. A desvantagem desse algoritmo é que ele apresenta problemas de convergência e oscilações se K é um valor constante. Pode-se obter melhores resultados se K é uma função não linear, variando com as condições do sistema.

Método de Fibonacci

A seqüência de Fibonacci é definida como sendo a seqüência em que o termo seguinte é a soma dos dois termos anteriores ($F_k: 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, \dots$). Este método consiste em amostrar a potência de entrada do motor trabalhando em diferentes níveis de fluxo cuja distância entre eles é uma função de Fibonacci.

Método do Gradiente

Também conhecido como Método de Máxima Descida, é um dos métodos mais importantes de minimização de funções. Sua convergência global, no entanto, é, às vezes, muito lenta. O que permite assegurar que a seqüência por ele gerada tende a um ponto crítico.

O algoritmo é baseado no método de procura clássica no sentido do gradiente, usando o gradiente da potência de entrada. O gradiente é computado, usando-se uma aproximação linear de primeira ordem.

$$\Psi_{n+1} = \Psi_n - k \nabla P_n$$

Devido à dificuldade de se obter uma boa aproximação numérica, o método apresenta problemas em torno do fluxo ótimo.

Método Baseado na Lógica "Fuzzy"

Este método foi desenvolvido por G. C. D. Sousa, baseia-se em um controlador lógico "fuzzy" que usa regras heurísticas para melhorar a velocidade de convergência e evitar oscilações em torno do fluxo ótimo. Os antecedentes são as mudanças da potência de entrada (ΔP_n) e as mudanças de fluxo ($\Delta \Psi_{n-1}$), e o conseqüente é a nova mudança de fluxo ($\Delta \Psi_n$).

Método Misto Utilizando uma Tabela Fuzzy de Rendimento Ótimo Adaptativa.

Esta técnica mostrada no diagrama de blocos da figura 5, combina duas filosofias de controle distintas, a saber: a busca "on-line" do ponto de fluxo ótimo, com o controle baseado em modelo matemático, e foi desenvolvida por D. A. Souza.

Para uma dada condição de torque de carga, T_L , e velocidade, ω_m , a busca do ponto ótimo é implementada, através do método de "Rosenbrock", que determinará qual o nível de fluxo ótimo que resultará na mínima potência de entrada. Uma vez identificado o nível de fluxo ótimo, este é usado para atualizar a base de regras de um controlador "fuzzy" que faz o papel de um modelo matemático implícito do sistema. Inicialmente, para qualquer valor de torque de carga e velocidade, a base de regras fornece valor de fluxo nominal para o sistema.

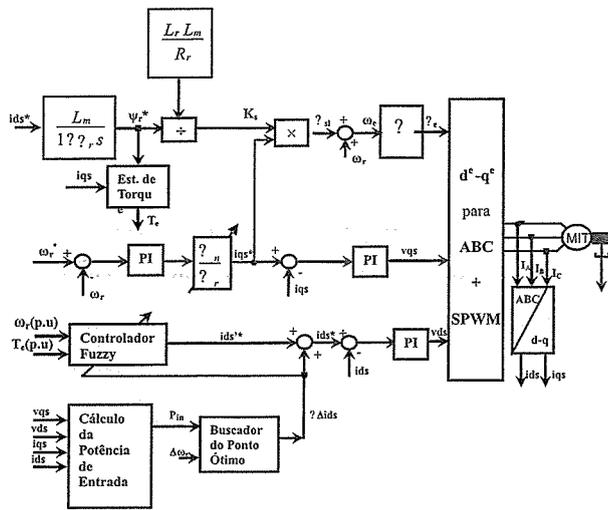


Figura 5 Diagrama de bloco para implementação do método misto de otimização do rendimento

À medida que os pontos de ótimos associados às diversas condições operativas vão sendo identificados, a base de regras é progressivamente atualizada de tal forma que o controlador “fuzzy” aprende a modelar as condições ótimas de operação para todo o plano de torque-velocidade.

Na ocorrência de qualquer situação transitória, a saída do buscador de “Rosenbrock” é zerada, sendo a referência de fluxo da máquina levada naturalmente pelo controlador “fuzzy” para um valor próximo ao nominal, já que valores elevados de torque resultam em pontos ótimos de fluxos também elevados. Portanto, todo o processo de otimização se dá em regime permanente.

Conclusão

A otimização do rendimento de motores de indução, tornou-se, nos dias atuais, um tema de vanguarda num mundo cada vez mais globalizado e de crescente industrialização na economia dos países. A otimização do uso da energia não implica somente baixo custo, mas acarreta também mitigação dos impactos das ações do homem sobre o meio-ambiente. Aplicar a técnica adequada a um sistema de controle de melhoria do rendimento de motores de indução, depende muito da aplicação a que o sistema se destina e o custo de sua implementação. As vantagens de cada técnica, portanto, está relacionada à sua aplicação e às facilidades que se dispõem de implementá-las. Assim, faz-se necessário o conhecimento e a busca por metodologias de controle que impliquem numa diminuição do consumo de energia gerada no planeta sem a necessidade de aumento da produção de energia e, conseqüentemente, o aumento dos impactos desastrosos causados ao meio-ambiente. diminuição do consumo de energia gerada no planeta sem a necessidade de aumento da produção de energia e, conseqüentemente, o aumento dos impactos desastrosos causados ao meio-ambiente.

Referências

ABRAHAMSEN, F. et al. On the Energy Optimized Control of Standard and High-Efficiency Induction Motors in CT and HVAC Applications, IEEE Transaction on Industry Applications, v.34, n°4, 1998.

State of-the-Art of optimal Efficiency Control of Low Cost Induction Motor Drives, Power Electronics and Motion Control PEMC'96, v.2, pp.163-70, 1996.

KIRSCHEN, D. S. et al. “Minimizing Induction Motor Losses by Excitation Control in Variable Frequency Drive”, IEEE Transactions Industry Applications, v.20, n° 5, pp. 1244-50, September/October, 1984.

MORENO-EGUILAZ, J. et al. Induction Motor Optimum Flux Search Algorithms with Transient State Loss Minimization Using a Fuzzy Logic Based Supervisor, Power Electronics Specialistes Conference, 28 t h, Annual IEEE, v. 2, pp. 1302-08, 1997.

SOUSA, G. C. D. & BOSE, B. K. Fuzzy logic based on-line efficiency optimization control of an indirect vector controlled induction motor drive, IEEE Transactions on Industrial Eletronics. v. 42 n° 2, pp. 192-8, 1995.

SOUSA, G. C. D. et al. “Loss Modeling of Converter Induction Machine System for Variable Speed Drive”, Proceedings of the IECON'92, International Conference Eletronics, Control and Instrumentation, v.1, pp.114-20, 1992.

SOUZA, D. A. Otimização do Rendimento de Motores de Indução Utilizando Controle Fuzzy Adaptativo. Dissertação de Mestrado, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo UFES em 22 de fevereiro de 2003.

Apicum: gênese dos campos arenosos e degradação dos manguezais em dois municípios baianos

José Martin Ucha - Professor do CEFET-BA
(ucha@cefetba.br)

Patrícia Santos Santana - Professora do CEFETBA
(patyana@cefetba.br)

Adriana Sanches Rocha Gomes - Professora do CEFET-BA
(Asrg@uol.com.br)

Elane do Nascimento Barreto - Bolsista do Curso de
Administração do CEFET-BA

Geraldo da Silva Vilas Boas - Professor do IGEO/UFBA

Lucedino Paixão Ribeiro - Professor do IGEO/UFBA
(Lucedino@ufba.br)

Resumo

Os campos arenosos hipersalinos ou apicuns são terrenos formados por sedimentos seliciclásticos que se localizam nas bordas dos manguezais. Os resultados da pesquisa indicam que estes terrenos são provenientes da erosão das terras altas do entorno próximo, seja de ilha ou de continente. O apicum, desde que continue recebendo o aporte de sedimentos afeta diretamente o manguezal, recobrendo o substrato lamoso que sustenta a vegetação. Assim, os apicuns interferem negativamente na evolução do ecossistema manguezal, impedindo a sobrevivência das plantas e a sua regeneração.

Palavras-chave

Apicuns. Ecossistema. Manguezal. Sedimentos arenosos.

Introdução

Os apicuns são terrenos formados por sedimentos arenosos margeando as áreas do ecossistema manguezal, podendo aparecer em variadas dimensões. Estas áreas ainda são relativamente pouco estudadas e os pesquisadores, que até o momento se dedicaram ao tema, apontam sua origem na deposição de areias finas por ocasião da preamar, citando Bigarella (1947) como a principal referência sobre a origem desses sedimentos. O conhecimento sobre a gênese dos sedimentos siliciclásticos é fundamental para a compreensão da evolução dos apicuns, bem como para estabelecer as relações entre esses sedimentos e o manguezal, visando à sua proteção, devido à interferência destes sedimentos na sobrevivência deste ecossistema. A pesquisa apresenta os resultados das análises morfológicas e das relações observadas em campo.

Metodologia

Foram selecionadas duas áreas de apicuns representativas dos ecossistemas estuarinos do Estado da Bahia, através de levantamentos aerofotogramétricos espaciais e visitação "in loco", a primeira localizada no Município de Jaguaripe, com interface apicum-continente e a segunda localizada no Município de Valença, com interface apicum-ilha (Figura 1).

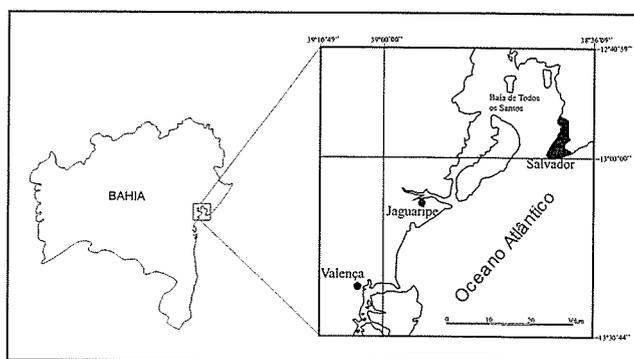


Figura 1 Localização dos sítios de pesquisa

Foi realizado um estudo de campo com coleta de amostras para o exame morfooscópico, identificando as formas de deposição sedimentar. Para a coleta dos sedimentos, foram utilizados amostradores de alumínio. As análises foram executadas nos laboratórios do Departamento de Ciências Aplicadas do Centro Federal de Educação Tecnológica da Bahia e do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia.

Resultados

A análise morfológica dos sedimentos indica que a sua origem está nas terras elevadas do entorno. Tanto no caso da interface apicum-continente (Município de Jaguaripe), como na interface apicum-ilha (Município de Valença), os sedimentos têm origem nos solos das cotas elevadas do entorno próximo. A influência da maré ocorre exclusivamente na distribuição, na seleção e no transporte dos elementos silte e argila para fora do sistema apicum, homogeneizando o pacote sedimentar que se torna excessivamente arenoso, com predomínio das frações areia média e areia grossa.

A profundidade do apicum variou de 5 cm na porção distal em relação ao mangue (Figura 2), em Jaguaripe, até 75 centímetros na porção proximal, na localidade de Valença.

O contato subsuperficial é abrupto com os sedimentos argilosos que caracterizam a lama do manguezal (Figura 3), indicando que o apicum é um pacote sedimentar que recobriu antigas áreas ocupadas por manguezais de portes variados, alguns com plantas

com diâmetro superior a 30 centímetros, sendo encontrados outros indicadores, além dos troncos semi-decompostos de antigas ocupações por espécies típicas do ecossistema manguezal (Figura 4), como raízes e conchas.

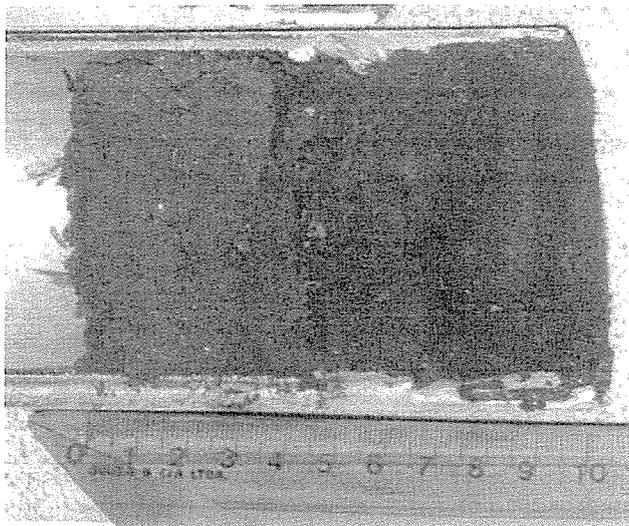


Figura 2 Contato abrupto do material arenoso com a lama do manguezal (Município de Valença).

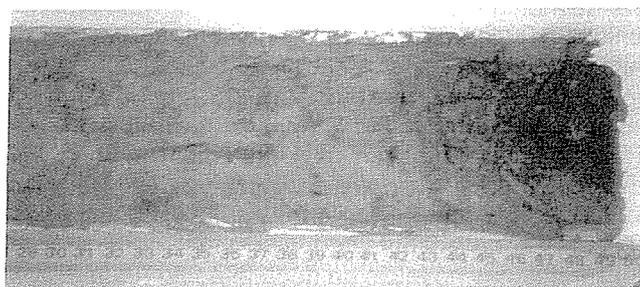


Figura 3 Amostra com 5 cm de material arenoso, coletado na porção distal do apicum do Município de Jaguaripe.



Figura 4 Material arenoso recobrendo raízes remanescentes da antiga vegetação de mangue no Município de Jaguaripe.

O recobrimento da lama por sedimentos siliciclásticos, antes ocupada por manguezal, aponta para uma incapacidade fisiológica das espécies de manguezal de subsistirem no novo ambiente, onde as condições de salinidade e de aridez temporária causadas pela exposição ao sol, com acumulação dos teores de sais e reduzida capacidade de retenção de umidade, estabelecem uma nova relação entre o meio e essas espécies, com a morte e a formação de espaços arenosos despidos de qualquer vegetação. Dispersos em meio aos apicuns, por vezes são encontrados remanescentes de vegetação de

manguezal em fase de degradação, com espécies de porte reduzido e ocupando pequenas áreas ligeiramente rebaixadas em relação ao restante do apicum e em formato circular (Figura 5).



Figura 5 Vegetação remanescente em meio ao apicum (Município de Valença).

Conclusão

Os resultados indicam que a origem dos sedimentos que formam o apicum está nas terras do seu entorno e que as marés têm influência apenas na sua homogeneização e que a sua participação no transporte das frações mais pesadas é restrito às proximidades da fonte. Os sedimentos que formam o apicum recobrem a vegetação do ecossistema manguezal que desaparece sob o pacote arenoso, permitindo afirmar que o apicum se desenvolve às expensas do ecossistema manguezal.

Considerando que os diversos autores que têm discutido o tema apicum, utilizam uma definição que não reflete a realidade da sua gênese e, por conseqüência, das relações entre o apicum e o manguezal, propõe-se a seguinte conceituação para o termo: *apicuns são depósitos sedimentares quartzosos localizados entre a vegetação de manguezal e as terras permanentemente emersas, produto da ação erosiva sobre os solos próximos e que recobrem sedimentos lamosos de manguezal, conduzindo ou já tendo concluído a extinção da vegetação original.*

Referência

BIGARELLA, J.J. Contribuição ao estudo da planície litorânea do Estado do Paraná. Boletim Geográfico, 1947. (Transcrição de Arquivos de Biologia e Tecnologia. V.1. Instituto de Biologia e Pesquisas Tecnológicas. Curitiba, 1946).

Desenvolvimento de componente cerâmico obtido pelo processo de moldagem por injeção a baixa pressão

Maria Rosimar de Sousa

Professora do CEFET-BA/UNED-Vitória da Conquista.
Doutoranda em Ciência e Engenharia dos Materiais, área de
concentração: Revestimento Cerâmico, pela Universidade Federal
do Rio Grande do Norte- UFRN.

Resumo

Este artigo tem como objetivo descrever o processo de moldagem cerâmica por injeção a baixa pressão aplicado na fabricação de um componente cerâmico (guia-fio) utilizado na indústria têxtil.

Palavras-chave

Moldagem, cerâmica, injeção, baixa pressão, processo.

Introdução

Nos últimos anos, tem havido um crescente interesse por materiais cerâmicos, devido à abundância de suas matérias-primas e às propriedades específicas que podem apresentar. O processo de moldagem cerâmica por injeção é uma técnica de fabricação que permite a confecção automatizada de peças cerâmicas de pequenas dimensões e formas extremamente complexas (Nogueira et al, 1993; Nogueira et al, 1994), com densidade muito próximas da teórica, com pouca ou nenhuma operação secundária (Batalha, 1991). A técnica de moldagem é aplicável a pós metálicos e pós cerâmicos que, combinados com uma mistura com determinada viscosidade, podem ser moldados (German, 1997).

O presente trabalho tem por objetivo principal estudar as etapas do processo de moldagem por injeção a baixa pressão, nas proporções de 80% Al₂O₃ e 20% de veículo orgânico em peso, a fim de avaliar uma matéria-prima regional, a cera de carnaúba, como adequada e competitiva para utilização na moldagem de peças cerâmicas. A seleção da melhor proporção do veículo orgânico é obtida, através de ensaios de viscosidade e análises térmicas são realizadas para elaborar a curva de remoção do veículo orgânico. As caracterizações físicas e mecânicas das peças fabricadas são realizadas por meio de ensaios de densidade, porosidade, contração linear, dureza e tenacidade à fratura.

Processo de moldagem cerâmica por injeção (MCI)

O processo básico da MCI, de misturar pós cerâmicos sob estado plástico, surgiu no final do século XIX e se desenvolveu como o principal processo de conformação da indústria de plásticos (Mangels e

Trela, 1984). A MCI foi usada pela primeira vez como um processo de fabricação de cerâmicas no final dos anos 20, na produção de velas de ignição para automóveis (Schwartzwalder, 1949). Como não havia uma tecnologia capaz de superar os problemas técnicos desse processo, os fabricantes de velas de ignição optaram por outros processos alternativos como a prensagem isostática (Edirisinghe e Evans, 1987). Desta forma, tornou-se viável a confecção de peças complexas, com esses materiais em escala industrial. A potencialidade do processo de MCI em produzir peças complexas com pouca ou nenhuma necessidade de acabamento, chamou a atenção de várias indústrias no início da década de 80 (Mangels, 1983).

Etapas e parâmetros

O processo de moldagem de injeção cerâmica pode ser dividido em cinco etapas distintas e cada uma delas precisa ser desenvolvida de modo que a introdução de defeitos seja inibida (Zhang et al, 1989):

- a) Seleção de Material (Pó e Veículo Orgânico);
- b) Mistura;
- c) Injeção;
- d) Remoção do Veículo Orgânico;
- e) Sinterização.

A mistura a ser utilizada na MCI tem de preencher algumas condições básicas, como propiciar uniformidade de dispersão e promover um fluxo mais satisfatório, favorecendo, desta forma, uma uniformidade de enchimento do molde. Geralmente, os veículos orgânicos são constituídos por compostos orgânicos poliméricos de baixo peso molecular (alto índice de fluidez) e são os preferidos por se adequarem mais ao critério de baixa viscosidade. As características de fluência da mistura, sua molhabilidade subsequente e a qualidade da peça final dependem da homogeneidade da mistura (Mutsuddy, 1995). A etapa de moldagem é feita com equipamentos essencialmente iguais aos usados em moldagem de plástico (Batalha, 1991). Antes de proceder a sinterização, o veículo orgânico tem que ser removido. É uma etapa crítica no processo da moldagem cerâmica por injeção, pois pode ocorrer o surgimento de defeitos causados por tensões internas, evolução de gases e torção. Por último, temos a etapa de sinterização que propicia a difusão dos átomos para os

vazios deixados pela saída do veículo orgânico, promovendo a retração e a densificação da peça. A qualidade final da peça produzida é função de todas as etapas, ou seja, defeitos criados em etapas intermediárias podem não ser corrigidos em posteriores.

Metodologia

O fluxograma apresentado na Fig.1 descreve sucintamente as etapas desenvolvidas no processo. A alumina é do tipo A-2011SG com as seguintes características físicas: tamanho médio de partículas de 2,6 μ m; área superficial específica de 1,4 m²/g e densidade sinterizada 3,96 g/cm³. O veículo orgânico é composto de cera de carnaúba do tipo 1, polietileno de baixa densidade (HI-865) e ácido esteárico com peso molecular de 284,49.

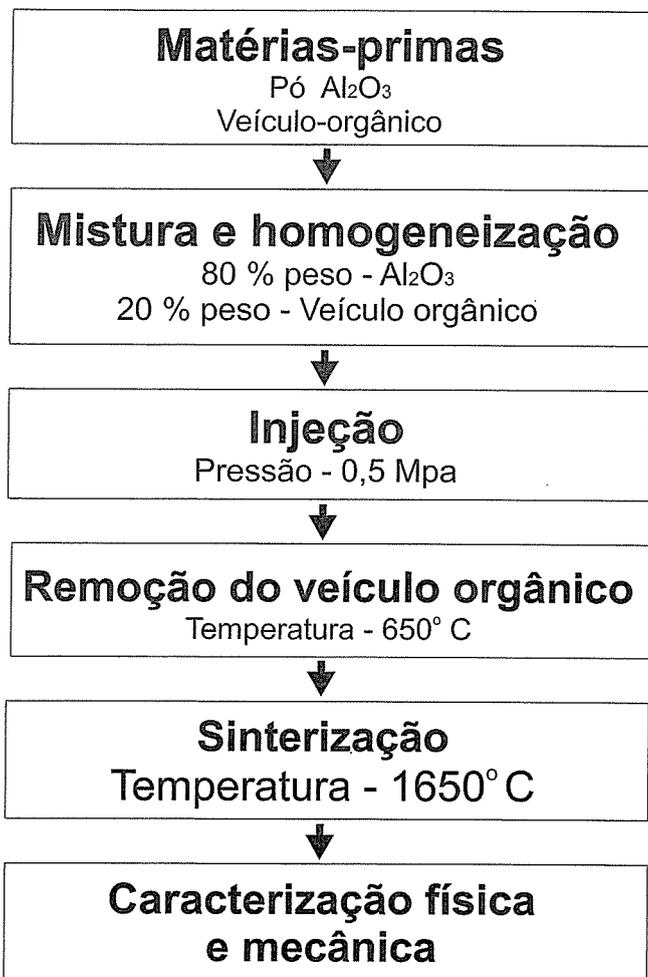


Figura 1. Esquema do procedimento experimental.

Resultados e Discussões

Matéria-prima

A alumina utilizada possuía as características consideradas ideais para o processamento de cerâmica moldada por injeção, definidas pelo próprio fabricante. A cera de carnaúba foi utilizada no sistema como componente majoritário. O polietileno, no sistema de componentes, foi usado como plastificante. O ácido esteárico, que é caracterizado por melhorar o molhamento entre o pó e o veículo orgânico e reduzir a viscosidade da mistura, foi utilizado como componente surfactante. Foram utilizadas três composições diferentes da mistura: A (94%, 5%, 1%), B (92%, 7%),

1%) e C (98%, 8%, 1%), em volume, sendo, respectivamente, cera de carnaúba, polietileno e ácido esteárico. Desta forma, a solução de compromisso adotada foi um veículo orgânico com 94% de cera de carnaúba, 5% de polietileno e 1% de ácido esteárico, conforme mostrada na Fig. 2.

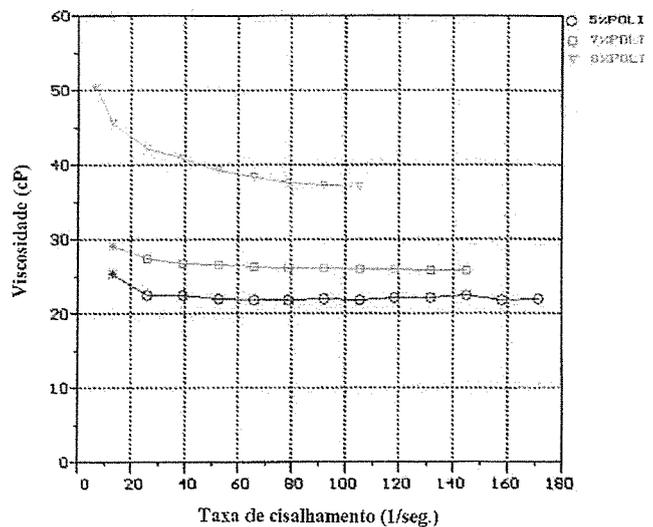


Figura 2. Viscosidade X taxa de cisalhamento do veículo orgânico.

Mistura

A obtenção das misturas pó-veículo orgânico, para alimentação do processo de moldagem a baixa pressão, foi realizado em extrusora. Os estudos de análise termogravimétrica e ensaios de viscosidade foram realizados nas misturas, usando as composições de 80% em pó de alumina e 20% de veículo orgânico em peso, com proporções variadas dos componentes cera de carnaúba, polietileno e ácido esteárico. Pode-se observar que as perdas de massas para as composições A, B e C são praticamente iguais como mostrado na Tab.1. Todos apresentaram aproximadamente o mesmo percentual de perda máxima de massa com a temperatura. Pode-se concluir, assim, que nas três misturas A, B e C, a saída do veículo orgânico ocorreu na mesma faixa de temperatura.

	Mistura (A)	Mistura (B)	Mistura (C)
Perda de Massa (%)	20,195	19,715	20,073

Tabela 1. Percentual de perda de massa das misturas.

O gráfico da Fig.3 apresenta a viscosidade das misturas em função da taxa de cisalhamento aplicada. Todas as curvas foram obtidas a uma temperatura de 140°C e com uma composição de 80% de alumina e 20% de veículo orgânico utilizada nas seguintes proporções: curva com marcação circular (-o-) 94% de cera de carnaúba, 5% de polietileno e 1% de ácido esteárico; curva com marcação quadrada (-□-) 92% de cera de carnaúba, 7% de polietileno e 1% de ácido esteárico; curva com marcação triangular (-▽-) 91% de

cera de carnaúba, 8% de polietileno e 1% de ácido esteárico.

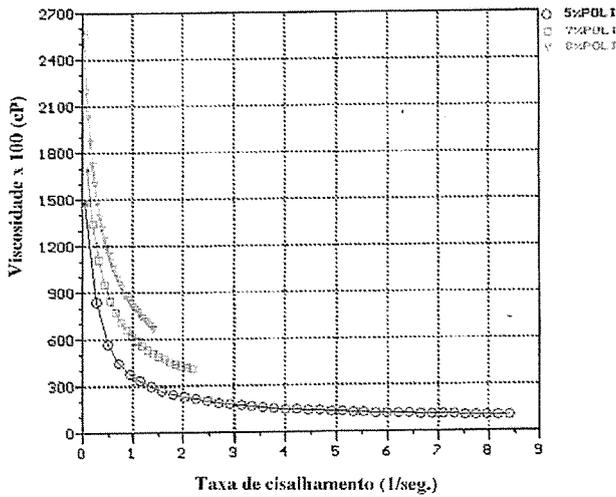


Figura 3. Viscosidade X Taxa de cisalhamento das misturas A, B e C.

Injeção

As misturas foram injetadas a temperatura de 1400C, e o ciclo de moldagem teve duração em torno de 18 segundos, tempo considerado ótimo em relação ao previsto em trabalhos que o estimam em 1 minuto (Fortulan, 1994).

Remoção do veículo orgânico

A remoção do veículo orgânico foi obtida pelo processo térmico. Um dos maiores problemas encontrados na extração do veículo orgânico foi o tempo relativamente longo. A rampa de temperatura usada é apresentada na Fig. 4.

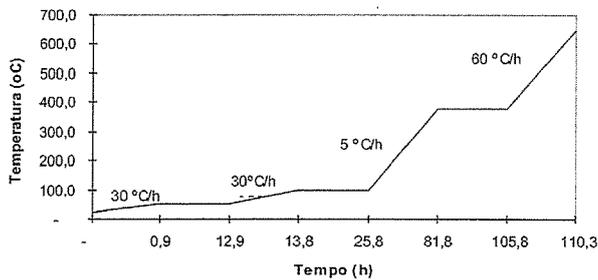


Figura 4. Curva de temperatura X tempo utilizado para remoção do veículo orgânico.

Sinterização

A Figura 5 apresenta os guia-fios cerâmicos, após a sinterização em temperatura de 1650°C. Estes apresentaram bom aspecto físico, sem rachaduras e com uma densificação de 93% da densidade teórica, o que evidência a viabilidade do processo de moldagem a baixa pressão, pois a sinterização da alumina ocorreu ao ar sem o auxílio de aditivos.

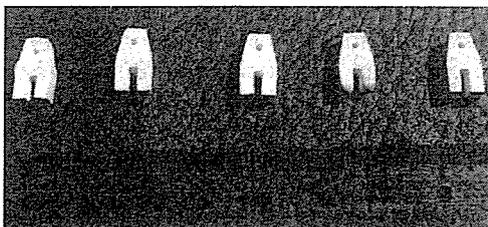


Figura 5. Guia-fios sinterizados a 1650°C

Caracterizações físicas e mecânicas

Variação de massa

A Tabela 2 mostra a variação de massa das peças, no processo de moldagem por injeção a baixa pressão, nas etapas de remoção e de sinterização.

Variação de massa	$\Delta m/m_0$ (%)
Remoção do V.O.	Fase de sinterização
19,39±0,01	3,26±0,06

Tabela 2. Variação de massa das peças.

Percebe-se que a perda de massa é normalmente observada na etapa de remoção do veículo orgânico onde o volume de massa removida é bem maior do que na sinterização. A análise feita por termogravimetria de cada componente e da mistura teve como objetivo verificar o comportamento da perda de massa do veículo orgânico e das misturas com a temperatura.

Retração linear

A Tabela 3 apresenta os valores de retração linear das peças durante as etapas de injeção e sinterização.

Retração linear média $\Delta L/L_0$ (%)	
Fase de injeção	Fase de sinterização
2,24	14,65

Tabela 3. Valores de retração linear.

Tempo (h)	Densidade Média (g/cm ³)	Porosidade (%)
2	3,679 0,060	7,09 0,02

Tabela 4. Valor da densidade média e porosidade do guia-fio sinterizado a 16500C.

Microestrutura do sinterizado

A Figura 6 mostra a micrografia eletrônica de varredura das amostras polidas e atacadas termicamente, que apresentam porosidade elevada, gerando uma má densificação do corpo.

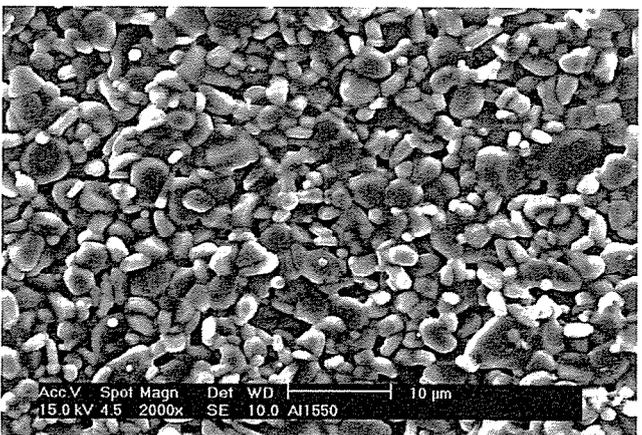


Figura 6. Al-2011SG - ataque térmico a 1550°C - 1h - Tamanho do grão 2,05 µm.

As medidas de tamanho de grão realizadas apresentam tamanho médio de 2,05µm, verificando-se uma pequena variação nas dimensões. A porosidade excessiva da alumina verificada em nosso trabalho é produzida na etapa de remoção do veículo orgânico. Uma vez as cerâmicas solicitadas mecanicamente, estes vazios passam a ser origens de fratura.

Dureza e tenacidade à fratura

Os valores de dureza superficial e tenacidade à fratura, apresentados na Tab.5, foram obtidos, utilizando-se a técnica de impressão Vickers através de ensaios de 5 amostras, sendo realizadas 6 impressões em cada uma delas. O método da tenacidade à fratura é a indentação, bastante utilizada em materiais cerâmicos (Evans, 1976).

Dureza Vickers (HV)	Tenacidade à Fratura K _c (MPa.m ^{1/2})
Dureza Média (HV) Obtida	Tenacidade à fratura K _c (MPa.m ^{1/2})
1519±133	2,22±0,33

Tabela 5. Valores de dureza e tenacidade à fratura para a alumina.

A dureza média obtida foi de 1519 kg/mm² e desvio-padrão de 133, valores compatíveis com os obtidos por Nogueira (1992) utilizando a alumina A152-SG pelo mesmo processo, e compatíveis com (Fanelli, 1989; Nogueira, 1992), obtidos pelo processo de moldagem de injeção e usando alumina A16-SG.

Verificou-se que valor da tenacidade à fratura média K_c de 2,22 MPa.m^{1/2} (desvio padrão de 0,333), obtido no trabalho, é inferior aos obtidos por Acchar (1986) e Nogueira (1992). Isto se deve, principalmente, à porosidade excessiva de 7,09% das amostras injetadas.

Conclusões

A utilização de matérias-primas acionais para o processo de injeção de cerâmicas a baixa pressão foi demonstrada ser viável tecnicamente.

O desenvolvimento de veículo orgânico a base de cera de carnaúba evidenciou um grande potencial como componente majoritário em aplicações no processo de moldagem cerâmica a baixa pressão.

O processo de moldagem por injeção cerâmica a baixa pressão tornou-se mais viável por permitir características, como versatilidade de instalação da máquina e utilização de molde relativamente baratos, em relação ao processo de alta pressão.

As amostras foram moldadas sob uma pressão de 0,5 MPa e, após o programa de remoção do veículo orgânico cuidadosamente controlado, foram sinterizadas e alcançaram um volume de densificação de 93% da densidade teórica.

O estudo de moldagem por injeção a baixa pressão para fabricação de guia-fios cerâmicos apresentaram peças com propriedades comparáveis àquelas obtidas pelo processo de moldagem por injeção a alta pressão. Nessas investigações, as amostras apresentaram

dureza (Hv-20) de 1519 kg/mm² e tensão de fratura de 2,19 MPa.m^{1/2}.

Referências

ACCHAR, W.; COSTA, C.R.C.; MADRUGA, T.P.. "Estudo da Influência da Pre-trinca no valor de Tenacidade à Fratura de Alumina Sinterizada de Alta Pureza", Cerâmica, vol. 32, nº.197, pp.105-108, 1986.

ALCOA ALUMÍNIO S/A. "Calcined Alumina APC-2011". São Paulo: Folder, 1994.

BATALHA, G. F.. "Conformação de Peças Metálicas pela Moldagem de Pós por Injeção (MPI) - Técnica e Potencialidade". COMPO-ABM, São Paulo: pp.78-92, 1991.

DANTAS, T. N. C.. "Alternativas Tecnológicas para Cera de Carnaúba". Natal: CCE/CT, 1993.

EDIRISINGHE, M.J.; EVANS, J.R.G.. "Rheology of Ceramic Injection Moulding Formulations", British Ceramic Transactions Journal, vol. 86, pp. 18-22, 1987.

EVANS, A.G.; CHARLES, E.A.. "Fracture Toughness Determinations by Indentation", J. Am. Ceram. Soc., vol. 59, nº.7-8, pp. 371-372, 1976.

FANELLI, J. A., et al. "New Aqueous Injection Molding Process for Ceramic Powders", J. Am. Ceramic Soc., vol. 72, pp. 1833-36, 1989.

GERMAN, R.M.; BOSE, A.. "Injection Moulding of Metals and Ceramics", MPIF. New Jersey: USA, 1997.

KINGERY, W.D. Et al. "Introduction To Ceramics", Second Edition. New York: John Wiley & Sons. 1976. pp. 490-497.

MANGELS, J.A.. "Low-Pressure Injection Molding", Caradyne Inc, vol. 73(5), pp. 37-42, 1994.

MUTSUDDY, B.C.; Ford, R.G.. "Ceramic Injection Molding", ed. Chapman & Hall. London: U.K., 1995. pp.7-245.

NOGUEIRA, R.E.F.Q.. "Processing and Properties of Moulded Alumina Bodies", Londres, 192p. Tese (Doutorado) - Brunel University, 1992.

_____. "Potencialidade e Particularidade do Processo de Moldagem de Pós Cerâmicos por Injeção", Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, ABCM, Brasília: vol. 1, 1993.

NOGUEIRA, R. E. F. Q. et al. "Contribuição para o Estudo do Desgaste de Cerâmicas Injetadas a Base de Alumina", Anais do III Seminário Brasileiro de Materiais Resistentes ao Desgaste, ABM, Fortaleza: pp.81-92, 1994.

SCHWARTZWALDER, K. "Injection Molding of Ceramic Materials", Amer. Ceram. Soc. Bull., vol. 28, pp.459, 1949.

ZHANG, J. G.; EDIRISINGHE, J.; EVANS, J. R. G.. "A Catalogue of Ceramic Injection Moulding Defects and Their Causes", Industrial Ceramics, vol. 9, nº 2, pp.72-82, 1989.