

MODELAGEM DA JIGAGEM DE MINÉRIO DE FERRO USANDO O MODELO DE DISPERSÃO¹

Anderson Silva das Chagas²
Luís Marcelo Marques Tavares³

Resumo

A jigagem ocupa uma posição importante no beneficiamento de minérios de ferro, representando uma alternativa viável na concentração de minérios dentro de faixas de tamanhos intermediárias e grossas, nas quais a flotação não é aplicável. A avaliação, a nível de projeto, da pertinência e eficácia da utilização da jigagem dentro do circuito de beneficiamento de um minério de ferro demanda a realização de experimentos, que necessitam de volumes de amostra que nem sempre se encontram disponíveis. Uma alternativa atraente é a simulação computacional do processo de jigagem. O trabalho demonstra a aplicação do modelo de dispersão da jigagem, desenvolvido por Tavares e King. O modelo, originalmente validado apenas para o beneficiamento de carvão mineral, é utilizado no presente trabalho na simulação da jigagem de minérios de ferro da Austrália e Índia. A variação do único parâmetro no modelo que caracteriza a estratificação nos diferentes casos é analisada e a capacidade preditiva do modelo nesse tipo de aplicação é discutida. O modelo se apresentou capaz de descrever adequadamente a jigagem em batelada de forma satisfatória, mostrando um efeito do tamanho de partícula na constante de estratificação.

Palavras-chave: Modelagem; Simulação; Jigagem; Estratificação.

MODELING OF JIGGING OF IRON ORE USING THE DISPERSION MODEL

Abstract

Jigging holds an important position in iron ore beneficiation, representing a viable alternative in the concentration of minerals in the intermediate and coarse size ranges, in which flotation is not applicable. The evaluation of the relevance and effectiveness, at the design level, of using jigging within a given iron ore processing circuit demand experiments that require sample volumes that are not always available. An attractive alternative is the use of modeling and simulation of the jigging process. This paper demonstrates the application of the dispersion model of jigging, developed by Tavares and King. The model, originally validated only on coal preparation is used in the present work on the simulation of jigging of iron ores from Australia and India. The variation of the only parameter in the model that characterizes the stratification in different cases is analyzed and the predictive ability of the model in such application is discussed. The model demonstrated to be capable of appropriately describing batch jigging results, showing a size effect on the specific stratification constant.

Key words: Jigging; Dispersion; Bed stratification.

¹ Contribuição técnica ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 1 a 4 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Graduando em Engenharia Metalúrgica, Laboratório de Tecnologia Mineral, Escola Politécnica, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

³ Engenheiro de Minas, M.Sc., Ph.D., Professor Associado, Laboratório de Tecnologia Mineral, Programa de Engenharia Metalúrgica e Materiais, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A jigagem foi e continua a ser amplamente usada na concentração de minérios, em faixas de tamanhos acima da aplicável a flotação, devido aos seus baixos custos de operação, elevada capacidade e robustez.⁽¹⁾ Sua aplicação à concentração de minérios de ferro e manganês é particularmente atrativa, pois permite separação a densidades de corte que seriam impraticáveis de atingir nos equipamentos de separação em meio denso, seus principais concorrentes.

A implantação de uma etapa de jigagem no projeto de uma usina de processamento mineral demanda a capacidade de prever quantitativamente o desempenho e a eficácia da aplicação do processo. Uma alternativa para previsão da jigagem é o uso de modelagem e simulação do processo, uma vez que a realização de experimentos para esse fim é trabalhosa e necessita de volumes de amostra que nem sempre estão disponíveis. Embora estudos envolvendo a modelagem matemática da jigagem já sejam realizados há mais de 80 anos,⁽¹⁻³⁾ um modelo matemático bastante eficaz, denominado modelo de dispersão da jigagem, foi desenvolvido há menos de duas décadas por Tavares e King.⁽⁴⁾

O presente trabalho demonstra a aplicação do modelo de dispersão na simulação da jigagem de minérios de ferro e discute a capacidade preditiva do modelo nesse tipo de aplicação.

2 DESCRIÇÃO DO MODELO

Tavares e King⁽⁴⁾ reconheceram que a estratificação ideal, como visualizada por Mayer⁽²⁾ em sua teoria potencial, nunca seria alcançada devido ao fluxo dispersivo na jigagem que tende a remisturar as partículas e, assim, destruir o perfil ideal de estratificação. O resultado é que a estratificação alcançada na prática representa um balanço entre as forças dispersivas e de estratificação. O desempenho de separação de um jigage é determinado calculando o perfil de densidades do leito estratificado, que resulta da ação da jigagem, usando a composição real do leito. Considerando um estado dinâmico de equilíbrio do leito, no qual o fluxo de estratificação para partículas contidas em cada uma das classes de massa específica i , na fração granulométrica j , é contrabalanceado pelo correspondente fluxo dispersivo, é possível escrever os gradientes de concentração volumétrica como:

$$\frac{dC_{ij}(h)}{dh} = -\alpha_j C_{ij}(h) [\rho_{ij} - \bar{\rho}(h)] \quad i = 1, 2 \dots n \quad (1)$$

Na qual C_{ij} são as frações volumétricas dos componentes i e j na altura normalizada h do leito, ρ_{ij} a massa específica para partículas do tipo i contidas na faixa de tamanho j e $\bar{\rho}$ a massa específica média das partículas contidas na altura normalizada h . A constante de estratificação α_j é definida como:⁽⁵⁾

$$\alpha_j = \frac{u_j g V_j H}{D_j} \quad (2)$$

Na qual V é o volume da partícula, H a altura total do leito, D o coeficiente de dispersão, u é a mobilidade específica devido a interação fluido-partícula e g a aceleração da gravidade. Com isso, a constante de estratificação varia com o tamanho de partícula, conforme destacado por Tavares⁽⁵⁾ e Rao.⁽⁶⁾ Embora o modelo não disponha de relações explícitas entre as principais variáveis operacionais da jigagem (ciclo de jigagem, frequência e amplitude de pulsações, etc.),⁽¹⁾ evidências

existem que tanto u quanto D são influenciados pela intensidade das pulsações no leito. Isso é ilustrado na Figura 1, que mostra que uma velocidade mínima ascendente da água ($V_{f,min}$) é necessária para oferecer mobilidade ao leito. Entretanto, velocidades excessivamente altas do fluido resultam em aumentos expressivos da dispersão para partículas de um dado tamanho, sem ganho equivalente de velocidade de penetração das partículas no leito. Com isso, existe uma condição responsável pela maximização do parâmetro α para partículas contidas em cada classe de tamanhos j .

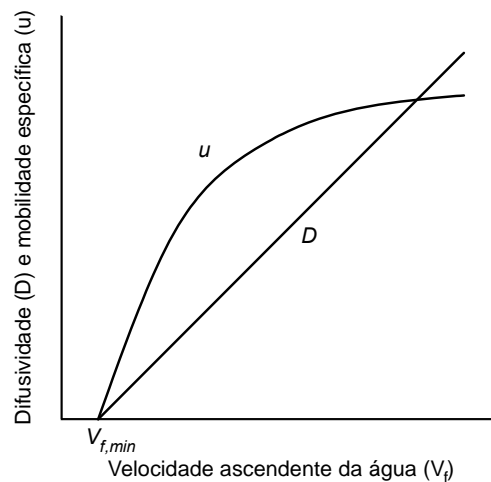


Figura 1. Variação do coeficiente de mobilidade específica e do coeficiente de difusividade com a velocidade ascendente do fluxo de água.⁽⁷⁾

A solução das n equações diferenciais (Equação 1) resulta nos perfis verticais de concentração das partículas no equilíbrio, que podem ser usados para avaliar o desempenho do processo de jigagem.

Dentre as vantagens desse modelo podem ser citados o fato dele não ser baseado em curvas de partição determinadas empiricamente para descrever a separação alcançada no jigge, além de demandar apenas o ajuste de um único parâmetro para descrever a estratificação para cada tamanho de partícula. Valores de α variam tipicamente entre $0,005 \text{ m}^3/\text{kg}$ para uma separação muito ineficiente até $0,2 \text{ m}^3/\text{kg}$ para uma separação extremamente precisa. Embora independente da distribuição densimétrica da alimentação, α depende do tamanho e forma das partículas, assim como das condições operacionais do jigge (Figura 1), embora essas relações funcionais ainda não tenham sido suficientemente estabelecidas na prática. Assim, a determinação do valor da constante α requer o ajuste do modelo a resultados experimentais da jigagem.

3 COMPARAÇÃO DO MODELO A RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A verificação direta da validade do modelo de estratificação exige a comparação das soluções obtidas com o modelo a resultados experimentais, preferencialmente de jigagem em batelada, no qual o transporte lateral é inexistente e a separação das camadas estratificadas pode ser considerada perfeita. Resultados de tais experimentos foram obtidos na literatura para a separação de minérios de ferro e são analisados a seguir.

Uma série de experimentos pertinentes foi reportada por Miller⁽⁸⁾ e dizem respeito ao beneficiamento de finos de um minério de ferro australiano, de tamanhos entre 1 mm

e 6 mm, em um jigge Batac de laboratório de 50 cm de largura, operado em batelada. A análise densimétrica da alimentação foi realizada por meio de ensaios de afunda-flutua com fracionamento da alimentação em 4 intervalos de densidade, com medida do teor de ferro contido em cada uma delas. Após cada ensaio de jigagem o leito estratificado era seccionado em seis camadas, sendo cada uma delas pesada e analisado o seu teor de ferro. Resultados de ajuste do modelo são comparados na Figura 2 a resultados de um dos experimentos, a qual mostra que o modelo com apenas um parâmetro ($\alpha = 0,013 \text{ m}^3/\text{kg}$) é capaz de descrever efetivamente a jigagem de materiais que apresentam alguma variabilidade em granulometria. Neste caso não foi possível aplicar o modelo considerando diferentes tamanhos de partículas uma vez que tanto a análise densimétrica da alimentação quanto das camadas após estratificação não discriminaram a granulometria. Os perfis de estratificação para os diferentes componentes são mostrados na Figura 3, que sugere o relativo sucesso da separação entre os diferentes componentes no leito.

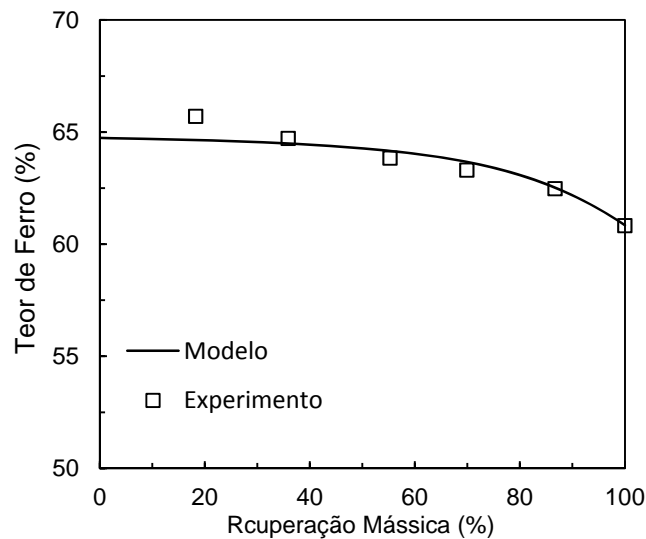


Figura 2. Comparação do modelo de estratificação ($\alpha = 0,013 \text{ m}^3/\text{kg}$) a resultados da jigagem de finos de minério de ferro australiano (6 x 1 mm) em jigge Batac.⁽⁸⁾

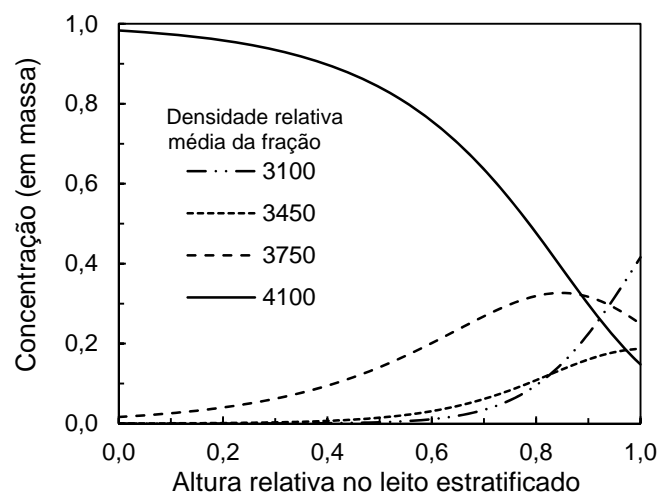


Figura 3. Perfis de concentração vertical no leito previstos para a jigagem de finos de minério de ferro australiano (6 x 1 mm) em jigge Batac.⁽⁸⁾

Em um estudo mais recente, Rao et al.⁽⁹⁾ apresentaram resultados da jigagem em batelada de minério de ferro, com granulometria contida no intervalo entre 30 mm e 6 mm, oriundo da região de Odisha (Índia), realizada em um jigue APIC, também pulsado a ar, em escala piloto. Após a jigagem, as camadas fatiadas do leito foram analisadas e suas massas específicas médias determinadas por picnometria. A Figura 4 compara o ajuste do modelo, para $\alpha = 0,007 \text{ m}^3/\text{kg}$, com a massa específica encontrada ao logo das camadas do leito. É possível notar que o modelo também respondeu de maneira relativamente satisfatória, apesar da adoção de uma constante de estratificação única para a ampla faixa granulométrica da amostra, também resultado da inexistência de dados discriminados para a alimentação e o leito em função do tamanho de partícula. Os perfis de estratificação simulados nesse caso são apresentados na Figura 5, que mostra o alto grau de mistura dos diferentes componentes nas diferentes camadas.

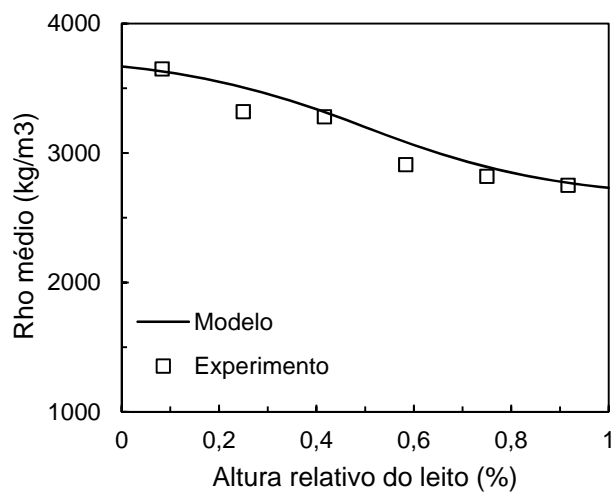


Figura 4. Comparação do modelo de estratificação ($\alpha = 0,007 \text{ m}^3/\text{kg}$) a resultados da jigagem de minério de ferro indiano (30 x 6 mm) em jigue APIC.⁽⁹⁾

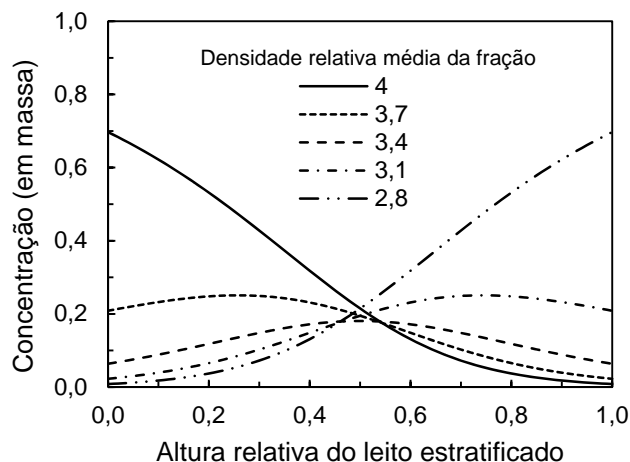


Figura 5. Perfis de estratificação simulados para a jigagem de minério de ferro indiano (30 x 6 mm) em jigue APIC.⁽⁹⁾

Infelizmente, dados da literatura não se encontram disponíveis que permitam aplicar o modelo de dispersão na descrição da jigagem de minérios de ferro contidos em diferentes intervalos de tamanhos de partículas. A fim de ilustrar esse efeito,

resultados da jigagem (jigge Batac) de carvão mineral contido nas faixas de 64 x 8 mm e 8 x 1 mm são comparados ao ajuste do modelo na Figura 6. Eles mostram que o modelo é capaz de descrever com algum sucesso a estratificação em função do tamanho de partícula, com constantes de estratificação iguais a 0,035 e 0,013 m³/kg, para as partículas contidas nas faixas mais grossas e finas, respectivamente. O valor mais alto obtido para a faixa granulométrica mais grossa é esperado devido ao decréscimo na difusividade e energia cinética com o aumento do tamanho das partículas, demonstrando uma maior eficiência na separação de partículas grossas por jigagem.

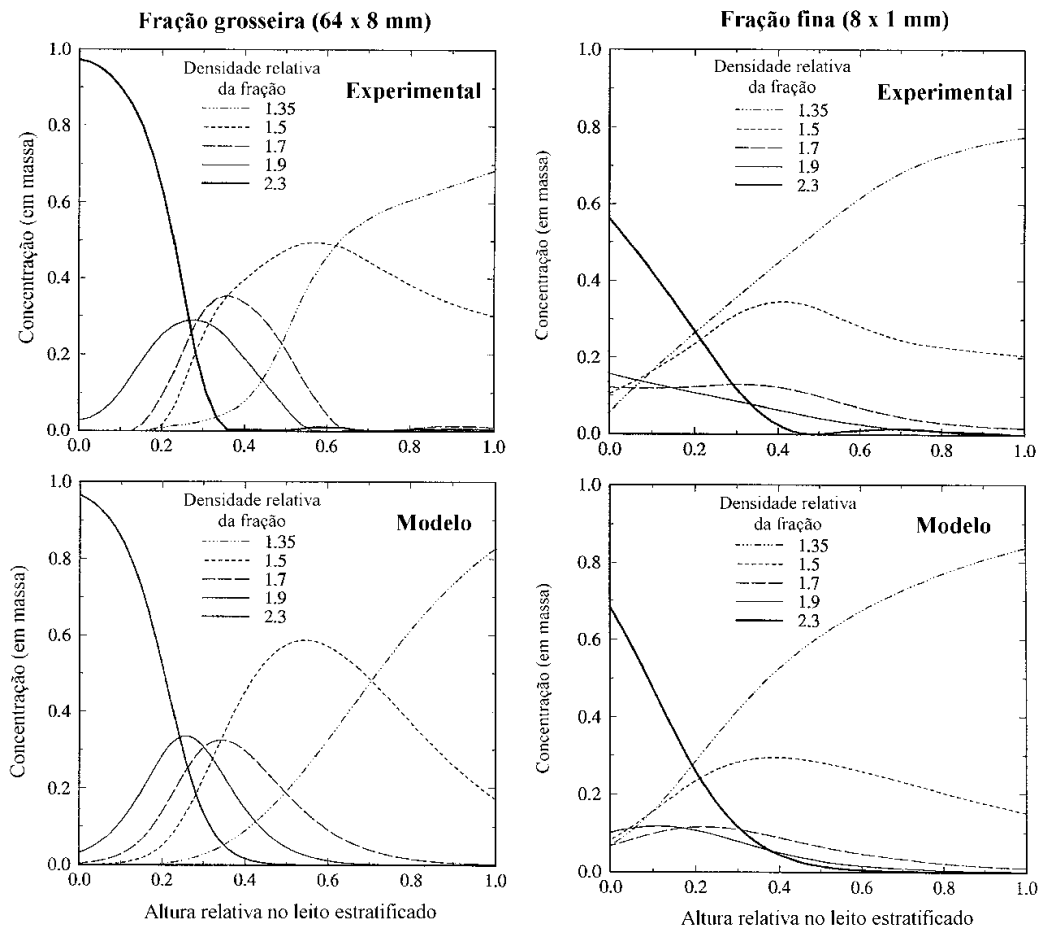


Figura 6. Comparação de perfis de estratificação para diferentes tamanhos de partícula ($\alpha = 0,035 \text{ m}^3/\text{kg}$ para 64 x 8 mm e $\alpha = 0,013 \text{ m}^3/\text{kg}$ para 8 x 1 mm) na jigagem de carvão mineral australiano.⁽¹⁰⁾

É importante ressaltar, entretanto, que a teoria potencial da jigagem⁽²⁾ prevê que a separação de partículas de diferentes tamanhos também resulta em um efeito adicional de segregação por tamanhos, não incorporado na Equação 1. Esse efeito foi estudado por Tavares⁽¹¹⁾ por meio da simulação de Monte Carlo, o qual mostrou que há uma tendência de partículas finas de concentrarem no topo do leito, com grossos no fundo, o que é consistente com a teoria potencial de Mayer. Esse efeito não se mostrou evidente na Figura 6, mas é comum na estratificação por jigagem. É, ainda, importante destacar que o uso efetivo do modelo no projeto de instalações de jigagem demanda que relações funcionais sejam estabelecidas entre as variáveis operacionais do processo e a constante de estratificação. Isso será somente possível após ampla experimentação e aplicação do modelo.

Por fim, a aplicação do modelo demanda informações sobre a distribuição densimétrica do minério da alimentação, nem sempre disponíveis, sobretudo para massas específicas mais elevadas. Felizmente, avanços recentes na aplicação da tomografia computadorizada de raios-X⁽¹⁾ agora permitem a obtenção dessas informações de maneira mais eficaz.

4 CONCLUSÃO

O modelo de dispersão, desenvolvido por Tavares e King, foi apresentado e sua aplicação na jigagem em batelada de minérios de ferro, de massa específica e faixas tamanhos variados, foi discutida. O modelo foi capaz de descrever a operação de jigagem de forma satisfatória, demandando apenas um parâmetro que pode ser ajustado a partir de dados de estratificação em jigsawes.

O modelo pode ser usado para prever diretamente a variação da qualidade do produto com a recuperação mássica, podendo, portanto, ser incorporado em simuladores de processo de beneficiamento mineral.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à AMIRA, através do projeto P9P, pelo financiamento à pesquisa, bem como ao CNPq pelas bolsas concedidas aos autores.

REFERÊNCIAS

- 1 SAMPAIO, C.H.; TAVARES, L.M., Beneficiamento Gravimétrico: Uma Introdução aos Processos de Concentração Mineral e Reciclagem por Densidade, Editora da UFRGS, Porto Alegre, 1ª edição, 603 p., 2005.
- 2 MAYER, F.W., Fundamentals of a potential theory of the jigging process. Anais, 7th International Mineral Processing Congress, New York, v. 1, p. 75-86, 1964.
- 3 GAUDIN, A.M., Principles of Mineral Dressing, McGraw Hill, New York, 1939.
- 4 TAVARES, L.M.; KING, R.P., A Useful Model for the Calculation of the Performance of Batch and Continuous Jigs. *Coal Preparation*, v. 15, p. 99-128, 1995.
- 5 TAVARES, L.M., Modelo fenomenológico da jigagem. Anais, XVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Águas de São Pedro, v. 1, pp. 553-572, 1998.
- 6 RAO, B.V. Extension of particle stratification model to incorporate particle size effects, *International Journal of Mineral Processing*, v. 85, p. 50-58, 2007.
- 7 NEESSE, T., Der Aufbereitungstechnische Setzvorgang als Statistischer Prozess, *Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar*, pp. 575-586, 1966.
- 8 MILLER, D.J. Design and operation experience with the Goldsworthy Mining Limited Batac jig and spiral separator iron ore beneficiation plant, *Minerals Engineering*, v. 4, p. 411-435, 1991.
- 9 RAO, G.V.; KUMAR, R.S.; SRIDHAR, G.E.; SHARMA, S.K. Determination of Stratification Index of Typical Indian Iron Ores by APIC Jig. Anais, XXVI International Mineral Processing Congress, New Delhi, 2012.
- 10 LYMAN, G.J.; JONKERS, A.; VAN LATUM, L.A., HUGHES, D.M., Computerized automatic optimizing control of coal washing jigs, Relatório Final, NERDDP Project 1028, 1990.
- 11 TAVARES, L.M., Monte Carlo simulations on the potential energy theory of jigging, *Coal Preparation*, v. 20, p. 71-83, 1999.