

DL 04.ABR2001*193030

UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil

DISPERSÃO DE CONTAMINANTES EM MEIOS FRACTURADOS

Ensaio experimentais com traçadores

FERNANDO FERREIRA DA CRUZ

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – Hidráulica e Recursos Hídricos



Coimbra, 2000

Resumo

A modelação do escoamento e transporte de contaminantes em meios fracturados normalmente é feita com recurso a modelos que idealizam as fracturas como placas paralelas. A selecção do modelo depende da escala do problema. No entanto, grande parte dos modelos baseiam-se no cálculo de uma “velocidade média de transporte”. Este procedimento, em algumas situações pode levar a resultados erróneos.

Procuramos analisar a validade dos modelos de transporte tipicamente usados em meios fracturados. Para isso executaram-se trabalhos de campo e de laboratório. Os ensaios de campo foram realizados em dois locais: Sevilha (próximo de Tábua) e Casal Comba (próximo da Mealhada). No entanto não se obtiveram resultados significativos em nenhum dos casos aparentemente por falta de ligação hidráulica.

Os ensaios de laboratório consistiram em fazer circular um fluido (água) através de fracturas, mantendo o caudal constante. Posteriormente foram injectadas instantaneamente pequenas quantidades de traçador (cloreto de sódio, uranina e sulforodamina), medindo a evolução da sua concentração nos furos de descarga.

Como conclusões principais poderemos dizer que:

- (i) Para os ensaios em laboratório, a uranina e a sulforodamina são bons traçadores, mas em ensaios rápidos, como são os de laboratório, estes dois traçadores não permitem fazer salientar as heterogeneidades nos escoamentos em fracturas.
- (ii) Uma solução concentrada de cloreto de sódio funcionou como amplificador. O “impulso” de cloreto de sódio injectado “assentava” no fundo dos furos de injeção e sua proximidades e ia misturando-se com o fluido circulante. Isto forneceu-nos um “mapa” de heterogeneidades da fractura observáveis.
- (iii) Num ensaio em que não seja conhecido o volume por onde circula o fluido, é possível estimar “volumes de circulação”.

Futuramente os ensaios de laboratório necessitam ser completados com um mapeamento das fracturas, nas condições em que foram realizados os ensaios, para confirmação de que os ensaios com cloreto de sódio, de facto, realçaram as heterogeneidades pontuais.

Palavras-Chave:

Traçadores, meios fracturados, modelação, tempo de residência, contaminação.

ÍNDICE

Páginas

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Generalidades	1
1.2 - Fontes de contaminação/poluição	2
1.3 – Poluição de aquíferos	5
1.4 – Contaminação dos recursos hídricos subterrâneos em Portugal	6
1.5 - Objectivos	7

CAPÍTULO 2 – ESCOAMENTO EM MEIOS FRACTURADOS

2.1 - Classificação dos meios fracturados	8
2.2 - Volume elementar representativo e ligação hidráulica	9
2.3 - Escala do problema e modelos conceptuais	10
2.4 - escoamento em regime permanente	12
2.4.1 – Meio fracturado não contínuo	12
2.4.2 – Meio fracturado contínuo simples	17
2.4.3 – escoamento num meio fracturado contínuo duplo	19

CAPÍTULO 3 – TRANSPORTE DE SOLUTOS

3.1 – Generalidades	21
3.2 – Transporte à escala microscópica	22
3.3 – Transporte à escala macroscópica	23
3.3.1 – Meios porosos	23
3.3.2 – Meios fracturados	29
3.4 – Retardamento	34

CAPÍTULO 4 – TESTES COM TRAÇADORES

4.1 – Generalidades	36
4.2 – Tipo de ensaios e traçadores	36
4.3 – Parâmetros a estudar num ensaio com traçadores	37
4.4 – Teoria do tempo de residência	40
4.4.1 – Conceitos	40
4.4.2 – Ensaios com traçadores com injeção “instantânea”	43
4.4.3 – Caso geral	44

CAPÍTULO 5 – MODELAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO EM AQUÍFEROS

5.1 – Introdução	47
5.2 – Aplicações de modelos	48
5.3 – Tipos de modelos matemáticos: Determinísticos <i>versus</i> Probabilísticos	49
5.4 – Modelação do escoamento e transporte de massa	50
5.5 – Soluções analíticas para meios porosos	54
5.6 – Modelo de transporte em aquíferos fracturados – “SFDM”	55
5.6.1 – Introdução	55
5.6.2 – Adaptação do modelo às condições normais de escoamento	59

CAPÍTULO 6 – ENSAIOS EXPERIMENTAIS	
6.1 – Introdução	61
6.2 – Ensaio em laboratório	61
6.3 – Ensaio no campo	65
6.4 – Resultados obtidos em laboratório	67
6.4.1 – Ensaio com NaCl	68
6.4.2 – Ensaio com Uranina	69
6.4.3 – Ensaio com Sulforodamina	70
CAPÍTULO 7 – INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	
7.1 – Processamento de dados	71
7.2 – Parâmetros calculados	75
7.3 – Discussão e Análise dos Resultados	79
CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES	
8.1 – Conclusões	85
8.2 – Trabalhos futuros	86
BIBLIOGRAFIA	87
ANEXO 1 – GEOLOGIA DA ZONA DOS ENSAIOS DE CAMPO	93
ANEXO 2 – FLUORÍMETRO E TRAÇADORES	95
ANEXO 3 – ENSAIO DE CAUDAL	97
ANEXO 4 – RESULTADOS DOS ENSAIOS EM LABORATÓRIO	99
ANEXO 5 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CAMPO	118

BIBLIOGRAFIA

- Abelin, H., Biergeron, L., Gidlund, J., Moreno, L., Neretnieks, I., Tunbrant, S. (1987) -- "Results from Some Tracer Experiments in Crystalline Rocks in Sweden", In Coupled Processes Associated with Nuclear Waste Repositories, Tsang, C.F., Academic Press, 363 – 379.
- Anderson, M.P. (1979) – "Using Models to Simulate the Movement of Contaminants Through Groundwater Flow Systems", Critical Reviews in Environmental Control, Vol 9, N° 2, 97 – 156.
- Barenblatt, G.I., Zheltov Iu. P., Kochina, I.N. (1960) - "Basic Concepts in the Theory of Seepage of Homogeneous Liquids in Fissured Rocks (Strata)", J. Appl. Math. Mech. (Engl. Transl.), 24, 1286-1303.
- Bear, J. (1972) – "Dynamics of Fluids in Porous Media", American Elsevier, New York.
- Bear, J. (1979) – "Hydraulics of Groundwater", McGraw- Hill, New York.
- Bear, J., Verruijt, A. (1987) - "Modeling Groundwater Flow and Pollution", D. Reidel Publishing Company, 414 p.
- Beruch, J.C., Street, R.A. (1967) – "Two-Dimensional Dispersion", Journal, Sanitary Engineering Division, American Society of Civil Engineers 93, 17 – 39.
- Boulton, N.S., Streltsova, T.D. (1977) - "Unsteady Flow to a Pumped Well in a Fissured Water Bearing Formation", J. Hydrology, 35, 257-270.
- Bralitz, J.F.(1968) – " Ocean Engineering: Goals, Environment and Technology", John Wiley and Sons Inc., New York.
- Buffham, B.A. (1983) – " Internal and External Residence – Time Distributions", Chem. Eng. Comm., 22, pp. 105 – 107.
- Bullivant, D.P. (1988) – "Tracer Testing of Geothermal Reservoirs", PhD Thesis, School of Engineering, University of Auckland, New Zealand.
- Carapeto, C. (1999) – "Poluição das Águas", Universidade Aberta, Lisboa, 241 p.
- Church, M. (1974) - " Electrochemical and Fluorometric Tracer Techniques for Stream Flow Measurements", British Geom. Research Group, Technical Bulletin N° 12.
- Cleary, R. (1999) – "Modelos de Fluxo e Transporte de Massa Usando o Visual MODFLOW", Seminário Organizado pelo Departamento de Geociências, Univ. de Aveiro, 16 a 19 de Novembro de 1999, Aveiro.

- Comissão Europeia (1997) – Jornal Oficial das Comunidades Europeias nº C 184/20, 17/6/97
- Comissão Europeia (2000) – Directiva 2000/C.E., nº4, artigo 251º do Tratado C.E., 18/7/2000.
- Custodio, E., Llamas, M.R. (1976) - “Hidrología Subterránea”, Ediciones Omega, 2359 p.
- Danckwerts, P.V. (1953)- “ Continuous Flow Systems – Distribution of Residence Times”, Chem. Eng. Science, Vol 2, Number 1, 1-13.
- de Marsily, G. (1986) – “Quantitive Hydrogeology: Groundwater Hydrology for Engineers”, Academic Press, Inc.
- de Marsily, G. (1989) - “Flow and Transport in Fractured Rocks: Connectivity and Scale Effect”, Advanced Workshop on Heat and Mass Transport in Fractured Rocks, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Domenico, P.A.,Schwartz, F.W. (1990) – Physical and Chemical Hydrogeology”, John Wiley & Sons, Inc., 357 381.
- Fetter, C. W. (1988) – “Applied Hydrogeology”, Second Edition, Merryl Publishing Company.
- Fetter, C. W. (1993) – “ Contaminant Hydrogeology”, Macmillan, 458 p.
- Fitter, A.H., Sutton, C.D. (1975) – “The use of the Freudlich Isotherm for Soil Phosphate Sorption Data”, Journal of Soil Science 26, 241 – 246.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A. (1979) - “Groundwater”, Prentice-Hall, 604 p.
- Gardner, G. D., Gray, R.E. (1976) – “Tracing Subsurface Flow in Karst Regions Using Artificially Colored Spores”, Bulletin of the Association of Engineering Geologists, Vol XIII, Nº 3, 177-196.
- Gospodaric, R., Habic, P. (1976) – “Underground Water Tracing: Investigations in Slovenia 1972 – 1975”, Institut for Karst Reserch, Sazu.
- Grisak, G.E., Pichens, J.F. (1980) – “Solute Transport Through Fractured Media: The Effect of Mateix Diffusion”, Water Resources Research, 16, 719 – 730.
- Heath, M.J., Durrance, E.M. (1985) – “Radionuclide Migration in Fractured Rock: Hydrogeological Investigations at an Experimental Site in the Carnmenellis Granite, Cornwall”, U K Atomic Energy Authority Harwell, AERE – R11402
- Hoopes, J.A., Harleman, D.R.F. (1967) – “Dispersion in Radial Flow from a Recharge Well”, J. Geophys. Res, 72-14, 3595 – 3607.

- Kass, W. (1998) – “Tracing Technique in Geohydrology”, A.A. Balkema, Rotterdam, 341 – 384.
- Kinzelbach, W. (1986). “Groundwater Modelling – An Introduction with Sample Programs in BASIC”, Devel. in Water Sci. 25, 333 p., Amsterdam
- Kinzelbach, W. (1996). “Methods for the Simulation of Pollutant Transport in Ground Water – A Model Comparison”, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 20 p.
- Kinzelbach, W., Rausch, R. (1995) – “ASM – Aquifer Simulation Model Manual”, Heidelberg, 56 p.
- Kraemer, S.R., Haitjema, H.M. (1989) - “Regional Modelling of Fractured Rock Aquifers”, Groundwater Contamination: Use of Models in Decision-Making, 467-476.
- Kreft, A., Zuber, A. (1978) – “On the Physical Meaning of the Dispersion Equation and its Solution for Different Initial and Boundary Conditions”, Chem. Eng. Sci. 33, 1471 – 1480.
- Lallemand-Barrés, A., Peaudecerf, P. (1978) – “Recherches des Relations Entre la Valeur de la Dispersivité Macroscopique d'un Milieu Aquifère, ses Autres Caractéristiques et les Conditions de Mesure”, BRGM (2) III, Urbana.
- Levenspiel, O. (1972) “Engenharia das Reações Químicas – Cálculo de Reactores”, Edt Edgard Blucher, 207-259.
- Long, J.C.S.; Remer, J.S.; Wilson, C.R. & Witherspoon, P.A. (1982) -“Porous Media Equivalents for Networks of Discontinuous Fractures”, Water Resour. Res., 18(3), 645-658.
- Maloszewski, P., Zuber, A. (1985) – “On the Theory of Tracer Experiments in Fissured Rocks with a Porous Matrix”, Journal of Hydrogeology, 79, 333 – 358.
- Maloszewski, P., Zuber, A. (1990) – “Mathematical Modeling of Tracer Behavior in Short-Term Experiments in Fissured Rocks”, Water Resources Research, 26 (7), 1517 – 1528.
- Maloszewski, P., Zuber, A. (1992) – “On the Calibration of Mathematical Models for the Interpretation of Tracer Experiments in Groundwater”, Advances in Water Resources, 15, 47 – 62.
- Nauman, E.B. (1981) – “Residence Time Distributions and Micromixing”, Chem. Eng. Commun., Vol 8, 53 – 131.

- Nauman, E.B., Buffham, B.A. (1983) – “Mixing in Continuous Flow Systems”, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Neretnieks, I. (1985) – “Transport in Fractured Rocks”, In International Association of Hydrologists, Vol. XVII, Pt 1, Tucson, Arizona, 301 – 318.
- Neuman, S.P. (1990) – “Universal Scalling of Hydraulic Conductivities and Dispersivities in Geologic Media”, Water Resources Research 26, Nº 6, 679 – 684.
- Norton, D., Knapp, R. (1977) – “Transport Phenomena in Hydrothermal Systems: The Nature of Porosity”, American Journal of Science, Vol 277, 913 – 936.
- Novo, M.E.S. (1994) – “Caracterização da Poluição no Aquífero Aluvial do Rio Sandro”, Publicações do LNEC, Lisboa, pp 1-10.
- Oliveira, M.M. (1993) - “Modelação de Escoamento e Determinação de Parâmetros Hidráulicos em Meios Fracturados”, Dissertação apresentada à Universidade de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Geologia Económica e Aplicada.
- Pinto, A.D. (1987) – “Ensaio de Bombagem em Rochas Fracturadas”, Estudos, Notas e Trabalhos, D.G.G.M., 29, 85-160.
- Robinson, B.A., Tester, J.W. (1984) – “Dispersed Fluid Flow in Fractured Reservoirs. An Analysis of Tracer - Determined Residence Time Distributions”, Journal of Geophysical Research, Vol 89, Nº B12, 469 – 483.
- Rodrigues, N. E. V. (1994) – “The Interpretation of Tracer Curves in Hot Dry Rock Geothermal Reservoirs”, Tese de Doutoramento, Univ. of Exeter, Inglaterra, 39-106.
- Scheidegger, A.E. (1963) – “The Physics of Flow through Porous Media”. Univ. of Toronto Press, Toronto.
- Shinnar, R. (1987) – “Use of Residence and Contact-Time Distributions in Reactor Design”, Chem. Ind. Vol 26, 63 – 149.
- Sauty, J.P. (1980) – “An Analysis of Hydrodispersive Transfer in Aquifers”, Water Resources Research, 16, 145 – 158.
- Snow, D.T. (1969) - “Anisotropic Permeability of Fractured Media”, Water Resources Research, 5(6), 1273-1289.
- Snow, D.T. (1970) - “The Frequency and Apertures of Fractures in Rock”, Int. J. Rock Mech. Mn. Sci., 7, 23-40.

- Sousa, I.J., Cavaco, M.A., Alegria, A. (2000) – “A Água Destinada ao Consumo Humano – Caracterização Quantitativa e Qualitativa Face às Origens” – Comunicação apresentada no 5º Congresso da Água, Lisboa, p. 15.
- Streltsova, T.D. (1976) - “Hydrodynamics of Groundwater Flow in a Fractured Formation”, *Water Resources Research*, 12(3), 405-414.
- Sudicky, P.W., Frind, E.O. (1982) – “Contaminant Transport in Fractured Porous Media. Analytical Solutions for a System of Parallel Fractures”, *Water Resources Res.*, 18, 1634 – 1642.
- Tester, J.W., Bivins, R.L., Potter, R.M. (1982) – “Interwell Tracer Analyses of a Hydraulically Fractured Granitic Geothermal Reservoir”, *Society of Petroleum Engineers Journal*, 54th Annual Fall Technical Conference and Exhibition of the SPE, 537 – 554.
- Tsang, Y.W., Tsang, C.F., Neretnieks, I., Moreno, L. (1988) - “Flow and Tracer Transport in Fractured Media: A Variable Aperture Channel Model and Its Properties”, *Water Resources Research*, 24(12), 2049-2060.
- Tsang, Y.W., Tsang, C.F. (1990) – “ Hydrological Characterisation of Variable-Aperture Fractures in Rock Joints”, *Barton and Stephansson Edition, Balkema*, 423 – 431.
- Zektser, I.S., Everett, L.G., Cullen, S.J. (1992). –“Groundwater Pollution: An International Perspective”, *European Water Pollution Control*, Vol 2, nº 6, 15-19.
- Zvirin, Y., Shinnar, R. (1976) – “ Interpretation of Internal Tracer Experiments and Local Sojourn Time Distributions”, *Journal of Multiphase Flow*, Vol 2, 495 – 520.