

DL 04.ABR2001*193038

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MODELAÇÃO NUMÉRICA DE FENÓMENOS
DE TRANSFERÊNCIA NUM MEIO POROSO HÚMIDO
SUBMETIDO A UMA SOLICITAÇÃO TÉRMICA EXTERNA

João Manuel Nogueira Malça de Matos Ferreira

Dissertação para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

COIMBRA

2000



ÍNDICE

AGRADECIMENTO.....	iv
ÍNDICE	vi
NOMENCLATURA.....	viii
1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - DESCRIÇÃO DO PROBLEMA EM ESTUDO.....	5
2 - MODELO MATEMÁTICO.....	7
2.1 - EQUAÇÕES DE TRANSPORTE NO ESCOAMENTO.....	7
2.1.1 - Equações básicas de transporte.....	7
2.1.2 - Equações de transporte para o escoamento turbulento	15
2.1.3 - Decomposição de Reynolds	16
2.1.4 - Modelação da turbulência.....	18
2.1.5 - Escoamento turbulento na vizinhança de paredes	25
2.1.6 - Resumo da metodologia adoptada	28
2.2 - EQUAÇÕES DE TRANSPORTE NO MEIO POROSO HÚMIDO	30
2.2.1 - Equação de transporte de calor.....	31
2.2.2 - Equação de transporte de líquido.....	33
2.2.3 - Equação de transporte de vapor.....	38
2.2.4 - Resumo da metodologia adoptada	41
2.3 - TRANSFERÊNCIA SIMULTÂNEA DE CALOR E DE MASSA NO MEIO POROSO	42
2.3.1 - Calor	42
2.3.2 - Vapor	43
2.3.3 - Líquido	45

3 - MÉTODO DE SOLUÇÃO NUMÉRICA	47
3.1 - INTRODUÇÃO	47
3.2 - DISCRETIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES. SUBRELAXAÇÃO	48
3.3 - ALGORITMO DE RESOLUÇÃO GLOBAL	53
3.4 - RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES ALGÉBRICAS LINEARES.....	58
3.5- CONDIÇÕES DE FRONTEIRA.....	61
3.6- OUTRAS PARTICULARIDADES DA MODELAÇÃO NUMÉRICA.....	65
3.6.1 - Malha numérica	65
3.6.2 - Parâmetros de controlo.....	66
3.6.3 - Critérios de convergência	66
4 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	68
4.1 - CONDIÇÕES DE TESTE	68
4.1.1 - Hipóteses assumidas.....	69
4.2 - CONDIÇÕES DE FLUXO RADIATIVO	70
4.2.1 - Evolução da frente de evaporação	70
4.2.2 - Protecção térmica resultante do humedecimento.....	78
4.2.3 - Eficácia de protecção térmica.....	85
4.3 - ESCOAMENTO A ALTA TEMPERATURA.....	86
4.3.1 - Evolução da frente de evaporação	86
4.3.2 - Protecção térmica resultante do humedecimento.....	89
4.3.3 - Eficácia de protecção térmica.....	94
4.4 - NOTAS CONCLUSIVAS.....	94
5 - CONCLUSÃO	96
5.1 - PRINCIPAIS CONTRIBUTOS DA PRESENTE DISSERTAÇÃO	96
5.2 - SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTO FUTURO	98
BIBLIOGRAFIA	100

1- INTRODUÇÃO

O estudo dos fenómenos de transferência – de espécies químicas, de quantidade de movimento e de energia – no seio de materiais porosos constitui actualmente um importante tema de investigação, em virtude das múltiplas situações em que tais materiais se encontram presentes.

Podem apontar-se exemplos nas mais diversas áreas da ciência, desde a agronomia à medicina, passando pelas engenharias civil, mecânica, química ou de minas, entre outras. Assim, enquadram-se nesta temática o estudo do escoamento de óleo, de água e de gás numa jazida de petróleo, o transporte de água e de contaminantes na vizinhança de lençóis freáticos e a migração de partículas provenientes de depósitos de lixo radioactivo existentes no subsolo [Bear (1991)]. Também os processos industriais de secagem (*e.g.*, indústria cerâmica e agro-alimentar), os fogos florestais e a circulação de fluidos no corpo humano (*e.g.*, pulmões e rins) podem ser vistos como exemplos de interesse eminentemente prático dos fenómenos de transporte em meios porosos.

Entre os mais importantes, merecem referência os fogos florestais, particularmente devido ao forte impacto térmico que a passagem de uma frente de chama produz no solo. Os efeitos de tais fogos podem ser muito diversificados, face à enorme variedade de condições que é possível encontrar na Natureza, resultando, normalmente, na modificação de diversas propriedades do solo, tais como: propriedades físicas (*e.g.*, permeabilidade à água), composição química (*e.g.*, teores de azoto, enxofre, etc.), resistência à erosão, etc., sem deixar de ter em consideração que, também, a fauna e a flora podem vir a ser significativamente afectadas pela exposição mais ou menos prolongada às elevadas temperaturas induzidas pelo fogo.

O reconhecimento de todas estas consequências levou a que se efectuassem, desde os anos trinta, registos das temperaturas atingidas no solo durante e após os fogos florestais, embora muito menores tenham sido os esforços para tentar interpretar, ou mesmo prever, tais temperaturas.

Dado que esta última era, indubitavelmente, a metodologia mais cómoda e mais económica, vários foram os investigadores que começaram a desenvolver modelos que permitissem a simulação dos vários factores que contribuíam para o aquecimento registado pelo solo durante a forte solicitação térmica a que é sujeito naquelas condições. Daí que tenham surgido diversos modelos computacionais que incluem os fenómenos de transferência de calor e de humidade no seio de meios porosos. Refira-se, pelo seu interesse, o modelo desenvolvido por Aston e Gill (1976), que quantifica o transporte simultâneo de energia e de humidade (vapor de água e água líquida) no seio de um meio poroso uniforme (areia), quando sujeito a uma forte solicitação térmica. Também Campbell *et al.* (1995) recorreram a este modelo, embora lhe tivessem introduzido diversos melhoramentos – nova formulação para a condutibilidade térmica e técnica melhorada de resolução das equações diferenciais do problema. No entanto, e apesar de incluir, como se disse, a transferência de humidade no solo, inclusivamente para temperaturas superiores a 100°C, este modelo apresenta a limitação de se resumir a uma abordagem unidimensional do problema. Já Oliveira *et al.* (1994) consideraram uma frente de chama a deslocar-se, sobre o solo, a uma velocidade determinada. A análise a duas dimensões, por eles realizada, veio permitir, então, uma descrição mais rigorosa da condição-fronteira térmica do problema, incluindo os fenómenos convectivos e os efeitos radiativos associados à passagem do fogo. Como resultado, obtém-se uma representação mais exacta do campo de temperatura no solo. Porém, o modelo proposto por estes autores não contabilizava a eventual existência de água nas suas fases líquida e gasosa, que introduz modificações nas propriedades do meio poroso, nomeadamente na condutibilidade térmica e na capacidade calorífica dos elementos que o constituem. Deste modo, os resultados obtidos, em particular pela resolução da equação de transferência de energia, e as conclusões daí extraídas, apresentavam, naturalmente, um determinado desvio em relação à condição de solo humedecido.

Outro exemplo de reconhecida importância, em que os meios porosos desempenham um papel capital, encontra-se nos sistemas de isolamento e protecção térmicos. Entre estes, interessa aqui destacar os sistemas activos de isolamento utilizados na protecção de estruturas sujeitas a fluxos radiativos intensos [Maruyama *et al.* (1990), (1991)], como sejam a tubeira de um foguete, a superfície exterior de um veículo espacial ao reentrar na atmosfera terrestre, etc.. Tais sistemas recorrem, na sua maioria, a uma camada de um meio poroso de estrutura muito fina, que recobre a área a

proteger e no qual é injectado gás a baixa temperatura a partir da face interior. A eficácia na protecção térmica reside na dissociação sofrida pelo gás, quando sujeito a radiação intensa. Trata-se de uma reacção fortemente endotérmica, conseguindo, deste modo, provocar um arrefecimento eficaz do meio poroso. Como resultado, a profundidade de penetração térmica reduz-se a poucos milímetros, mesmo perante fluxos radiativos e convectivos muito intensos, garantindo, assim, a protecção efectiva das superfícies e a integridade do corpo protegido.

Ainda na mesma área, Stubos e Buchlin (1999) realizaram estudos com vista à optimização do arrefecimento de “chips” electrónicos. Dado que a temperatura destes componentes se encontra limitada superiormente, devem procurar-se mecanismos que intensifiquem a remoção das elevadas potências específicas produzidas durante o seu funcionamento. Assim, aqueles autores estudaram, por via analítica, os efeitos produzidos pela aplicação de um revestimento de material poroso continuamente humedecido. Embora a abordagem efectuada fosse apenas unidimensional — o que constitui uma limitação do modelo, pois ignora condições-fronteira relevantes em superfícies pequenas —, ficaram demonstradas as elevadas taxas de remoção de calor associadas à mudança de fase do líquido contido na matriz porosa, em especial quando, nesta matriz, se providenciaram canais para facilitar a saída do vapor entretanto formado.

Por seu turno, Kubota e Uchida (1999) avaliaram numericamente a eficácia produzida, também por um revestimento de material poroso, na protecção térmica da superfície de um veículo espacial que reentra, a velocidade supersónica, na atmosfera terrestre. As elevadas temperaturas então geradas na superfície e os correspondentes fluxos de calor podem ser drasticamente reduzidos, em virtude do consumo de energia associado à evaporação do líquido, que vai sendo injectado no meio poroso.

Belletre *et al.* (1999) modelaram a transferência de calor e de massa numa placa plana de material poroso submetida, na sua face superior, a um escoamento tangencial de ar quente. Recorrendo à injeção de ar frio e de vapor de água no meio poroso, demonstraram conseguir-se, por este modo, um arrefecimento efectivo, o que os levou a concluir tratar-se de um mecanismo apropriado para efectuar a protecção térmica de uma superfície.

No campo dos processos de secagem podemos apontar os trabalhos de Mhimid *et al.* (1999) e de Santos *et al.* (1992). No primeiro caso, simulou-se numericamente a secagem de um leito poroso cilíndrico e vertical, enquanto a sua fronteira lateral era

aquecida por um fluxo de calor fixo ou por um escoamento de ar a temperatura constante. Determinaram-se as distribuições temporal e espacial da temperatura no leito poroso e a influência do fluxo térmico imposto no tempo de secagem e no teor de humidade registado. Por sua vez, Santos *et al.* (1992) analisaram, também por via numérica, o processo bidimensional de secagem de um sólido poroso (tijolo) submetido a um escoamento de ar no interior de um canal. Os resultados de tal estudo foram traduzidos em termos da taxa de secagem e dos valores médios de temperatura e do teor de água da matriz, procurando evidenciar a influência de diversos parâmetros no processo: a temperatura e a humidade do ar de secagem, e a distribuição dos coeficientes adimensionais de transferência de calor e de massa, respectivamente, número de Nusselt e número de Sherwood.

Finalmente, podem-se destacar os trabalhos de Liu *et al.* (1997) na área do arrefecimento evaporativo. Estes autores desenvolveram um modelo analítico para simular a transferência de calor e de massa num leito poroso (areia). Ao avaliarem numericamente tal fenómeno, concluíram poder aplicá-lo, com sucesso, ao arrefecimento do ar ambiente em edifícios, em virtude do consumo de energia associado à evaporação da humidade contida no leito.

A presente dissertação tem por finalidade reunir informação relativa aos diferentes fenómenos relatados nos trabalhos acabados de descrever. Com efeito, estuda-se, a nível bidimensional, o transporte simultâneo de calor e de massa (vapor de água e água líquida) no seio de uma matriz porosa húmida sujeita a um forte fluxo radiativo e/ou convectivo. Com base nos resultados provenientes da simulação numérica do problema, retiram-se conclusões acerca da eficácia de protecção térmica conseguida por este processo.

O presente trabalho encontra-se organizado em cinco capítulos. Após o 1º capítulo, que introduz e, simultaneamente, fornece uma visão geral do trabalho desenvolvido, descreve-se, no 2º capítulo, o modelo matemático que lhe está subjacente.

No capítulo 3 explicam-se, de uma forma simplificada, os princípios que regeram a modelação numérica do problema, nomeadamente as hipóteses que nela se assumem e o algoritmo de cálculo utilizado.

Os principais resultados obtidos são apresentados e discutidos no capítulo 4, nele se sintetizando as conclusões mais relevantes deste trabalho.

Por fim, no capítulo 5, são relatados os contributos da presente dissertação e propõem-se sugestões consideradas de interesse numa investigação futura.

1.1– Descrição do problema em estudo

O tema da presente dissertação de mestrado encontra-se centrado na modelação numérica da resposta térmica de um provete de material poroso, seco ou húmido, a fluxos de calor intensos de natureza convectiva e/ou radiativa.

Considera-se, no estudo em apreço, que um caudal de ar quente se escoia no interior de um canal de secção transversal rectangular (de dimensões $H_C \times W$) e de comprimento L , em cuja parede inferior se encontra "embutido" um provete paralelepipedico de material poroso (areia), a uma distância L_1 da entrada, de tal modo que a sua superfície superior se encontra alinhada com (*i.e.*, no mesmo plano de) a parede do canal (cf. figuras 1.1 e 1.2).

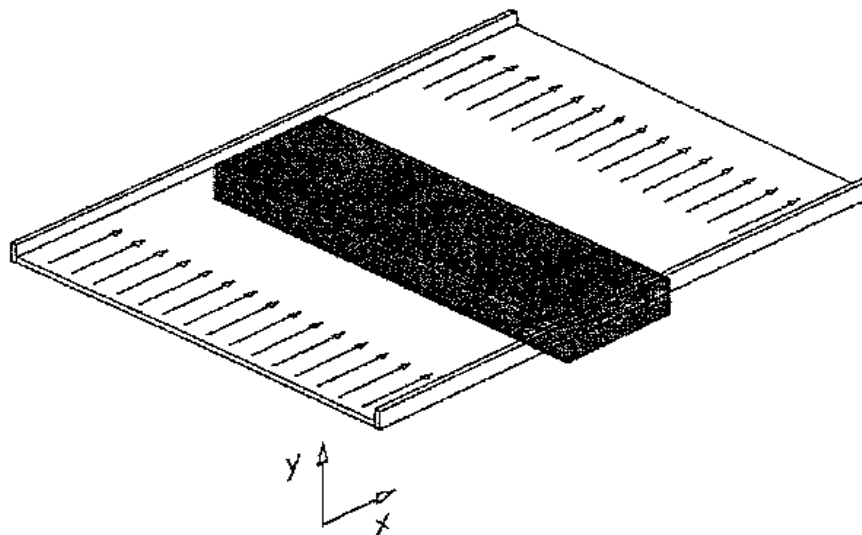


Fig. 1.1 - Esquema da configuração estudada (perspectiva).

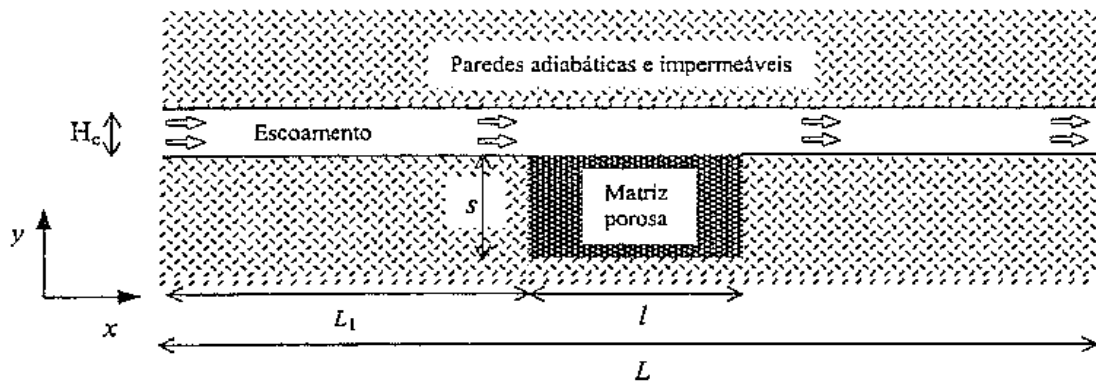


Fig. 1.2 - Esquema da configuração estudada (secção longitudinal).

Assim, os dados do problema são: caudal de ar quente, $\dot{V} = 0.05 \text{ m}^3/\text{s}$; temperatura do ar à entrada do canal, $T_1 = 50^\circ\text{C}$ ou $T_1 = 1000^\circ\text{C}$; comprimento do canal L (1,4 m); provete de areia, de dimensões $s = 3 \text{ cm}$ e $l = 30 \text{ cm}$ e posicionado a $L_1 = 55 \text{ cm}$; paredes do canal e superfícies do provete adiabáticas e impermeáveis, à excepção da sua face superior; condições de escoamento parabólico na saída. Adicionalmente, admite-se que o fenómeno pode ser considerado bidimensional, em virtude das geometria e condições de fronteira impostas.

A geometria de tal configuração e os valores adoptados para os parâmetros que a caracterizam foram escolhidos tendo em atenção o anteprojecto da instalação experimental a desenvolver futuramente, da qual se encontra praticamente concluída a unidade de geração de ar quente.

BIBLIOGRAFIA

- Anderson, J.D., Jr. (1995), Computational Fluid Dynamics – The Basics with Applications, McGraw-Hill Inc.
- Aston, A.R. e Gill, A.M. (1976), “Coupled Soil Moisture, Heat and Water Vapour Transfers under Simulated Fire Conditions”, *Aust. J. Soil Res.*, Vol. 14, pp. 55-66.
- Baehr, H.D. e Stephan, K. (1998), Heat and Mass Transfer, Springer-Verlag.
- Batchelor, G.K. (1967), An Introduction to Fluid Dynamics, Cambridge University Press.
- Bear, J. (1991), “Modelling Transport Phenomena in Porous Media”, em Convective Heat and Mass Transfer in Porous Media, editado por S. Kakaç, B. Kilkis, F. Kulacki e F. Arinç, Kluwer Academic Publishers.
- Belletre, J., Bataille, F. e Lallemand, A. (1999), “Prediction of thermal protection of walls by blowing with different fluids”, *Int. J. Thermal Sciences*, Vol. 38, No.6, pp. 492-500.
- Bennett, C. e Myers, J. (1982), Momentum, Heat and Mass Transfer, 3rd Ed., McGraw-Hill Book Company.
- Bird, R., Stewart, W. e Lightfoot, E. (1960), Transport Phenomena, John Wiley & Sons, Inc.
- Boussinesq, J. (1903), Theorie analytique de la chaleur, Vol. 2, p. 172, Gautier-Villars, Paris.
- Bradshaw, P., Cebeci, T. e Whitelaw, J.H. (1981), Engineering Calculation Methods for Turbulent Flow, Academic Press.

- Brodkey, R. e Hershey, H. (1988), Transport Phenomena – A unified approach, McGraw-Hill International Editions.
- Campbell, G.S., Jungbauer, J.D., Bristow, K.L. e Hungerford, R.D. (1995), “Soil Temperature and Water Content Beneath A Surface Fire”, *Soil Science*, Vol. 159, No. 6.
- Campbell, G.S., Jungbauer, J.D., Jr., Bidlake, W.R. e Hungerford, R.D. (1994), “Predicting the Effect of Temperature on Soil Thermal Conductivity”, *Soil Science*, Vol.158, No.5.
- Carvalho, M.R. (1991), Etude des Ecoulements dans les Milieux Poreux et les Geotextiles par la Methode des Elements Frontieres, Faculdade de Ciências Aplicadas, Universidade de Liège, Bélgica.
- Chakir, A. (1993), Etude des Transferts Couples de Chaleur et de Masse dans des Planches de Chêne Lors du Sechage Convectif et Sous Vide, tese de Doutorado, Universidade de Poitiers, França.
- Costa, J.J. (1985), Aplicação do método das diferenças finitas à condução de calor bidimensional em regime permanente sem geração de calor, Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, Secção Autónoma de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra .
- Costa, J.J. (1990), “Modificações do método SIMPLE para a simulação numérica de escoamentos de fluidos incompressíveis”, Relatório Interno DEM/TC-9001, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Costa, J.J. (1996), Estudo do escoamento originado por dois jactos parietais não-isotérmicos num domínio fechado, tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Costa, V. (1989), A pressão de vapor na óptica da transferência de massa, Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.



- de Vries, D.A. (1963), "Thermal properties of soils", em Physics of plant environment, editado por W. R. van Wijk, North Holland Publ. Co., Amsterdam, The Netherlands, pp. 210-235.
- de Vries, D.A. (1987), "The Theory of Heat and Moisture Transfer in Porous Media Revisited", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, No. 7, pp.1343-1350.
- de Vries, D.A. e Kruger, A.J. (1967), *Proc. C.N.R.S. Symp.* "Phénomènes de transport avec changement de phase dans les milieux poreux ou colloïdaux", No.160, Paris.
- Diogo, F. (1999), Previsão numérica dos efeitos térmicos da passagem de uma frente de chama sobre o solo em condições de incêndio, relatório de Seminário, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Dryden, H.L. e Kuethe, A.M. (1930), *Natl. Advisory Comm. Aeronaut. Tech. Repts.*, No. 342.
- Feio, R.L. (1986), Curso de Programação Fortran, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- Freire, F. (1996), Estudo experimental da cinética de secagem de um produto agro-alimentar, tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Fuller, E.N., Schettler, P.D. e Giddings, J.C. (1966), "A new method for prediction of binary gas-phase diffusion coefficients", *Indust. Eng. Chem.*, Vol. 58, pp. 19-22.
- Gosman, A.D. (1975)^a, "A finite-difference calculation procedure for turbulent flows. I – Solution of equations for mean flow; II – Incorporation of two-equation turbulence models", lições n^{os} 4 e 8 no curso intitulado Turbulent Recirculating Flows, por A.D. Gosman, E.E.K.H. Khalil e B.E. Launder, *Imperial College of Science and Technology*, Londres.
- Gosman, A.D. (1975)^b, "The TEACH-T computer program. I – Structure; II – Application.", lições n^{os} 10 e 12 no curso intitulado Turbulent Recirculating

- Flows, por A.D. Gosman, E.E.K.H. Khalil e B.E. Launder, *Imperial College of Science and Technology*, Londres.
- Gosman, A.D., Launder, B.E. e Reece, G.J. (1985), Computer-Aided Engineering – Heat Transfer and Fluid Flow, Ellis Horwood Limited, Chichester.
- Gray, D.D. e Giorgini, A. (1976), “The Validity of the Boussinesq Approximation for Liquids and Gases”, *Int. J. Heat Mass Transfer.*, Vol. 19, pp. 545-551.
- Hazen, A. (1893), “Some physical properties of sand and gravels with special reference to their use in filtration”, *Massachussets State Board of Health*, 24th annual report, p. 541.
- Incropera, F.P. e de Witt, D.P. (1990), Fundamentals of heat and mass transfer, 3rd Ed., John Wiley & Sons.
- Jones, W.P. e Launder, B.E. (1972), “The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 15, pp. 301-314.
- Jones, W.P. e Launder, B.E. (1973), “The calculation of low-Reynolds number phenomena with a two-equation model of turbulence”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 16, pp. 1119-1130.
- Kaviany, M. (1995), Principles of Heat Transfer in Porous Media, 2nd Ed., Springer-Verlag.
- Kays, W.M. e Crawford, M.E. (1993), Convective Heat and Mass Transfer, 3rd Ed., McGraw-Hill Inc.
- Kozeny, J. (1927), “Ueber Grundwasserbewegung”, *Wasserkraft und Wasserwirtschaft*, Vol. 22, p. 67.
- Krischer, O. e Rohnalter, H. (1940), *VDI ForschHft*, No. 402.
- Kruger, E. (1918), “Die Grundwasserbewegung”, *Internationale Mitteilungen fur Bodenkunde*, Vol. 8, p. 105.

- Kubota, H. e Uchida, S. (1999), "Thermal protection system with use of porous media for a hypersonic reentry vehicle", *J. Porous Media*, Vol. 2, No. 1, pp. 71-85.
- Lage, J.L. (1998), "The fundamental theory of flow through permeable media from Darcy to turbulence", em Transport Phenomena in Porous Media, editado por D. Ingham e I. Pop, Pergamon Press.
- Launder, B.E. e Spalding, D.B. (1974), "The numerical computation of turbulent flows", *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng.*, Vol. 3, pp. 269-289.
- Liu, W., Peng, S.W. e Mizukami, K. (1997), "Moisture evaporation and migration in thin porous packed bed influenced by ambient and operating conditions", *Int. J. Energy Res.*, Vol. 21, pp. 41-53.
- Lowell, S. e Shields, J.E. (1984), Powder surface area and porosity, 2nd Ed., Chapman and Hall, London.
- Malça, J. (1999), "Estudo numérico das trocas de calor entre um escoamento de ar quente e uma placa plana semi-infinita com uma face arrefecida", Relatório Técnico, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Markatos, N.C. (1986), "The mathematical modelling of turbulent flows", *Appl. Math. Modelling*, Vol. 10, pp. 190-220.
- Maruyama, S., Aihara, T. e Viskanta, R. (1991), "Transient behaviour of an active thermal protection system", *Int. J. Heat Mass Transfer.*, Vol. 34, No. 3, pp. 625-632.
- Maruyama, S., Viskanta, R. e Aihara, T. (1990), "Analysis of an active high-temperature thermal insulation system", *Int. J. Heat Fluid Flow.*, Vol. 11, No. 3, pp. 196-203.
- Mhimid, A., Fohr, J.P. e BenNasrallah, S. (1999), "Heat and mass transfer during drying of granular products by combined convection and conduction", *Drying Technology*, Vol.17, No. 6, pp. 1043-1063.

- Nagano, Y. e Hishida, M. (1987), "Improved form of the k - ε model for wall turbulent shear flows", *J. Fluids Engng.*, Vol. 109, pp. 156-160.
- Nakshabandi, G. e Kohnke, H. (1965), "Thermal Conductivity and Diffusivity of Soils as Related to Moisture Tension and Other Physical Properties", *Agricultural Meteorology*, 2, pp. 271-279.
- Nield, D.A. e Bejan, A. (1998), Convection in Porous Media, Springer-Verlag.
- Nogotov, E., Berkovsky, B. e Minkowycz, W. (1978), Applications of Numerical Heat Transfer, Hemisphere Publishing Corporation, Washington.
- Oliveira, L.A. (1989), Cálculo numérico de escoamentos com transferência de calor e massa, *Publicação didáctica*, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Oliveira, L.A. (1991)^a, Mecânica dos Fluidos I, *Publicação didáctica*, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Oliveira, L.A., Costa, J.J., Carvalho, M.G., Gerhardt, H.J. e Kramer, C. (1991)^b, "On aerodynamic sealing for industrial applications", *J. Wind Eng. Ind. Aerodynamics*, Vol. 37, pp. 255-268.
- Oliveira, L.A., Viegas, D.X., Varela, V. e Raimundo, A.M. (1994), "On the soil thermal effect under surface fire conditions", *Proc. 2nd Int. Conf. Forest Fire Research*, Coimbra, Portugal, Vol. II, pp. 833-847.
- Padet, J. (1990), Fluides en écoulement – méthodes et modèles, Ed. Masson, Paris.
- Patankar, S.V. (1980), Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, Washington.
- Patankar, S.V. e Spalding, D.B. (1972), "A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 15, p. 1787.

- Patel, V.C., Rodi, W. e Scheuerer, G. (1985), "Turbulence Models for Near-Wall and Low Reynolds Number Flows: A Review", *AIAA Journal*, Vol. 23, No. 9, pp. 1308-1319.
- Penman, H.L. (1940), "Gas and vapor movements in the soil - I, *J.Agr.Sci.*, No. 30, pp. 570-581.
- Philip, J.R. e de Vries, D.A. (1957), "Moisture movement in porous materials under temperature gradients", *Amer. Geophys. Union*, No. 38, pp. 222-232.
- Radu, J.P., Carlier, R. e Cescotto, S. (1987), "Simulation Numerique des Ecoulements Transitoires à Surface Libre en Milieux Poreux", *Proc. 1^{er} Congrès National Belge de Mécanique Théorique et Appliquée*, Bruxelles, Bélgica.
- Reynolds, O. (1883), "An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channels", *Phil. Trans. R. Soc.*, Vol. 174, pp. 935-982.
- Richards, J.M. (1971), "Simple expression for the saturation vapor pressure of water in the range -50 to 140°C", *Br. J. Appl. Phys.*, Vol. 4, pp. L15-L18.
- Roache, P.J. (1998), Fundamentals of Computational Fluid Dynamics, Hermosa Publishers.
- Rose, C.W. (1968), "Water transport in soil with a daily temperature wave - I. Theory and experiment", *Aust. J. Soil Res.*, No. 6, pp. 31-44.
- Santos, A.S., Fernandes, E.O. e Samagaio, A.J. (1992), "Secagem por Convecção Forçada de um Sólido Poroso Bidimensional", *III Encontro de Mecânica Computacional*, Coimbra.
- Scheidegger, A.E. (1974), The Physics of Flow Through Porous Media, 3rd Ed., University of Toronto Press.
- Schlichting, H. (1968), Boundary-Layer Theory, 6th Ed., McGraw-Hill Inc.
- Schlichting, H. (1987), Boundary-Layer Theory, 7th Ed., McGraw-Hill Inc.

- Smith, I.M. (1995), Programming in Fortran 90 – A First Course for Engineers and Scientists, John Wiley & Sons.
- Stubos, A.K. e Buchlin, J.M. (1999), “Enhanced cooling via boiling in porous layers: The effect of vapor channels”, *J. Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 205-210.
- Tennekes, H. e Lumley, J.L. (1972), A first course in turbulence, The MIT Press, Massachusetts.
- Van Brakel, J. e Heertjes, P.M. (1974), “Analysis of diffusion in macroporous media in terms of a porosity, a tortuosity and a constrictivity factor”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.17, pp. 1093-1103.
- Van Doormaal e Raithby, G.D. (1984), “Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flow”, *Numer. Heat Transfer*, Vol. 7, pp. 147-163.
- Versteeg, H.K. e Malalasekera, W. (1995), An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method, Longman.
- Waananen, K.M., Litchfield, J.B. e Okos, M.R. (1993), “Classification of Drying Models for Porous Solids”, *Drying Technology*, 11(1), pp. 1-40.
- Westcot, D.W. e Wierenga, P.J. (1974), “Transfer of Heat by Conduction and Vapor Movement in a Closed Soil System”, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Vol.38.
- White, F.M. (1994), Fluid Mechanics, 3rd Ed., McGraw-Hill Inc.
- Wierenga, P.J. e De Wit, C.T. (1970), “Simulation of Heat Transfer in Soils”, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Vol. 34.
- Zunker, F. (1920), “Das allgemeine Grundwasserfliessgesetz”, *Journal fur Gasbeleuchtung und Wasserversorgung*.

