

Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

MODELAGEM MATEMÁTICA PARA AVALIAÇÃO DA FLUIDODINÂMICA E EFICIÊNCIA DE PROCESSOS ENVOLVENDO DESLOCAMENTOS DE LÍQUIDOS IMISCÍVEIS

André L. Nogueira¹, Toni J. Lopes¹, Renan M. Baptista²
Ricardo A. F. Machado¹, Marinho B. Quadri¹

¹ UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, Depto. de Engenharia Química,
Campus Universitário, Trindade, C. P. 476, CEP: 88040-000, Florianópolis - SC, Brasil,
andren@enq.ufsc.br

² CENPES – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Petrobras, Coordenação de
Pesquisa em Detecção de Vazamentos e Simulação em Dutos, Ilha do Fundão, Quadra 7,
Av. 1, Cidade Universitária, CEP: 21949-900, Rio de Janeiro - RJ, Brasil,
renan.baptista@petrobras.com.br

Resumo – Diversas operações e procedimentos na indústria do petróleo estão relacionados ao deslocamento imiscível de um fluido por outro, podendo-se citar: a elevação natural e artificial do óleo a partir dos poços; o bombeamento, através de dutos, de óleos de viscosidade elevada mediante a injeção conjunta de água, além da recuperação secundária de petróleo. A eficiência deste último tipo de processo é uma consequência direta dos fenômenos interfaciais característicos de sistemas água-óleo. Também o fenômeno de inversão de fases, como acontece no caso de vazamento de óleo a partir de dutos submersos, pode ser considerado dentro desta temática. Neste contexto, é importante uma análise experimental da estabilidade da interface água-óleo bem como dos fatores que levam ao aparecimento do fenômeno de digitação, representado pelo escoamento viscoso de uma das fases que avança para o interior da outra na forma de um ou mais *fingers*. O modelo matemático utilizado para descrever o deslocamento imiscível de um fluido por outro é desenvolvido inicialmente para células de *Hele-Shaw*. Observações experimentais com uma célula de *Hele-Shaw* possibilitam avaliar o modelo proposto e sua aptidão para descrever adequadamente o fenômeno da digitação viscosa devidamente relacionado às propriedades físicas (densidade, viscosidade e tensão interfacial) e geométricas do sistema.

Palavras-Chave: deslocamento imiscível; água-óleo; *Hele-Shaw*; inversão de fases; bombeamento

Abstract – Several operations and procedures in the oil industry are related to immiscible displacement of a fluid by another one. Some examples can be listed: the natural and artificial oil elevation from wells, the pumping of high viscosity oils through pipelines using water injection and secondary oil recovery. The performance of the last one is a direct consequence of the interfacial phenomena inherent to oil/water systems. As occur in oil leakages from submarine pipelines, the phase inversion phenomenon can also be considered in this context. Therefore, it is of major importance to realize experimental analysis of the oil/water interface stability and the facts that leads to the fingering phenomenon appearance. This phenomenon is represented into the other one like one or more fingers. The mathematical model used to describe the immiscible displacement of another one is initially developed to Hele-Shaw cells. Experimental observations with a Hele-Shaw cell enable the evaluation of the proposed model and its capability to adequately describe the viscous fingering phenomenon related to physical (density, viscosity and interfacial tension) and geometric properties of the system.

Keywords: immiscible displacement, water-oil, *Hele-Shaw*, phases inversion, pumping

1. Introdução

A grande maioria dos trabalhos que estudam os fenômenos interfaciais e seus efeitos no deslocamento de um fluido por outro imiscível, baseia-se em sistemas reais encontrados na área de recuperação secundária e terciária de jazidas petrolíferas, onde água é injetada para expulsar o óleo remanescente nos poros das rochas. A eficiência deste tipo de processo, que chega a 15-30% do óleo originalmente presente na rocha (Thomas, 2001), é uma consequência direta dos fenômenos interfaciais característicos de sistemas água-óleo.

Os estudos realizados contemplam análises da estabilidade de interfaces em sistemas água-óleo, objetivando a predição do início da instabilidade durante o deslocamento destes fluidos (início da digitação), abordado por vários autores (Saffman e Taylor, 1958; Chuoke et al, 1959; Peters et al, 1979), além do padrão de deslocamento estabelecido (forma geométrica da interface) e da quantificação das perturbações (quantos *fingers* e quais seus tamanhos).

A determinação de propriedades tais como densidade, viscosidade e tensão interfacial é de fundamental importância para a caracterização do sistema. Além disso, a influência da temperatura e concentração de sais no meio aquoso devem também ser consideradas.

Os modelos matemáticos apresentados na literatura para descrever o deslocamento imiscível de um fluido por outro em meios porosos e em células de *Hele-Shaw* são idênticos do ponto de vista matemático, contudo o domínio físico num caso e outro são diferentes. Dir-se-ia que uma célula de *Hele-Shaw* é 'limpa', enquanto que uma rocha é intrinsecamente 'ruidosa', o que causa distorções nos padrões de escoamento destes deslocamentos imiscíveis. Apesar disso, estudos em células de *Hele-Shaw* para análise de deslocamentos imiscíveis em meios porosos (Bentsen, 1985 e 1988) são muito freqüentes e aceitáveis, pois conseguem produzir bons resultados.

Modelos tridimensionais para o deslocamento de fluidos imiscíveis impõem grandes dificuldades matemáticas, uma vez que a distribuição de potenciais de força de cada um dos lados da interface deve ser determinada simultaneamente e ao longo do tempo, com o desenrolar do processo. A utilização de soluções *a priori*, baseadas na equação da onda plana simétrica, com a incorporação de conceitos de potencial de força e da teoria de estabilidade de interfaces, ao mesmo tempo em que permite uma abordagem realística do fenômeno, representa uma imensa economia de arsenal matemático. Por isso, tem-se investido fortemente nos modelos de digitação viscosa para células de *Hele-Shaw* que contemplam este tipo de modelagem.

Objetiva-se, assim, uma análise experimental de estabilidade da interface água-óleo bem como dos fatores que levam ao aparecimento do fenômeno de digitação, representado pelo escoamento viscoso de uma das fases que avança para o interior da outra na forma de um ou mais dedos. Acredita-se que o modelo matemático a ser desenvolvido deverá permitir a predição do início da instabilidade durante o deslocamento destes fluidos (início da digitação), além do padrão de deslocamento estabelecido (forma geométrica da interface) e da quantificação das perturbações (quantos dedos e quais seus tamanhos).

2. Procedimento Experimental

O aparato experimental consiste em uma célula de *Hele-Shaw* com 100 cm de comprimento e 30 cm de largura. A estrutura metálica foi confeccionada em aço inox, sendo que o suporte em alumínio e as placas de vidros foram temperados para fornecer maior segurança e durabilidade. Uma mangueira de silicone é utilizada para a admissão e retirada dos fluidos, sendo que, para estabelecer o espaçamento entre as placas, empregam-se tiras de espessura uniforme de borracha de *Neoprene*. Na parte superior da célula existe uma calha por onde, alternativamente, é possível introduzir tanto o óleo quanto a água. A Figura 1 mostra o aparato utilizado nos experimentos.

A célula permite a realização de ensaios em diferentes ângulos e espaçamentos entre as placas, de forma a se poder estudar os efeitos de gravidade e de capilaridade sobre o deslocamento dos fluidos (água/óleo) com o eventual aparecimento do fenômeno da digitação viscosa.

2.1. Material

As características dos materiais utilizados nos ensaios estão apresentadas abaixo.

- *Óleo* – os ensaios foram realizados com óleo vegetal na temperatura ambiente (25°C). O movimento da interface pode ser melhor visualizado com um corante azul (azul Proflex), adicionado ao óleo de soja. Este corante é apropriado para destacar a interface durante o processo, auxiliando assim nas filmagens. O óleo de soja utilizado neste estudo apresenta características similares aos petróleos nacionais para a tensão interfacial (Hansen et al, 1999), viscosidade e massa específica. Portanto, o emprego do óleo de soja, além de facilitar a visualização do fenômeno da digitação de água no óleo, possibilita o estudo de um sistema similar água/petróleo. Embora se tenha utilizado preferencialmente o óleo de soja, um número reduzido de ensaios foi conduzido com uma amostra de petróleo.
- *Água* – utilizou-se água destilada ou solução de cloreto de sódio a 3% p/v.

As propriedades físicas de interesse dos fluidos empregados aparecem na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades físicas do óleo de soja, petróleo e da água com 3,0% de sal para a temperatura de 20° C.

$\mu_{\text{água}}$ (g/cm.s)	$\mu_{\text{óleo}}$ (g/cm.s)	$\mu_{\text{petr.}}$ (g/cm.s)	$\rho_{\text{água}}$ (g/cm ³)	$\rho_{\text{óleo}}$ (g/cm ³)	$\rho_{\text{petr.}}$ (g/cm ³)
0,01	0,558	0,330	1,0126	0,92	0,92

2.2. Métodos

As duas formas de procedimento adotadas correspondem às situações de inversão de fases e de bombeamento. Os experimentos de inversão de fases podem ser associados, por exemplo, ao problema de vazamento a partir de dutos submersos, enquanto que os experimentos de bombeamento relacionam-se tipicamente ao processo de elevação artificial.

• *Inversão de fases* – Inicialmente, para se obter uma linha horizontal e estável ao nível da interface água-óleo, carrega-se primeiramente o óleo pela parte inferior da célula sendo em seguida a água vertida cuidadosamente pela calha na extremidade superior, mantendo-se as placas em pequeno ângulo com a horizontal. Uma vez terminado o carregamento dos fluidos, aumenta-se o ângulo das placas com a horizontal, dando-se início ao fenômeno de inversão de fases. Este procedimento é de execução breve, sendo que cada um dos ensaios consumiram aproximadamente 30 minutos em média. A Figura 1 apresenta o conjunto experimental empregado nestes ensaios. A bomba peristáltica não foi utilizada nos experimentos de inversão de fases.

• *Bombeamento* – Utilizou-se uma bomba peristáltica. O carregamento da água é feito pela extremidade inferior da célula até um determinado nível. Em seguida, com a célula em pequeno ângulo com a horizontal, verte-se cuidadosamente o óleo pela calha na extremidade superior até se completar o volume desejado. O bombeamento do restante da água só é realizado quando a interface dos dois fluidos estiver estável, inclinando-se, então, a célula até o ângulo pré-estabelecido. A Figura 1 apresenta o equipamento com a bomba peristáltica e a câmara filmadora.

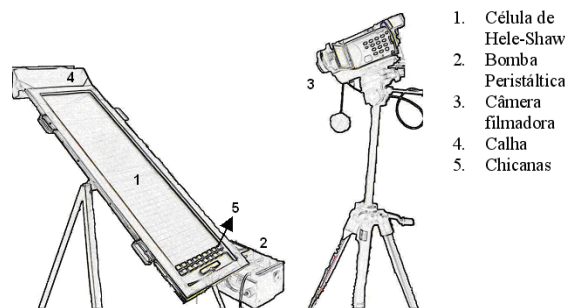


Figura 1. Esquema do aparato experimental com bomba peristáltica utilizados nos ensaios de inversão e bombeamento.

As imagens obtidas com a filmadora foram tratadas e analisadas para quantificar a cinética da digitação, envolvendo as distâncias percorridas pelos *fingers* e seus volumes correspondentes. Para a realização dos experimentos, alguns detalhes adicionais foram observados: a fixação de papel milimetrado plastificado por trás do vidro auxilia na quantificação dos detalhes geométricos e cinéticos do escoamento imiscível envolvendo a água e o óleo. A colocação de uma pequena chicana junto ao furo na parte inferior da célula auxilia na uniformização do fluxo de água nos ensaios de bombeamento.

3. Abordagem Teórica

Considerando-se um escoamento laminar incompressível, completamente desenvolvido através de um canal formado por duas paredes paralelas, demonstra-se que a velocidade média do escoamento pode ser dada pela lei de Darcy, segundo:

$$\vec{V} = -\frac{h^2 \rho}{12\mu} \nabla \phi \quad (1)$$

O potencial de forças ϕ deve ser definido individualmente para cada um dos fluidos, de forma a se incluir o trabalho a ser feito contra a pressão capilar interfacial. Assim, a pressão capilar na interface entre os fluidos (P_c) no interior da célula de *Hele-Shaw* pode ser dada por (Coskuner e Bentsen, 1986):

$$P_c = \sigma_{ow} \left(\frac{2}{h} + \alpha^2 \eta \right) \quad (2)$$

onde: ' σ_{ow} ' é a tensão interfacial óleo-água; ' h ' é o espaçamento entre as placas; ' η ' é o comprimento alcançado pelo *finger* e ' α ' é uma constante de separação [m^{-1}] dada por $\alpha = \sqrt{\frac{I}{\eta R}}$, sendo ' R ' o raio de curvatura do *finger* no plano da célula.

A partir dos potenciais de perturbação da água no óleo, $(\phi_w^*)_o = (\phi_w)_o - (\phi_w)_w$, e do óleo na água $(\phi_o^*)_w = (\phi_o)_w - (\phi_o)_o$ é possível chegar às velocidades de perturbação (Bentsen, 1985) que correspondem às velocidades de digitação dos *fingers* de água e óleo na direção z , conforme as equações apresentadas a seguir:

$$(V_{wz}^*)_o = V \left(\frac{\mu_o}{\mu_w} - 1 - \frac{(\rho_w - \rho_o)h^2 g \cos\theta}{12\mu_w V} - \frac{h^2}{12\mu_w} \alpha_w^2 \frac{\sigma_{ow}}{V} \right) \quad (3)$$

$$(V_{oz}^*)_w = -V \frac{\mu_w}{\mu_o} \left(\frac{\mu_o}{\mu_w} - 1 - \frac{(\rho_w - \rho_o)h^2 g \cos\theta}{12\mu_w V} - \frac{h^2}{12\mu_w} \alpha_o^2 \frac{\sigma_{ow}}{V} \right) \quad (4)$$

onde: V é a velocidade superficial de deslocamento das fases. Uma forma para a perturbação da interface é assumida *a priori*, de maneira que a distância percorrida pelo *finger* $\eta(x, t)$ na direção z seja dada pela equação:

$$\eta(x, t) = \frac{1}{\alpha} \cos(\alpha x) \ln \cosh(\alpha a t) \quad (5)$$

onde: a velocidade de perturbação do ápice do *finger* (a) é dada por:

$$a = \frac{\pi}{2} V_z^* \quad (6)$$

Esta abordagem proposta por Peters e Flock (1979) e Bentsen (1985) constitui-se na base do modelo utilizado neste trabalho.

4. Resultados e Discussão

A Figura 2 apresenta a instabilidade da interface água-óleo surgida alguns momentos após o início de um ensaio de inversão de fases com abertura entre placas de 4,48 mm, ângulo de 15° com a horizontal e sem a presença de sal na água. Na Figura 3, observa-se o início do fenômeno da digitação viscosa em um experimento de bombeamento com ângulo de 0° com a horizontal, abertura de 4,48 mm entre as placas e água possuindo 3% p/v de sal.

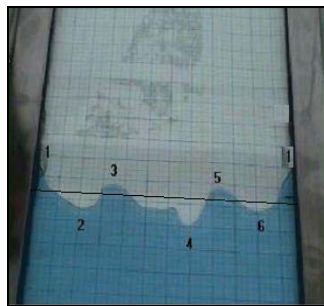


Figura 2. Ensaio realizado por inversão de fases.



Figura 3. Ensaio realizado por bombeamento.

A Tabela 2 contém as condições operacionais utilizadas em um ensaio experimental de inversão de fases. A tabela ainda apresenta a tensão interfacial efetiva empregada no modelo matemático que melhor se adaptou ao comportamento experimental.

Tabela 2. Condições operacionais do teste de inversão.

σ_e (dinas/cm)	Ângulo (graus)	h (cm)	Modo de instabilidade	Tempo total (s)
35,76	15	0,125	6	300

A Figura 4 apresenta os resultados de simulação do volume médio dos *fingers* em função do tempo para o ensaio de inversão de fases com 0,125 cm de abertura entre as placas.

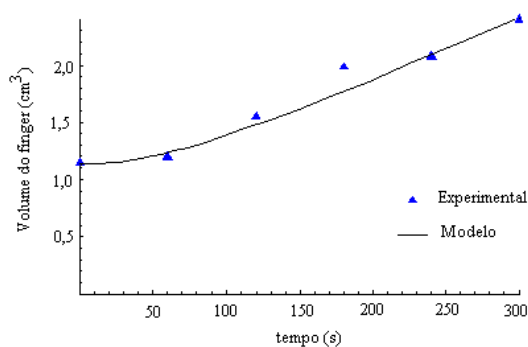


Figura 4. Evolução do volume médio do *finger* para o ensaio de inversão com abertura de 1,25mm, inclinação de 15° e sem sal na água.

Utilizando o valor de 35,76 dinas/cm para a tensão interfacial no modelo desenvolvido, observou-se que o mesmo é capaz de representar bem o comportamento experimental da evolução do volume médio dos *fingers* em função do tempo. Já para as distâncias médias percorridas pelos *fingers* de água e óleo, o modelo, que produz *fingers* regulares, prevê distâncias menores que as observadas experimentalmente para *fingers* pouco regulares. Outro resultado obtido com esta simulação foi que a largura da base do *finger* de água apresentou um valor equivalente a 92% da largura da base do *finger* de óleo. No experimento, a relação entre as larguras das bases varia bastante dependendo do par de *fingers* que esteja sendo considerando.

Entre os ensaios de bombeamento com o óleo de soja, selecionou-se apenas um, dada a sua regularidade e boa definição dos *fingers* formados. Em vários ensaios com espaçamentos de 2,31 e 4,48 mm, a digitação foi incipiente ou não ocorreu. A Tabela 3 apresenta as condições operacionais utilizadas no teste de simulação referente à operação de bombeamento.

Tabela 3. Condições operacionais utilizadas no teste de simulação de bombeamento com óleo de soja.

Vazão água (cm³/s)	σ_e (dinas/cm)	Ângulo (graus)	h(cm)	Modo de instabilidade	Tempo total (s)
1,78	234	45	0,125	4	300

Na Figura 5 são apresentados os resultados de simulação referentes às condições operacionais contidas na Tabela 3. Como pode ser observado na Figura 5, o modelo foi capaz de descrever bem a evolução do volume médio do *finger* ao longo do tempo. Já a distância média percorrida pelos *fingers* de óleo teve uma predição razoavelmente boa. No caso dos *fingers* de água, o modelo se afasta do resultado experimental a partir de 10 segundos do início do ensaio, momento no qual estes *fingers* pararam de avançar.

Neste teste de simulação, o valor de tensão interfacial efetiva que melhor se adaptou aos resultados experimentais foi de 234 dinas/cm, um valor particularmente elevado. Também nesta simulação, o modelo previu um *finger* de água mais estreito do que o de óleo (aproximadamente 82% da largura do *finger* de óleo).

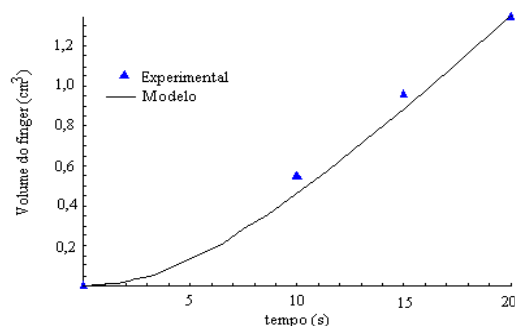


Figura 5. Evolução do volume médio do *finger* para o ensaio de bombeamento com abertura de 1,25mm, inclinação de 45° e com 3% de sal na água.

De acordo com o modelo, a largura da base do *finger* de água torna-se menor com a redução da tensão interfacial efetiva. Consequentemente, a largura do *finger* de óleo aumenta. Aumentando-se a tensão interfacial, o comportamento é o inverso.

A Figura 6 apresenta a evolução da eficiência do bombeamento ao longo do tempo. Esta eficiência é definida pela razão entre o volume dos *fingers* de óleo formados e o volume de água injetado. Os resultados apresentados com o modelo apresentaram boa concordância com os dados experimentais.

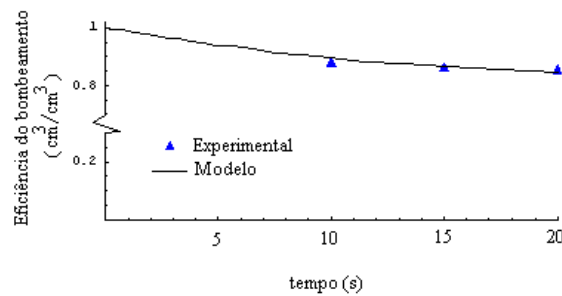


Figura 6. Eficiência do processo de bombeamento para o ensaio com abertura de 1,25mm, inclinação 45° e 3% de sal na água.

O ensaio de bombeamento realizado com as condições operacionais citadas na Tabela 3 apresentou, segundo o modelo, uma eficiência de deslocamento do óleo de 85% aos 20 segundos, com leve tendência de queda com o decorrer do processo.

5. Conclusão

De acordo com os resultados obtidos, ocorre um aumento do número de *fingers* com a redução do espaçamento entre placas. Nos casos de bombeamento, o aumento da velocidade superficial também tende a aumentar a instabilidade na interface, produzindo um número maior de *fingers*. A presença de sal na água reduz a tensão interfacial, favorecendo o surgimento do fenômeno da digitação viscosa.

A utilização da célula de *Hele-Shaw* para a realização de experimentos de escoamentos do tipo água/óleo em diferentes ângulos e espaçamento entre as placas, proporciona um campo de testes para estudos do fenômeno da digitação viscosa e dos efeitos gravitacional e de capilaridade em deslocamentos de um líquido imiscível por outro.

Outro aspecto estudado foi a eficiência do bombeamento ao longo do tempo para as operações de deslocamento do óleo mediante a injeção de um fluxo ascendente de água. De uma forma geral, houve boa concordância entre o modelo e os dados experimentais. Em um ensaio com petróleo, com abertura entre as placas de 0,125 cm, obteve-se queda de cerca de 20% na eficiência do deslocamento do óleo após 20 segundos de bombeamento com água. Este tipo de resultado pode ser adequadamente simulado pelo modelo, e certamente se constitui em assunto de interesse da área de extração de petróleo.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro e técnico provido pela Agência Nacional do Petróleo (ANP) e pelo Laboratório de Controle de Processos (LCP) da Universidade Federal de Santa Catarina.

7. Referências

- BENTSEN, R. G. A New Approach to Instability Theory in Porous Media. *Society of Petroleum Engineers Journal*, p 765-779, 1985.
- BENTSEN, R. G., COSKUNER, G. A Modified Theory for Predicting Unstable Immiscible Displacements. *Aostra Journal of Research*, vol. 2, nº 3, p. 155-165, 1986.
- CHUOKE, R.L., VAN MEURS, R., VAN DER POEL, C. The Instability of Slow, Immiscible, Viscous Liquid-liquid Displacements in Permeable Media. *Trans. AIME*, vol. 216, p. 188-194, 1959.
- HANSEN, E. B., RASMUSSEN H., A Numerical Study of Unstable Hele-Shaw Flow. *J. Comp. Math. Applic.*, 38, p. 217-230, 1999.
- PETERS, E. J.; FLOCK, D. L. The Onset of Instability During Two-Phase Immiscible Displacement in Porous Media. *Society of Petroleum in Engineers of AIME*, p. 1-12, 1979.
- SAFFMAN, P. G.; TAYLOR, G. I. The Penetration of a Fluid into a Porous Medium or Hele-Shaw Cell Containing a more Viscous Liquid. *Proc. Roy. Soc.*, A245, p. 312-329, 1958.
- THOMAS, J., *Fundamentos de Engenharia Petróleo*. Editora Interciência, 2001.
- XU, J.-J., *Interfacial Wave Theory of Pattern Formation*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 1998.