

1 Introdução

1.1. Motivação do Trabalho

O entendimento dos fenômenos naturais ou provocados pelo homem tem sido, ao longo da história, vital para a sobrevivência e para a melhoria das condições de vida da espécie humana, servindo inclusive como indicador do nível de desenvolvimento das civilizações. Na busca de tal entendimento, são ferramentas das mais eficazes e largamente empregadas, os diversos tipos de simulação desses fenômenos, levados a efeito em representações (modelos) dos ambientes onde eles ocorrem.

Os modelos podem ser físicos ou teóricos, tendo os primeiros como principal atributo uma escala, que possibilita a construção de ambientes com dimensões factíveis, onde podem ser feitas, com relativa fidelidade, simulações, de fenômenos que, na natureza, ocorrem em ambientes microscópicos ou de muito grandes proporções.

O principal atributo dos modelos teóricos é resultarem de abstrações, o que coloca como únicas limitações à sua criação, o estágio de desenvolvimento das ciências ligadas ao fenômeno estudado e a capacidade dos meios computacionais disponíveis. A construção de modelos teóricos geralmente demanda menos recursos materiais e financeiros e, na maioria dos casos, menos tempo. Por isso é cada vez mais freqüente a sua utilização para restringir o número de alternativas a serem pesquisadas com utilização de modelos físicos e até mesmo substituí-los.

Dentre os assuntos que têm sido objeto de inúmeros estudos experimentais e teóricos está o escoamento de fluidos em meios porosos. Isto, devido à imensa gama de aplicações nas mais diversas áreas do conhecimento e da atividade humana, tais como:

- Engenharia de petróleo (reservatórios);
- Meio ambiente (dispersão de poluentes, contaminação);
- Engenharia civil (mecânica dos solos, fundações);
- Hidrologia (águas subterrâneas);

- Engenharia agrícola (irrigação, drenagem, secagem);
- Engenharia química (filtração);

O problema de extração de combustíveis fósseis (petróleo e gás) exige a análise de escoamento de fluidos imiscíveis no subsolo, que nada mais é que um meio poroso. Durante a perfuração, por exemplo, é muito importante prever o comportamento da lama de perfuração na formação. Esta é pressurizada com objetivo de lubrificar e resfriar a broca de perfuração e carrear o cascalho gerado na perfuração, e deve possuir a menor viscosidade possível para exigir bombas de menor potência. Ao mesmo tempo, a sua viscosidade deve ser alta o suficiente para que a contaminação da formação, por causa do escoamento da lama na rocha porosa, seja mínima. Depois de atingida a profundidade adequada, é bombeado um fluido, normalmente água, que serve de separação entre a lama de perfuração e o fluido de cimentação. Como a viscosidade entre esses três fluidos é muito diferente, pode ocorrer contaminação da formação se o processo não for muito bem controlado e os fluidos bem escolhidos.

Outra prática muito comum na produção de petróleo e na recuperação de campos petrolíferos é a injeção de água ou gás, através de poços injetores, para aumentar a pressão do reservatório e deslocar o óleo. Para isso é muito importante entender o escoamento de fluidos em meios porosos. Previsões pouco precisas podem levar a diluição e contaminação do óleo, degradando e inviabilizando a produção em extensas áreas da formação. O petróleo possui viscosidade bem mais elevada que a água o que dificulta o processo de recuperação do reservatório e facilita a infiltração desordenada deste fluido de injeção em trechos com óleo. Para diminuir esse problema normalmente são adicionados polímeros para alterar o comportamento mecânico da água de injeção. Em geral busca-se aumentar a viscosidade da água, mas, na medida em que a viscosidade do fluido de injeção aumenta, são necessárias unidades de bombeamento cada vez mais potentes. O desafio é aumentar a viscosidade da água no escoamento pelo meio poroso, mas manter a baixa viscosidade ao longo do poço de injeção, o que exige conhecimento profundo das propriedades físicas, químicas e reológicas dos fluidos de injeção e, sobretudo, do seu comportamento em todas as fases do processo. O comportamento mecânico dos fluidos será apresentado, em detalhes, no item 1.3 deste capítulo (*“1.3 – Comportamento Mecânico dos Fluidos”*).

A fig. (1.1) é uma representação da recuperação do petróleo em meio poroso através da injeção de fluido. O fluido 1 representa o fluido de injeção e o fluido 2 representa o óleo do reservatório.

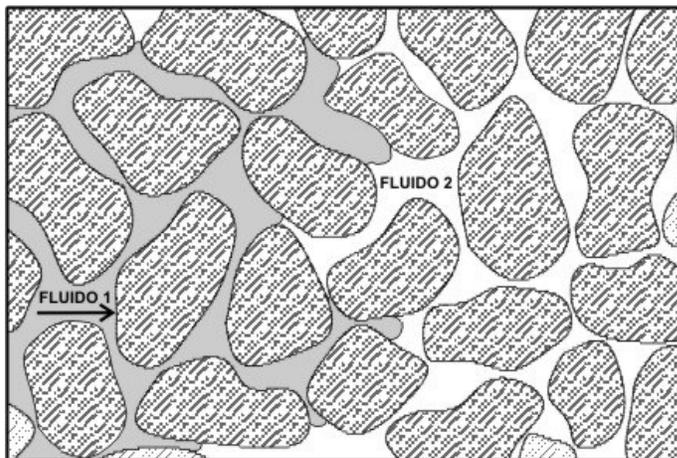


Figura 1.1 – Representação esquemática do processo de recuperação de óleo por injeção de fluido em um meio poroso.

Com o objetivo de aumentar o rendimento de campos novos ou em operação, estratégias de produção têm sido intensamente estudadas com o auxílio de modelos computacionais. Através desse recurso, o posicionamento de poços produtores e injetores pode ser otimizado, assim como métodos avançados de recuperação podem ter sua eficiência comparada em situações específicas.

Por outro lado, o tema enquadra-se também no âmbito dos problemas ambientais, tendo em vista, por exemplo, a necessária proteção ou eventual recuperação de aquíferos acidentalmente contaminados por hidrocarbonetos (óleo cru, gasolina, benzol, toluol etc). Diferentes estratégias de remediação, de custo freqüentemente alto, podem ser testadas e otimizadas com a ajuda de modelos computacionais.

Ambos os problemas relacionados a meios porosos citados acima, em princípio antagônicos sob o ponto de vista de aplicação prática, são descritos pelos mesmos processos físicos. Podem ser simulados numericamente e sua solução ser otimizada através de um mesmo modelo de escoamento em meios porosos. O processo físico baseia-se no fato de que o transporte de fluidos no subsolo depende das relações constitutivas entre as fases envolvidas e o meio poroso. Conseqüentemente, a modelagem matemática do escoamento de fluidos no subsolo depende das características e composição dos materiais

transportados. Matematicamente o problema é descrito através do conceito de conservação de massa e quantidade de movimento para os fluidos presentes. A posterior solução do problema é obtida com o auxílio de aproximação numérica. Nesse sentido, diferentes técnicas podem ser utilizadas: Método dos Elementos finitos, Método de Diferenças Finitas e Método dos Volumes Finitos. Devido à alta não-linearidade dos sistemas de equações acopladas normalmente empregados, os resultados numéricos geralmente apresentam problemas de instabilidade e divergência.

A utilização e desenvolvimento de simuladores para escoamentos em meios porosos representam uma tendência. Ferramentas matemáticas e numéricas vêm intensamente substituindo alguns tipos de investigação experimental, tendo em vista vantagens operacionais e principalmente economia em termos de custo e tempo.

1.2. Descrição do Problema

O escoamento de fluidos no interior de meios porosos pode ser representado pelo escoamento em canais com constrições (convergente/divergente) que serão chamados de capilares (embora não sejam considerados os efeitos das forças de capilaridade). Essa representação é apresentada de forma esquemática na fig. (1.2-a). Mas a representação refere-se apenas ao fluxo entre dois poros. Para ser realizada uma simulação do escoamento em um determinado volume do meio poroso (ao invés de uma simulação localizada entre 2 poros), utiliza-se modelo de rede de canais, conforme ilustrado na fig. (1.2-b). O conhecimento do escoamento em capilares pode ser aplicado utilizando-se esse conceito de rede, inclusive considerando heterogeneidades no meio poroso (mais detalhes no item “1.5 – *Redes Capilares*”).

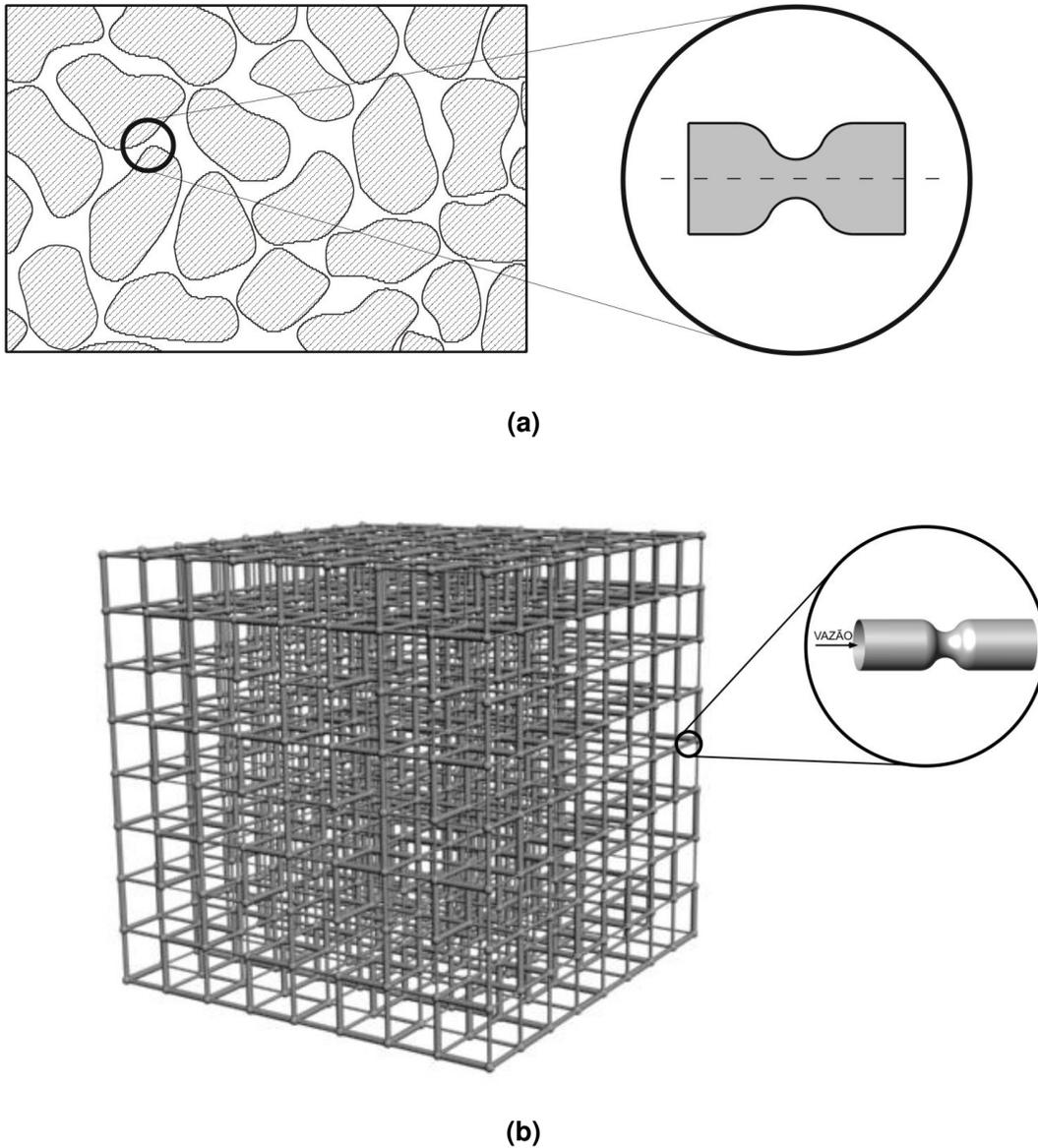


Figura 1.2 – Representação esquemática de meio poroso: (a) meio poroso e modelo de canal com constrição, (b) ilustração de rede de canais com constrições.

Nesse trabalho será investigado numericamente o comportamento de escoamento de líquido pseudo-plástico através de capilar convergente/divergente. Serão realizadas diversas simulações, de forma individual, onde o líquido pseudo-plástico e a geometria do canal irão variar. A geometria escolhida está representada na fig. (1.3). A variação da geometria da garganta busca tornar possível tanto reproduzir meios porosos com diferentes permeabilidades, quanto simular futuramente heterogeneidades em modelos de redes canais.

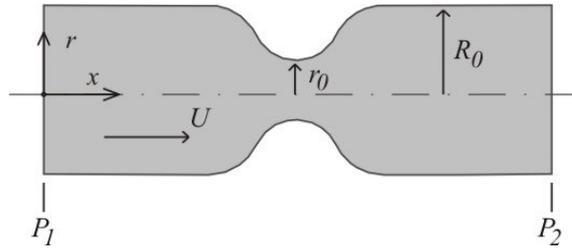


Figura 1.3 – Representação esquemática de canal convergente/divergente.

A fabricação de canais convergentes/divergentes para bancadas de testes pode ser difícil ou até mesmo impossível. As características geométricas dos canais convergentes/divergentes serão investigadas a fim de serem obtidas relações com canais equivalentes de raios constantes, que são o principal foco do estudo. Com essas relações estabelecidas, investigações experimentais futuras poderão ser drasticamente simplificadas.

1.3. Comportamento Mecânico dos Fluidos

1.3.1. Fluidos Newtonianos

Os fluidos que têm o seu comportamento mecânico governado pelas leis de Newton são ditos newtonianos. Sua característica é que o tensor tensão (τ) é proporcional à taxa de deformação ($\dot{\gamma}$), conforme a eq.(1-1). A constante de proporcionalidade μ é denominada viscosidade absoluta. Para fluidos newtonianos a viscosidade não varia com a taxa de cisalhamento.

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (1-1)$$

1.3.2. Fluidos não-Newtonianos

O comportamento mecânico dos fluidos não-newtonianos é estudado na Reologia, ramo da ciência que estuda a deformação e o escoamento de

materiais. Três conceitos teóricos são envolvidos: cinemática, leis de conservação e relações constitutivas. A cinemática estuda o movimento, descrevendo as mudanças na forma dos corpos com o tempo. Leis de conservação lidam com forças, tensões, transferência de quantidade de movimento e energia que são percebidas durante o movimento. Relações constitutivas servem para unir os conceitos anteriores relacionando a tensão com a deformação sofrida pelo material.

Um conceito importante é o da função material. Trata-se de parâmetros que caracterizam a resposta do material a um escoamento. Por exemplo, um fluido newtoniano é definido pela equação (1-1) que representa uma equação constitutiva. A viscosidade é a única função material nesta equação. Então os fluidos newtonianos necessitam apenas um parâmetro para descrever o seu comportamento mecânico. Já no caso dos fluidos não-newtonianos, existem várias equações constitutivas possíveis e mais de uma função material é necessária para descrever o comportamento mecânico

Em resumo, os fluidos não-newtonianos não apresentam uma relação linear entre a tensão e a taxa de deformação, ou seja, os valores da viscosidade mudarão com a variação nos valores da taxa de deformação. As principais classificações para fluidos não-newtonianos são apresentadas na fig. (1.4). Para cada tipo de fluido apresentado existem funções materiais características.

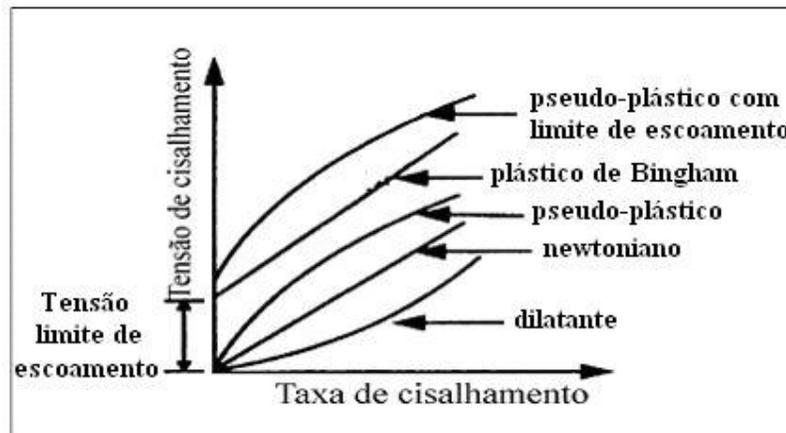


Figura 1.4 – Classificação do comportamento reológico de diferentes tipos de fluidos segundo Kawatra e Bakshi (Kawatra e Bakshi, 1996)

Para alguns fluidos, os valores de viscosidade diminuem com o aumento da taxa de cisalhamento; nesse caso, diz-se que o material possui comportamento pseudoplástico. Quando o contrário acontece, ou seja, a

viscosidade aumenta com aumento da taxa de cisalhamento, diz-se que o fluido possui comportamento dilatante. Outros tipos de fluidos não-newtonianos são os fluidos viscoplásticos. Esses fluidos necessitam de uma tensão finita, conhecida como tensão limite de escoamento ou "yield stress", para que ocorra deformação.

Em relação à mudança da viscosidade com o tempo, existem dois tipos de fluidos, o tixotrópico e o reopético. Os fluidos tixotrópicos apresentam uma diminuição da viscosidade com o tempo, quando submetidos a uma taxa de cisalhamento constante. Já os fluidos considerados reopéticos apresentam um aumento da viscosidade com o tempo.

Resumindo, a função viscosidade representa o comportamento de cada fluido específico. Existem diversas expressões para a função viscosidade que foram determinadas empiricamente, de acordo com o comportamento do fluido num escoamento de cisalhamento.

O presente trabalho irá estudar fluidos newtonianos e não-newtonianos. No que diz respeito aos fluidos não-newtonianos serão utilizados, em diferentes situações, os modelos "power law" e Carreau-Yasuda para fluidos pseudoplásticos (mais detalhes no próximo capítulo, item "2.1 – *Formulação Matemática*"). Essa escolha se deu principalmente por serem modelos com solução analítica para escoamento em canal de raio constante e, com a variação dos seus parâmetros, são representativos de vasta gama de fluidos reais de interesse da indústria.

1.4. Meios Porosos

Os meios porosos são caracterizados por uma base sólida contendo "diversos pequenos espaços vazios" que são denominados poros. Existem aqueles que são impermeáveis, onde os poros não se conectam. Mas as considerações desse trabalho serão feitas em relação ao estudo dos meios porosos permeáveis, que são os que têm os poros conectados de forma a permitir o escoamento em seu interior.

A porosidade de um meio poroso é definida como a fração volumétrica de poros no volume total do meio.

Meios porosos reais possuem elevado grau de complexidade em sua

geometria, por isso é muito difícil descreve-los geometricamente de forma precisa. Algumas aproximações geométricas são então consideradas para tornar possível o estudo do meio, obtendo-se características muito próximas das reais.

São feitas simplificações agrupando os meios porosos, em função de sua estrutura, como granulares ou fibrosos. Ilustrações esquemáticas de meios porosos granulares e fibrosos constituem a fig. (1.5). Os granulares são normalmente modelados como um conjunto de partículas dispostas de forma regular ou randômica e representam a grande maioria dos meios porosos. Já os fibrosos são modelados como um conjunto de fibras muito longas dispostas randômicamente ou em malhas regulares.

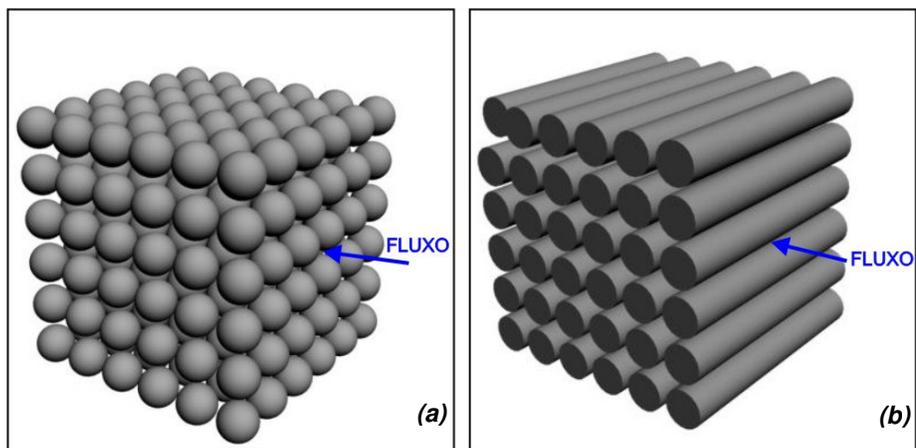


Figura 1.5 – Representação esquemática de meios porosos: (a) granular e (b) fibroso.

Uma outra classificação interessante foi sugerida por Manegold (Manegold, 1937) e citada por Lisboa (Lisboa, 2000). Os meios porosos seriam vazios, capilarizados e espaços forçados.

- Vazios: as paredes do meio têm efeito insignificante sobre o fenômeno hidrodinâmico em seu interior.
- Capilarizados: a geometria das paredes exerce alguma influência sobre o escoamento, mas os efeitos devidos à estrutura molecular do fluido são desprezíveis.
- Espaços Forçados: a estrutura molecular do fluido influi consideravelmente no escoamento.

O caminho mais viável para a modelagem de meios porosos é admitir a existência de um “elemento representativo de volume” (ERV). Isto é, admite-se a existência de uma célula periódica invariante no espaço. Dessa forma a média de uma variável tomada sobre este elemento permanece inalterada quando seu

tamanho é ligeiramente perturbado. Porém alguns meios porosos reais, em particular aqueles com heterogeneidades em várias escalas de comprimento, não podem ser associados a um único ERV. Nesse caso utiliza-se mais de um ERV, com mesmo formato e dimensões diferentes (proporcionais), que são combinados e representam o meio estudado.

Para a simulação de escoamentos no interior dos meios porosos é necessário entender como a vazão varia em função do gradiente de pressão. A determinação desta relação somente é possível conhecendo-se alguma grandeza física que represente a resistência do meio poroso ao escoamento. Estas características macroscópicas podem ser expressas de diversas maneiras, como por exemplo, pelo fator de atrito, ou pela permeabilidade de Darcy. A permeabilidade é a característica que o meio poroso possui de permitir e condicionar o escoamento de um fluido no interior dos seus poros. Mais detalhes sobre porosidade ou permeabilidade de Darcy podem ser encontrados em Lisboa (Lisboa, 2000).

1.5. Redes Capilares

Modelos com redes de tubos capilares constituem uma metodologia consagrada para simulação de escoamentos em meios porosos. Trata-se da construção de uma rede tridimensional de canais ligados entre si. Uma representação esquemática é apresentada na fig. (1.6). Os resultados desse trabalho referem-se ao escoamento em capilares de forma individual. As conclusões que serão geradas devem, no futuro, serem incorporadas a modelos existentes de redes capilares.

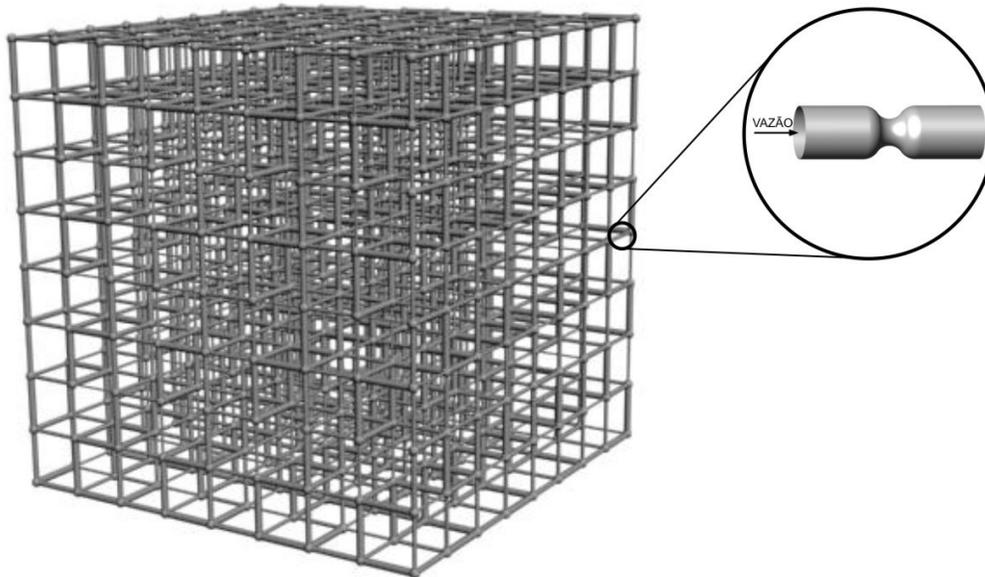


Figura 1.6 – Representação esquemática de uma rede de capilares.

Aproximar a geometria do escoamento nos poros da rocha por um tubo capilar convergente/divergente auxilia de maneira decisiva o estudo do comportamento mecânico de fluidos escoando em meios porosos.

Os tubos capilares podem ter diferentes geometrias, com o objetivo de representar um domínio físico de meio poroso. Normalmente são geometrias de formato semelhante, mas com medidas variáveis, distribuídas de forma randômica. Nesse trabalho especificamente não serão consideradas as forças de capilaridade, ou seja, refere-se a capilares como sendo canais de seção circular de pequeno diâmetro (da ordem de 1 mm).

Em um modelo de redes é imposta uma diferença de pressão entre os limites do domínio da rede de capilares. Em cada capilar são resolvidas as equações que governam o escoamento para encontrar a vazão em função da diferença de pressão entre os seus pontos extremos. Dessa forma, se os parâmetros que definem o escoamento forem escolhidos de maneira adequada, é possível fazer boas previsões de como o escoamento ocorrerá no meio poroso. Vale ressaltar que essa escolha em geral é muito complexa, pois envolve além dos fatores geométricos, questões relacionadas ao comportamento mecânico do fluido que escoa.

Por exemplo, um reservatório típico possui petróleo em três estados: Sólido (betume), líquido (óleo) e gasoso (gás natural), além da água conata ou intersticial (presente em todo meio poroso) e do aquífero (normalmente salino) abaixo dos hidrocarbonetos da formação. Durante a produção também interage

com o reservatório a água de injeção, que pode conter adição de polímeros para maximizar processos de recuperação dos poços. Os escoamentos que ocorrem em reservatórios de petróleo apresentam comportamento complexo, constituindo um grande desafio a simulação dos mesmos.

1.6. Revisão da Literatura

Perrin et al. (Perrin et al., 2006) desenvolveram importantes estudos experimentais e numéricos sobre o escoamento de fluidos newtonianos e não-newtonianos em micromodelos de poros e de rede de poros. Para a realização de suas pesquisas usaram idealizações de meios porosos compatíveis com os representados por rochas de arenito, cuja rede de poros foi associada a uma rede de capilares retangulares, esculpido em silicone, com larguras e profundidades da mesma ordem de grandeza dos poros das rochas representadas. O principal objetivo dos autores nesse trabalho foi investigar as relações entre as simulações com fluido de Carreau e as observações no micro modelo esculpido, isto é, entre os resultados numéricos e experimentais.

Efetuaram medições da relação queda de pressão/vazão para água e para soluções não-newtonianas de poliacrilamida hidrolizada (HPAM), tanto em capilares simples, quanto em redes de capilares. Os autores concluíram que, devido à grande precisão da caracterização do micro-modelo esculpido em silicone, poderiam ser feitas comparações quantitativas entre os resultados dos experimentos e das simulações (verificaram grande compatibilidade, do ponto de vista quantitativo para viscosidade aparente e vazão). As relações constitutivas para o escoamento em canais retangulares, de um fluido de Carreau, foram ajustadas através de fator de correção representado pela razão entre largura e a profundidade do capilar.

Orgéas et al. (Orgéas et al., 2007) estudaram o escoamento lento e isotérmico de fluidos newtonianos generalizados incompressíveis, através de meios porosos anisotrópicos. Propuseram normas para construção de leis de dispersão tensorial macroscópica, no contexto da teoria das funções tensores anisotrópicos e usando superfícies de isodissipação macroscópica. Para validar os resultados teóricos obtidos, desenvolveram simulações numéricas num meio fibroso 3D, com um fluido de Carreau-Yassuda. A formulação e a identificação

de leis de escoamentos são facilitadas pelo estudo da evolução e da forma de superfícies de isodissipação. Essas superfícies podem ser construídas a partir de experimentos de permeação, por imposição de gradiente de pressão a um determinado meio poroso, com diferentes orientações. Usando a teoria das funções tensores anisotrópicos, as expressões gerais das leis do escoamento foram especificadas nos casos de orthotropia, isotropia transversa e isotropia. Os autores demonstraram que, para o modelo fibroso ortotrópico 3D estudado, as expressões propostas ajustam muito bem numericamente superfícies de isodissipação. A maioria dos parâmetros constitutivos adicionais estão ligados à microestrutura, exceto os parâmetros de curvatura, para os quais não foram estabelecidas correlações.

Zatloukal et al. (Zatloukal et al., 2002) buscaram aperfeiçoar a determinação da viscosidade extensional de soluções poliméricas. Propuseram modelo matemático para a avaliação de dados de pressão de entrada e da influencia da viscosidade extensional e da razão comprimento/diâmetro (L/D) do orifício, sobre a queda de pressão de entrada. Sugeriram uma correção do comprimento de entrada efetivo, para demonstrar a capacidade das técnicas de entrada, de preverem com precisão dados de viscosidade extensional, a baixas taxas de extensão. Observaram que os resultados obtidos segundo as técnicas utilizadas por eles diferem em muito, especialmente a baixas taxas de cisalhamento, dos resultados do gráfico de Bagley. Os autores propuseram a viscosidade de entrada como um novo parâmetro do material e apresentaram um novo modelo para descrever com fidelidade esse novo parâmetro. Propuseram também um novo procedimento, a “correção do comprimento de entrada efetivo”. Isso assegura a capacidade dos modelos de Cogswell, Binding e Gibson de predizerem a razão de Trouton e a transição do comportamento da viscosidade extensional (escoamento viscoelástico linear para não linear), principalmente para misturas de polímeros em extensão uniaxial. A “correção do comprimento de entrada efetivo” tem sido testada para todas as técnicas de entrada, com alto grau de adequação e as viscosidades extensionais determinadas através dos modelos de Cogswell, Binding e Gibson com essa correção, têm se mostrado mais coerentes com os valores teóricos, que as determinadas através desses modelos sem a correção. Como resultado prático tem-se que, os orifício com as razões L/D testados pelos autores, podem ser fabricados e usados adequadamente na determinação da queda de pressão de entrada.

Lopez et al. (Lopez et al., 2003) apresentaram importantes resultados dos

seus estudos sobre fluidos power-law em meios porosos, através de modelagem de rede. Simularam a geometria e a topologia de areias e arenitos através de representações bastante realísticas que reproduziram com fidelidade as características destes meios porosos. Definiram uma relação entre a queda de pressão e a velocidade média do escoamento em cada poro a partir da variação da viscosidade com a taxa de cisalhamento. Estudaram também a variação da velocidade média com a viscosidade aparente para todos os elementos da rede. Com este método, aplicável apenas a polímeros com comportamento pseudo-plástico, alcançaram previsões de resultados de experimentos consagrados na literatura, sem a utilização de parâmetros de ajuste, obtendo previsões de melhor qualidade que as baseadas em modelos de feixes de tubos capilares. Os autores basearam seu estudo nas propriedades da goma Xanthan, em função da maior disponibilidade de resultados experimentais na literatura e do fato dos efeitos viscoelásticos do seu escoamento em meios porosos serem menos significativos. Menos significativos que, por exemplo, os escoamentos de formas hidrolizadas de poliacrilamidas (HPAM), outro polímero bastante usado em aplicações na indústria do petróleo. Tudo isso torna o Xanthan mais adequado para esse estudos de simulação. Assim, consideraram que a solução de Xanthan exibe apenas uma viscosidade dependente do cisalhamento, desprezando quaisquer efeitos viscoelásticos. Usaram em seus estudos redes derivadas de um bloco de areia (sand pack) e de um arenito de Berea. Através de modelagem de sedimentação e compactação, criaram representação digital tridimensional do espaço do poro, formando o meio mostrado na fig. (1.9). Construíram um modelo de rede topologicamente equivalente com tamanho de poro, forma e conectividade baseados na representação tridimensional.

Modelaram as gargantas como tendo seções transversais quadradas, circulares ou triangulares e determinaram os coeficientes de forma (razão entre a área da seção transversal e o quadrado do perímetro). Para considerar a forma triangular ou retangular dos poros e gargantas dos seus modelos de rede, os autores substituíram o raio R das expressões de viscosidade para capilares de seção circular, por um raio equivalente.

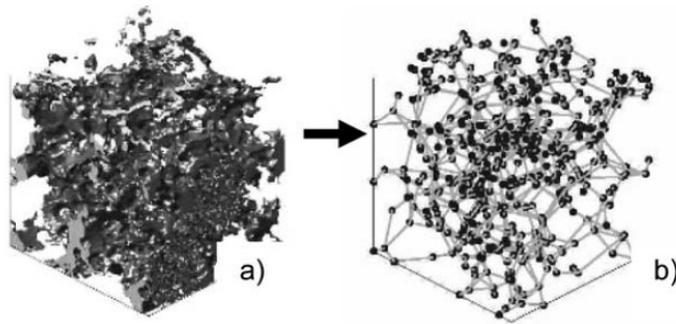


Figura 1.7 Processo de geração de rede para arenito (Lopez et al., 2003): (a) imagem tridimensional do meio poroso obtida por simulação dos processos sedimentares pelos quais a rocha é formada, (b) Rede topologicamente equivalente de poros conectados por capilares.

Concluíram que a rede de bloco de areia não é adequada para captar a complexidade de um arenito muito compacto, altamente tortuoso. No entanto, obtiveram excelentes resultados quando usaram arenito de Berea. Observaram, no entanto, que a muito baixas vazões, as simulações de rede diferem dos dados experimentais, sendo a viscosidade no meio poroso mais alta que a obtida no reômetro, fato que atribuíram ao bloqueio dos poros por adsorção, efeito não levado em conta no seu modelo.

Balhoff e Thompson (Balhoff e Thompson, 2006) usaram modelos de rede fisicamente representativos na modelagem do escoamento de fluidos pseudo-plásticos, inclusive fluidos power-law e de Ellis, investigando a influência da reologia de tais fluidos, bem como da morfologia do meio poroso, sobre o escoamento. Desenvolveram modelo macroscópico simples para o escoamento de fluidos power-law e de Ellis em blocos de esferas, a partir de resultados de modelos de rede e com a mesma funcionalidade dos modelos obtidos através da abordagem de feixe de tubos. Sendo preservada, no entanto, a geometria original das gargantas, o que permite modelar uma ampla faixa de escoamentos. Essa abordagem difere da maioria em que os modelos são de feixes de tubos capilares. O modelo macroscópico, desenvolvido para fluidos pseudo-plásticos com platô newtoniano, aplicado a fluidos power-law, prevê com precisão os resultados do modelo de rede. São obtidos valores corretos de β (constante no modelo macroscópico de fluido pseudo-plástico em meios porosos) que, no caso, não são derivados diretamente da tortuosidade do meio, como ocorre com freqüência. Mostraram que a determinação da constante β diretamente a partir da tortuosidade e de uma representação simples do meio poroso (feixe de

capilares), pode conduzir a incorreções e ambigüidades. Mostraram também que sendo β uma função fraca do índice pseudo-plástico, feixes de tubos simples não conduzem a modelagens adequadas do escoamento de um ampla variedade de fluidos pseudo-plásticos. Evidenciaram que a adoção de um valor de 1,46 para β , leva a boa concordância com resultados de modelos de rede, para valores moderados do índice "power law"/ índice pseudoplástico.

Compararam o modelo macroscópico com dados experimentais disponíveis na literatura, para fluidos pseudo-plásticos, observando que o modelo ajusta bem tais dados, quando β é tratada como um parâmetro experimental. Ressaltaram também que efeitos físicos, como adsorção e filtragem, bem como efeitos reológicos, como viscosidade, podem afetar o valor de β . Registraram ainda que pequenas imprecisões no valor de β , na permeabilidade do meio poroso ou nas propriedades reológicas do fluido, podem conduzir a grandes imprecisões nas estimativas da velocidade de Darcy versus gradiente de pressão, para fluidos que exibem comportamento pseudo-plástico extremo.

Flew e Sellin (Flew e Sellin, 1993) realizam vasta investigação experimental sobre o comportamento de soluções de poliacrilamidas escoando em diversas geometrias incluindo redes com arranjos hexagonais de hastes e redes formadas por esferas de vidro. Apesar dos autores terem direcionado seus estudos para a viscosidade extensional, que não será foco do presente trabalho, trata-se de publicação que fornece importantes subsídios à abordagem experimental do escoamento em meios porosos. Além disso, são feitas inúmeras correlações com situações vividas no dia a dia de campos petrolíferos. As concentrações do polímero utilizadas no estudo são aproximadamente as mesmas empregadas na prática em poços de injeção de água nos campos petrolíferos.

Rothstein e McKinley (Rothstein e Mckinley, 1999) desenvolveram um trabalho experimental estudando o escoamento de um fluido de Boger de poliestireno/poliestireno monodisperso diluído (0.025 %, em peso) através de uma contração/expansão axissimétrica de 4: 1: 4. Foram realizados experimentos com ampla faixa de números de Deborah. Verificou-se uma queda de pressão muito grande que aumenta monotonicamente com os números de Deborah atingindo valores muito acima do valor observado para um fluído newtoniano similar, a uma mesma vazão. Mais tarde, Rothstein e McKinley (Rothstein e Mckinley, 2001) realizam estudo experimental com um fluido de

Boger formado de poliestireno diluído em estireno. Avaliaram o escoamento através de contrações/expansões axissimétricas, com várias razões de contração, diversos graus de curvatura dos cantos de entrada e em diferentes números de Deborah. Um diagrama esquemático da geometria utilizada compõe a fig. (1.4). A cinemática do escoamento é estudada através de velocimetria por laser Doppler (LDV) e velocimetria de imagem digital de partícula (DPIV). Variando a razão de contração, constata-se a presença de um vórtice formado pelos efeitos elásticos próximos a entrada da contração para razão 2:1, enquanto que, para razão entre 4:1 e 8:1, este vórtice não se manifesta, surgindo um vórtice formado a partir do canto da geometria. Verificaram que o arredondamento dos cantos reentrantes leva a deslocamento do início das transições do escoamento em números de Deborah mais elevados, mas não muda qualitativamente a estrutura global do campo de escoamento.

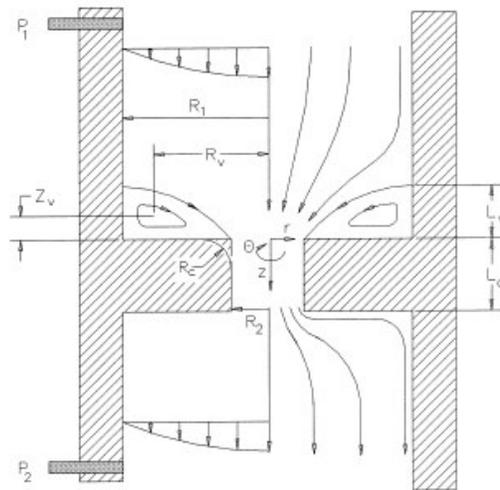


Figura 1.8 – Diagrama esquemático da geometria de contração/expansão apresentada nos experimentos de Rothstein e McKinley (Rothstein e Mckinley, 2001).

Foram medidos os tamanhos dos vórtices, a queda de pressão e o número de Deborah crítico para o início da instabilidade elástica. Usaram medições da reologia extensional transitória para explicar as significativas diferenças nos caminhos de evolução do vórtice (isto é, vórtice elástico de canto versus crescimento do vórtice próximo à borda de entrada na contração) observadas entre os fluidos de Boger poliestireno usados na sua pesquisa e fluidos de Boger poliisobutileno e poliacrilamidas usados em experimentos anteriores de escoamentos de contração.

1.7. Objetivos do Trabalho

O objetivo fundamental deste trabalho é investigar a influência da reologia de fluidos escoando em meios porosos, com foco nos fenômenos relacionados à geometria e à plasticidade. O trajeto do fluido entre os espaços vazios de um meio poroso é representado por capilar com contração/expansão, para o qual se pretende obter relações com canais equivalentes formados por raios equivalentes constantes. Neste trabalho serão estudados fluidos pseudo-plásticos. Para investigações de raios equivalentes serão empregados fluidos newtonianos e “power law”. Também serão apresentados alguns resultados de escoamentos com o modelo de Carreau-Yasuda.

Será estudado o escoamento em meio poroso em escala microscópica, através da solução das equações de conservação de quantidade de movimento e massa. A ferramenta computacional a ser utilizada é um programa de CFD, baseado em elementos finitos, que vem sendo desenvolvido no Grupo de Reologia do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio (mais detalhes no Capítulo “2 - *Formulação Matemática e Modelagem Computacional*”).

1.8. Roteiro

O Capítulo 2 inicia-se com a apresentação das formulações matemáticas. Em seguida é apresentado estudo dos canais convergentes/divergentes (gargantas) que constituem as geometrias de análise. Na seqüência são apresentadas as modelagens computacionais empregadas, definindo-se as condições de contorno e geometrias implementadas.

O Capítulo 3 começa com apresentação de um detalhado teste de malha, onde são feitas considerações a respeito da malha computacional adotada. Após definida a malha de trabalho, são estudados escoamentos de fluidos newtonianos e fluidos “power law” em capilares convergentes/divergentes, estabelecendo-se metodologia simples para serem definidos raios equivalentes constantes.

O Capítulo 4 traz os comentários finais dos principais aspectos discutidos nessa tese, além de apresentar algumas sugestões para trabalhos futuros.