



## PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PARA ANÁLISE DE PARÂMETROS UTILIZADOS NA INJEÇÃO DE POLÍMEROS EM RESERVATÓRIO DE PETRÓLEO

Maria do Socorro Bezerra da Silva<sup>1</sup>; Suylan Lourdes de Araújo Dantas<sup>2</sup> Jennys Lourdes Meneses Barillas<sup>3</sup>, Tarcilio Viana Dutra Junior<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – [socorromarya@gmail.com](mailto:socorromarya@gmail.com)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - [suylanlourdes@hotmail.com](mailto:suylanlourdes@hotmail.com)

<sup>3</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo - [jennys@eq.ufrn.br](mailto:jennys@eq.ufrn.br)

<sup>4</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo – [tarcilio@eq.ufrn.br](mailto:tarcilio@eq.ufrn.br)

### RESUMO

Um dos problemas mais comuns, para quem faz experimentos, é determinar a influência de uma ou mais variáveis sobre outra variável de interesse. A essência de um bom planejamento consiste em projetar um experimento de forma que ele seja capaz de fornecer exatamente o tipo de informação que se procura. Este artigo teve como objetivo analisar a influência de alguns parâmetros operacionais e de reservatório sobre o comportamento de produção do óleo, tendo como resposta analisada a produção acumulada de óleo. As principais variáveis avaliadas foram: viscosidade do óleo, porcentagem de polímero injetado, viscosidade do polímero e vazão de injeção de água. A avaliação da influência das variáveis consistiu de um planejamento experimental completo seguido de uma análise por Diagrama de Pareto com o objetivo de apontar quais as variáveis seriam mais influentes sobre a resposta representada pela produção acumulada do óleo. Encontrou-se que todas as variáveis influenciaram significativamente na recuperação de óleo.

**Palavras-chave:** planejamento, Diagrama de Pareto, Superfície de resposta

### 1. INTRODUÇÃO

A indústria do petróleo é caracterizada por ser uma atividade que exige projetos de grandes investimentos. Nesse sentido, os profissionais da área se deparam com situações em que necessitam realizar difíceis escolhas, isto é, tomar decisões que envolvem milhões de dólares, seja na fase de exploração, perfuração, produção ou completação. Nos primórdios da exploração e produção de petróleo, os profissionais da área contavam com a intuição, aspectos topográficos, hidrológicos e inúmeras teorias não fundamentadas em base científica.

Porém, com o crescimento do setor petrolífero tornou-se necessário o surgimento de ferramentas mais confiáveis, capazes de auxiliar o profissional na tomada de decisões objetivando diminuir a probabilidade de erro. Com a evolução da tecnologia e da ciência, atualmente pode-se contar com a utilização de ferramentas fundamentadas em conceitos magnéticos, elétricos, gravitacionais, sonoros e computacionais. Nos últimos tempos vem se observando uma preocupação mundial a respeito da hipótese do esgotamento das reservas de petróleo, que é uma previsão muito imprecisa. Porém, a única certeza é que



chegará o tempo em que a produção mundial chegará a um pico e depois entrará em declínio. A oferta mundial terá dificuldade de atender plenamente a demanda.

### 1.1. Recuperação do óleo

O método de injeção de água é um dos métodos de recuperação mais utilizados, devido à boa relação custo-benefício trazida para muitos reservatórios de petróleo. A grande maioria dos projetos atuais que visa à injeção de água no reservatório é implementada logo no início de sua vida produtiva, de maneira a manter ou até mesmo elevar a pressão de poro [NEEDHAM, 1987]. Os métodos químicos representam as principais alternativas para melhorar significativamente a recuperação de óleo residual, gerado pela injeção de água. Entre eles a injeção de soluções poliméricas é um método já utilizado com sucesso na indústria. Esta técnica consiste em aumentar a viscosidade do fluido injetado mediante a dissolução de polímeros na água, mas em alguns reservatórios o volume necessário de polímero e o seu custo, tornam sua aplicação economicamente inviável. Busca-se desenvolver polímeros mais resistentes às condições de reservatório, além de definir as condições ideais de campo que proporcionariam uma produção de óleo economicamente mais viável. A avaliação do método de injeção de polímeros envolve conceitos importantes e, desde a sua seleção para aplicação em um dado campo até sua implantação, são necessários análise criteriosa e testes preliminares. Se um determinado reservatório for considerado apto à injeção de polímeros, é importante analisar uma série de variáveis, como o tipo de polímero, a concentração e o tamanho do banco de injeção, com o objetivo de otimizar o processo [ROSA, 2006].

### 1.2. Polímeros

Os polímeros são compostos químicos de alta massa molecular relativa, resultantes de reações químicas de polimerização, por esse motivo são usados como agentes viscosificantes [15]. Nos anos 60, os polímeros foram sugeridos como meio de redução da razão de mobilidade pelo aumento da viscosidade da água deslocante e a redução da permeabilidade da formação.

### 1.3 Critérios para seleção do polímero

Os critérios de seleção são regras para aplicação de um processo de recuperação segundo as características do campo onde se deseja implantar tal método. Os critérios trazem uma estimativa de valores limites de propriedades de óleo e reservatório, tais como grau API e viscosidade do óleo, permeabilidade absoluta, profundidade e temperatura da zona produtora. Os critérios de seleção e análise são sequenciais e visam o uso ou descarte de um método de recuperação, seguido de análise de viabilidade técnica e econômica com grau de detalhamento crescente e com vistas ao atendimento dos objetivos planejados [TEIXEIRA, 2005]. A Tabela 1 apresenta alguns destes critérios.

Tabela 1: Critérios de seleção para aplicação de polímeros

<b>Temperatura</b>	Abaixo de 80°C
<b>Formações</b>	Areníticas e homogêneas
<b>Densidade do óleo</b>	>25° API
<b>Viscosidade do óleo</b>	<150cp
<b>Profundidade</b>	<2743m
<b>Permeabilidade</b>	Entre 250-1000 mD



### 1.1. Planejamento e análise de parâmetros

Um dos problemas mais comuns, para quem faz experimentos, é determinar a influência de uma ou mais variáveis sobre outra variável de interesse. A essência de um bom planejamento consiste em projetar um experimento de forma que ele seja capaz de fornecer exatamente o tipo de informação que se procura. No planejamento de qualquer experimento, a primeira coisa que se deve fazer é decidir quais são os fatores e as respostas de interesse. Os fatores, em geral, são as variáveis que o experimentador tem condições de controlar. Podem ser qualitativos, ou quantitativos. As respostas são as variáveis de saída do sistema, nas quais se está interessado, e que serão - ou não - afetadas por modificações provocadas nos fatores [BARROS NETO, 2007]. Para fazer um planejamento fatorial completo, devem-se realizar experimentos em todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores. Cada um desses experimentos, em que o sistema é submetido a um conjunto de níveis definido, é um ensaio experimental. Havendo 4 níveis num fator e 3 no outro, são necessários  $4 \times 3 = 12$  ensaios diferentes, e o planejamento é chamado de fatorial  $4 \times 3$ . Em geral, se houver  $n_1$  níveis do fator 1,  $n_2$  do fator 2, ..., e  $n_k$  do fator  $k$ , o planejamento será um fatorial  $n_1 \times n_2 \times \dots \times n_k$ . Isso não significa obrigatoriamente que serão realizados apenas  $n_1 \times \dots \times n_k$  experimentos. Este é o número mínimo necessário para um planejamento fatorial completo [Barros Neto, 2003]. Para fazer o planejamento fatorial, devem-se realizar ensaios e registrar as respostas observadas em todas as possíveis combinações dos níveis escolhidos. A lista dessas combinações é chamada de matriz de planejamento.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Tratamento estatístico

O tratamento estatístico foi realizado através de um programa computacional utilizado para análise dos efeitos principais e as interações entre os parâmetros analisados. Estas análises e interações foram realizadas por Diagrama e Pareto e Superfície de Resposta.

#### 2.1.1. Diagrama de Pareto

A sensibilidade dos parâmetros estudados sobre a resposta de interesse é examinada através do Diagrama de Pareto. O Diagrama de Pareto é um recurso gráfico utilizado na estatística que permite colocar os dados em uma ordem hierárquica, ajudando a identificar e avaliar os parâmetros e as interações mais significativas sobre cada variável de resposta considerada em um processo. Ele consiste num gráfico de barras que ordena as frequências das ocorrências da maior para a menor e permite a localização de problemas vitais e a eliminação de perdas. Um valor positivo no diagrama de Pareto indica que o referido fator influencia a resposta analisada no sentido de aumentá-la. Da mesma forma, um valor negativo referente a um parâmetro analisado, significa que tal variável contribui no sentido de diminuir o valor esperado para a resposta analisada.

#### 2.1.2. Superfície de Resposta

Este método é classificado como um método simultâneo, sendo em geral, utilizado na etapa de otimização. Sua aplicação permite selecionar a combinação de níveis ótimos na obtenção da melhor resposta para uma dada situação. No método das análises de superfície de resposta são realizados planejamentos fatoriais, cujos resultados são ajustados a modelos matemáticos. Essas etapas, conhecidas como etapas de deslocamento e modelagem, são repetidas várias vezes, mapeando a superfície de respostas obtidas na direção



da região de ponto ótimo desejado. A modelagem normalmente é feita ajustando-se os modelos mais simples, como o linear e o quadrático. 3

## 2.2. Análise da sensibilidade dos parâmetros utilizando um planejamento fatorial completo

Um passo importante para tornar a injeção de solução polimérica mais eficiente é encontrar os valores ótimos das variáveis do projeto que maximizem o desempenho do campo. Para verificar se determinados parâmetros exercem influência no processo de injeção da solução com polímeros, foi realizada uma análise destes a fim de confirmar sua influência no processo. Os parâmetros analisados foram:

- ✓ Concentração do polímero;
- ✓ Viscosidade do polímero;
- ✓ Viscosidade do óleo;
- ✓ Vazão de injeção de água;

Para desenvolver a análise de combinações entre os parâmetros operacionais e de reservatório, foi utilizado um planejamento fatorial completo de quatro variáveis com três níveis ( $3^4$ ). Optou-se por um planejamento fatorial completo, para facilitar as análises sem perdas de resultados importantes. As combinações realizadas, resultaram em 81 experimentos realizados através da simulação numérica, as quais foram analisadas por Diagrama de Pareto e Superfície de resposta. Os valores mínimos, médios e máximos estabelecidos para cada parâmetro foram baseados em valores possíveis de serem encontrados em reservatórios reais do Nordeste do Brasil, e estão representados na Tabela 2.

Tabela 2: Níveis de parâmetros analisados

Parâmetros	Níveis		
	-1	0	+1
Visc. do óleo	8cp	17cp	43cp
% de polímero	10	20	30
Visc. do polímero	10cp	20cp	40cp
Vazão de Água	25m <sup>3</sup> /dia	50m <sup>3</sup> /dia	75m <sup>3</sup> /dia

## 2.4. Ferramentas computacionais

Criou-se um reservatório baseado nas características dos reservatórios de petróleo real, para que fosse possível a criação deste reservatório utilizou-se os módulos desenvolvidos pela CMG (Computer Modelling Group): WINPROP, BUILDER, STARS que são utilizados para simular o fluxo dos reservatórios. As simulações nesse programa têm como dados de entrada a configuração da malha e o modelo físico, que consistem nas características do meio (propriedades físicas da rocha-reservatório); propriedades dos fluidos e condições de contorno (descrição das fronteiras do reservatório); processo de recuperação (método, quantidade, orientação, distribuição e atribuições dos poços) e condições iniciais. Como resultado, obtém-se a partir da interação desses fatores, por exemplo, a produção e vazão de óleo e água em cada poço produtor, além de outros dados.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Análise das interações

Cada efeito foi analisado para entender se a mudança desde os níveis inferiores até os superiores resultam em um aumento ou em uma diminuição do valor da produção acumulada, avaliou-se



através do digrama de Pareto a significância linear (L) dos parâmetros e das interações entre os mesmos. Os diagramas foram realizados para a produção em 5, 10 e 15 anos de projeto com a injeção de polímeros. A Figura 1 apresenta os digramas para os quatro parâmetros analisados tendo a produção acumulada de óleo como a variável de resposta. No diagrama, o valor apresentado ao lado da barra resulta da divisão da média das respostas nos níveis analisados pelo erro padrão. Quando este valor é positivo significa que, com uma mudança do nível mínimo ao máximo da variável analisada há um incremento da resposta, da mesma forma, um valor negativo referente a um parâmetro analisado, significa que tal variável contribui no sentido de diminuir o valor esperado para a resposta analisada, que neste caso é a produção acumulada. São considerados resultados estatisticamente significativos ao nível de 95 % de confiança, os fatores cujas barras extrapolam a linha divisória ( $p = 0,05$ ).

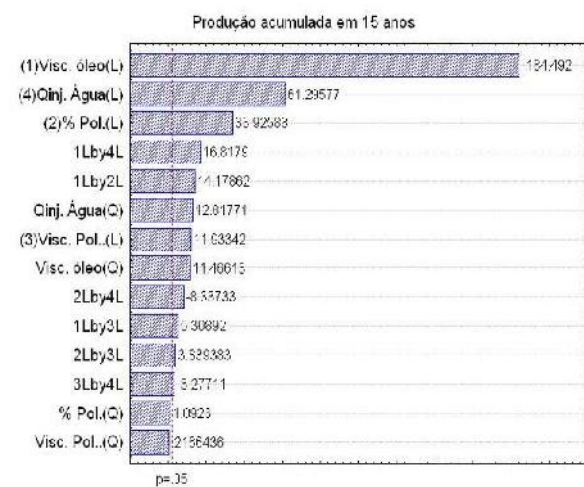
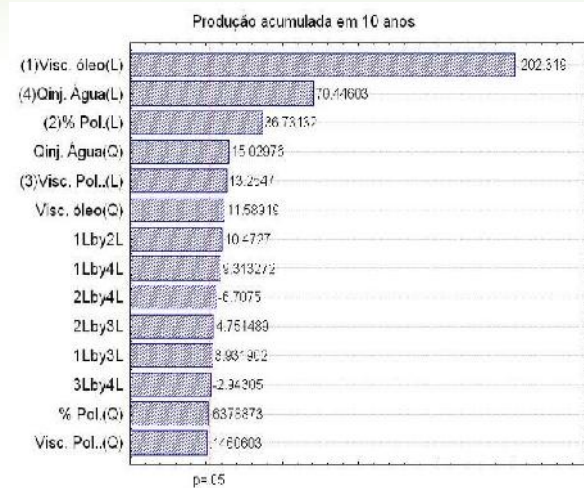
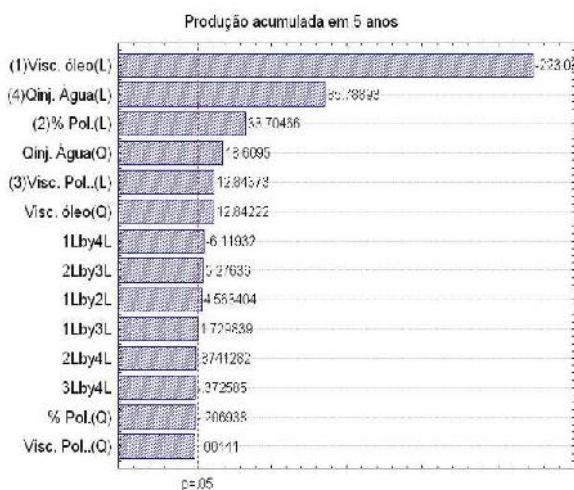


Figura 1: Diagrama de Pareto para a produção acumulada em 5, 10 e 15 anos.

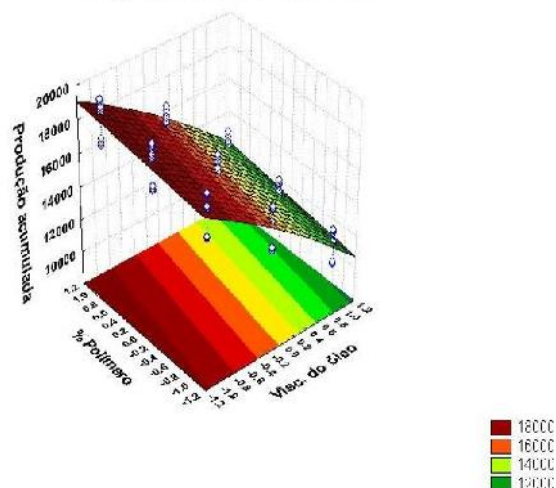
A viscosidade do óleo (Visc. óleo) foi o parâmetro individual que mais contribuiu estatisticamente para a produção de óleo no método estudado. Neste caso, o aumento da viscosidade promove uma diminuição na variável resposta em 20 anos. A vazão de injeção de água (Qinj. Água) foi o segundo parâmetro que mais influenciou estatisticamente na produção de óleo. Observa-se que um incremento da vazão de injeção no intervalo estudado promove um aumento na produção acumulada. A porcentagem do polímero (% pol) foi o terceiro fator mais influente na recuperação do óleo, visto que esse, mesmo em pequenas concentrações, aumenta a eficiência de varrido pela redução da mobilidade do fluido injetado.



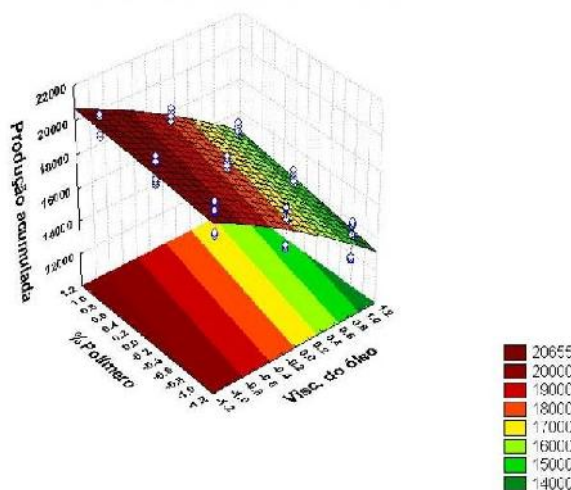
A viscosidade do polímero (visc. Pol) aparece como parâmetro que menos influencia significativamente na recuperação do óleo residual comparado aos outros parâmetros estudados.

Nos diagramas de Pareto apresentados na Figura 1, é possível observar que existem parâmetros lineares (L) e quadráticos (Q). Esses termos quadráticos não são analisados como um aumento ou diminuição da variável resposta, porque devido ao fato de serem quadráticos, os resultados das mudanças dos efeitos dentro da variável quadrática são sempre positivos e são responsáveis pela curvatura na superfície de resposta. A técnica de superfícies de resposta foi utilizada para analisar a influência das interações entre dois parâmetros de modo a identificar a máxima e mínima resposta sobre a produção de óleo em 5, 10 e 15 anos de produção. As superfícies de resposta apresentadas são as mais representativas da análise de sensibilidade, e estão em concordância com os resultados do diagrama de Pareto. Os parâmetros operacionais que não estão sendo analisados foram mantidos no ponto intermediário. As superfícies de resposta foram analisadas somente para as interações entre parâmetros que de acordo com o diagrama de Pareto apresentaram significância estatística. A Figura 2 mostra as superfícies de resposta para a interação entre os parâmetros % de polímero vs. Viscosidade do óleo em 5 anos, 10 anos e 15 anos de projeto.

Produção acumulada em 5 anos



Produção acumulada em 10 anos



Produção acumulada em 15 anos

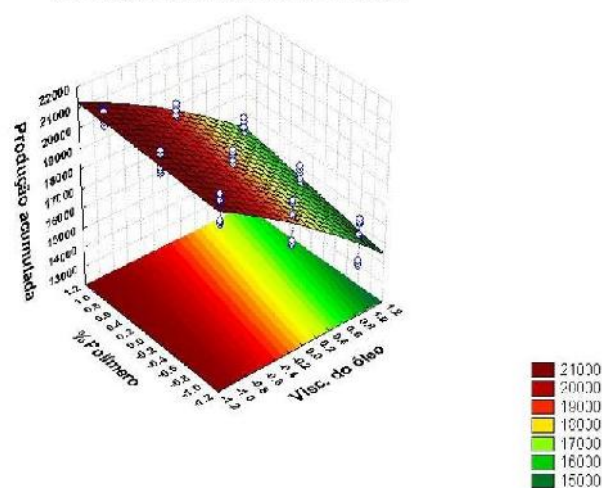
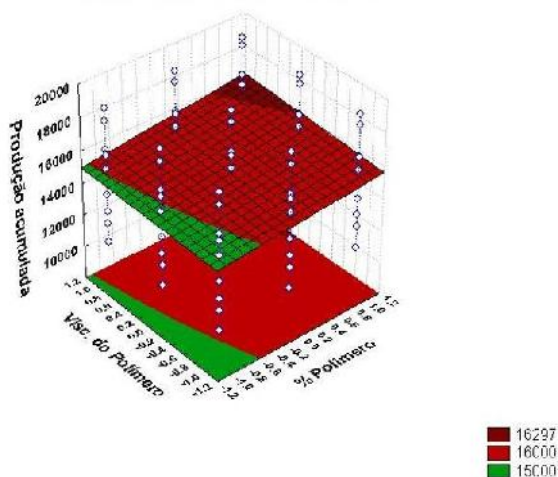


Figura 2: Superfície de resposta: % de polímero vs. viscosidade do óleo em 5 anos, 10 anos e 15 anos

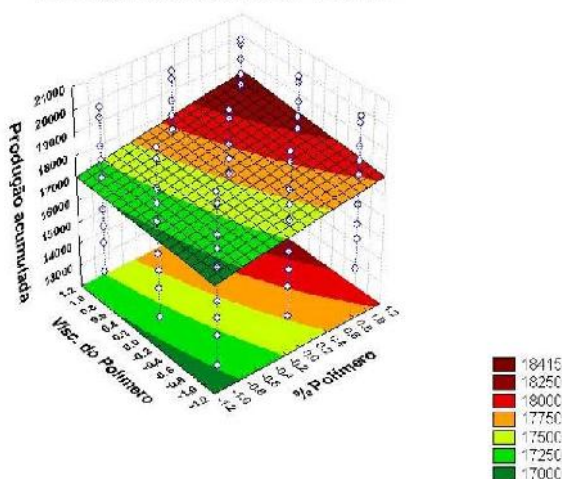


Analisando a Figura 2 que mostra as superfícies de resposta para a interação entre os parâmetros % de polímero e viscosidade do óleo em 5, 10 e 15 anos, observa-se um comportamento semelhante nos três períodos de produção de óleo, indicando que a área de maior produção é obtida quando se injeta maiores porcentagens de polímeros quando é utilizado um óleo de baixa viscosidade. A Figura 3 mostra as superfícies de resposta para a interação entre os parâmetros viscosidade do polímero vs. % do polímero em 5 anos, 10 anos e 15 anos de projeto.

Produção acumulada em 5 anos



Produção acumulada em 10 anos



Produção acumulada em 15 anos

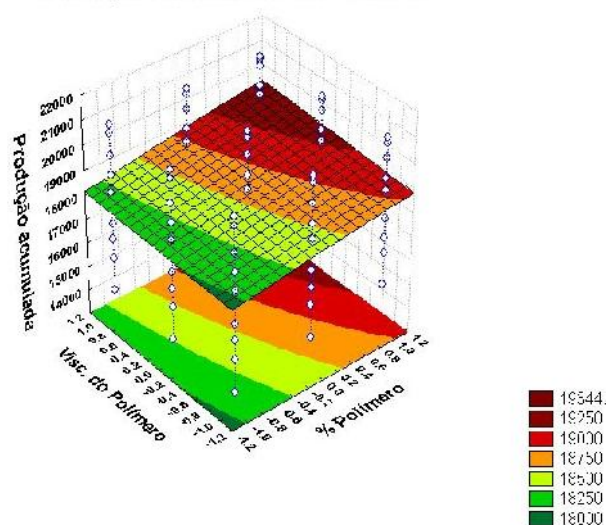


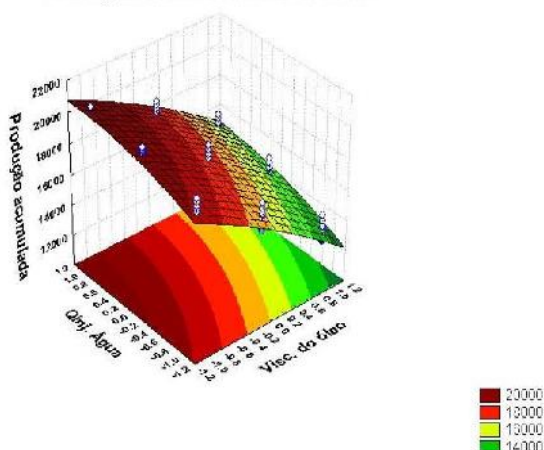
Figura 3: Superfície de resposta: viscosidade do polímero vs. % de polímero em 5 anos, 10 anos e 15 anos.

A Figura 3 mostra as superfícies de resposta para a interação entre a viscosidade do polímero e a % de polímero utilizados nos estudos. Observa-se nas superfícies de resposta que a interação entre estes parâmetros em 5 anos de projeto ainda não é definida, porém em 10 e 15 anos de projeto esta interação ocorre, indicando que maiores produções de óleo ocorrem para viscosidades altas de polímeros e altas porcentagens de polímero utilizadas.

A Figura 4 mostra as superfícies de resposta para a interação entre os parâmetros vazão de água vs. viscosidade do óleo em 10 anos e 15 anos de projeto.



Produção acumulada em 10 anos



Produção acumulada em 15 anos

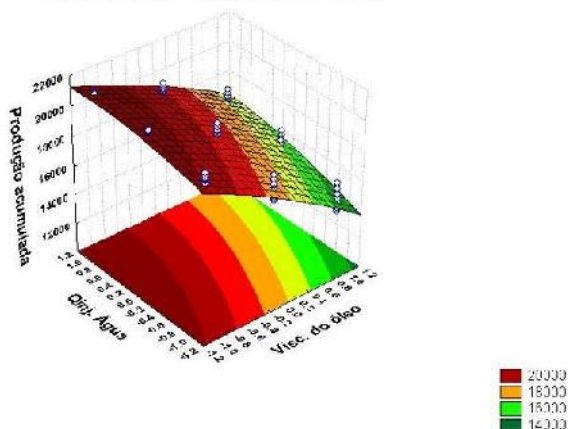
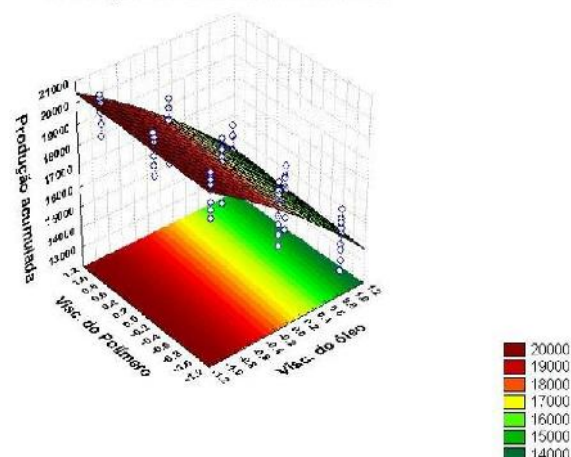


Figura 4: Superfície de resposta: vazão de água vs. viscosidade do óleo em 10 anos e 15 anos de projeto.

A Figura 4 mostra as superfícies de resposta para a interação entre a vazão de água e a viscosidade do óleo, que ocorrem em 10 e 15 anos do projeto, nos períodos analisados, e apresentam comportamento semelhante nos dois períodos, mostrando que maior produção de óleo acontece quando se injeta maiores vazões de água para baixas viscosidades de óleo. A Figura 5 mostra as superfícies de resposta para a interação entre os parâmetros vazão de água vs. viscosidade do óleo em 10 anos e 15 anos de projeto.

Produção acumulada em 10 anos



Produção acumulada em 15 anos

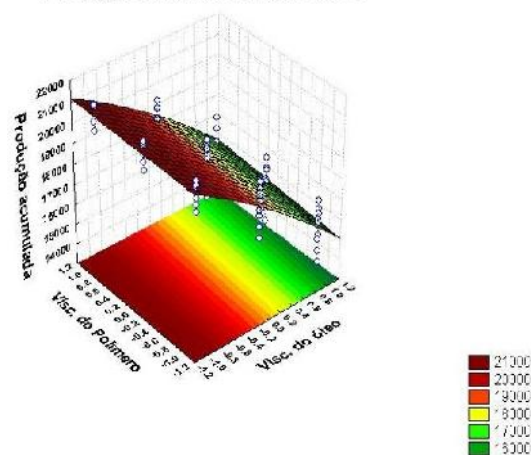


Figura 5: Superfície de resposta: viscosidade do polímero vs. viscosidade do óleo em 10 anos e 15 anos.

As superfícies de resposta da Figura 5 mostram a interações entre a viscosidade do polímero e a viscosidade do óleo que ocorrem em 10 e 15 anos de projeto, nos períodos analisados, e mostram que as maiores produções de óleo acontecem quando são utilizadas maiores viscosidades de polímero e baixas viscosidades de óleo.

As regiões de máxima resposta da superfície de resposta são representadas pelas áreas em vermelho, enquanto as verdes estão associadas aos níveis de parâmetros que apresentam os menores valores para a variável considerada.





#### 4. CONCLUSÕES

O estudo dos parâmetros de reservatório neste modelo permitiu observar que as variáveis estudadas como: concentração do polímero, viscosidade do polímero, viscosidade do óleo e vazão de água injetada tem influência na produção acumulada do óleo e dependendo da interação entre elas podem aumentar ou diminuir a recuperação de óleo. Todos os parâmetros analisados mostraram influência significativa no que diz a respeito ao aumento da produção do óleo. A viscosidade do óleo foi o parâmetro individual que mais contribuiu estatisticamente para um incremento na produção de óleo. A vazão de água foi o segundo parâmetro que teve significância estatística para o incremento da produção, indicando que maiores vazões de água, resultaram em maiores produções de óleo. A porcentagem de polímero, mesmo em pequenas concentrações aumentou de forma significativa a eficiência do varrido no reservatório e a viscosidade do polímero aparece com parâmetro que menos contribuiu estatisticamente para o incremento na produção de óleo.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Ao PPGCEP - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo e ao LEAP – Laboratório de Estudos Avançados de Petróleo e a CMG - Computer Modelling Group

#### 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS NETO, B. *Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria*, 2ª ed. Editora da Unicamp, Campinas, SP, 2003.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R. E. *Como fazer experimentos*. 3ª Edição, Editora da UNICAMP, 2007.

CHANG, H.L., “Polymer flooding technology yesterday, today and tomorrow”, *SPE Journal*, SPE 7043, v.30, n.8, pp. 1113-1128 , Ago. 1978.

NEEDHAM, R. B. and DOE, P. H. , Polymer flooding review, **Journal of Petroleum Technology** 39, SPE-17140, p. 1503–1507, Dezembro de 1987.

ROSA, A. J., CARVALHO, R. S., XAVIER, J.A.D., **Engenharia de Reservatórios de Petróleo**, Editora Interciência, 2006.

TEIXEIRA, R. A., **Reologia e Teste de Deslocamento de Soluções Poliméricas com Potencial de Uso em Recuperação Avançada de Petróleo**. Universidade Salvador, 18 de março de 2005, Dissertação (Mestrado).