



PTR-0402



Métodos especiais de recuperação suplementar



Métodos térmicos



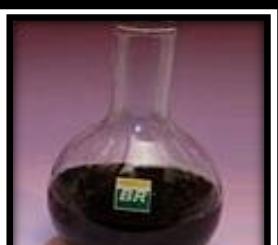
Prof. Dr. Marcos Allyson Felipe Rodrigues

Introdução





Óleos Pesados

- 
- Óleos pesados contêm proporções maiores de componentes residuais (elevado percentual de cadeias carbônicas mais complexas), não destiláveis, que os óleos convencionais.
 - Estes resíduos contêm grandes proporções de asfaltenos, que os tornam particularmente viscosos e, por esse motivo, torna difícil a sua extração.
 - A densidade do petróleo é uma importante propriedade física . Na Indústria do Petróleo, utiliza-se a expressão °API. Segundo a ANP:

Óleo leve → °API ≥ 31,1

Óleo médio → $22,3 \leq ^\circ API < 31,1$

Óleo pesado → $12 < ^\circ API < 22,3$

Óleo extrapesado e betumes → $^\circ API \leq 12$





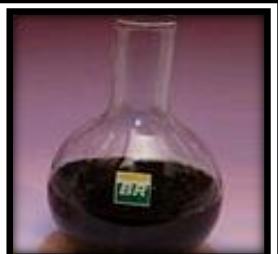
Óleos Pesados

- As equações abaixo relacionam o °API com a densidade do óleo:

$$^{\circ} API = \frac{141,5}{\gamma_o} - 131,5$$

$$\gamma_o = \frac{141,5}{131,5 + ^{\circ} API}$$

- A densidade do óleo γ_o está definida nas condições padrão dos Estados Unidos da América (14,7 psia e 60 °F).





Aspectos Teóricos - Óleos Pesados no mundo

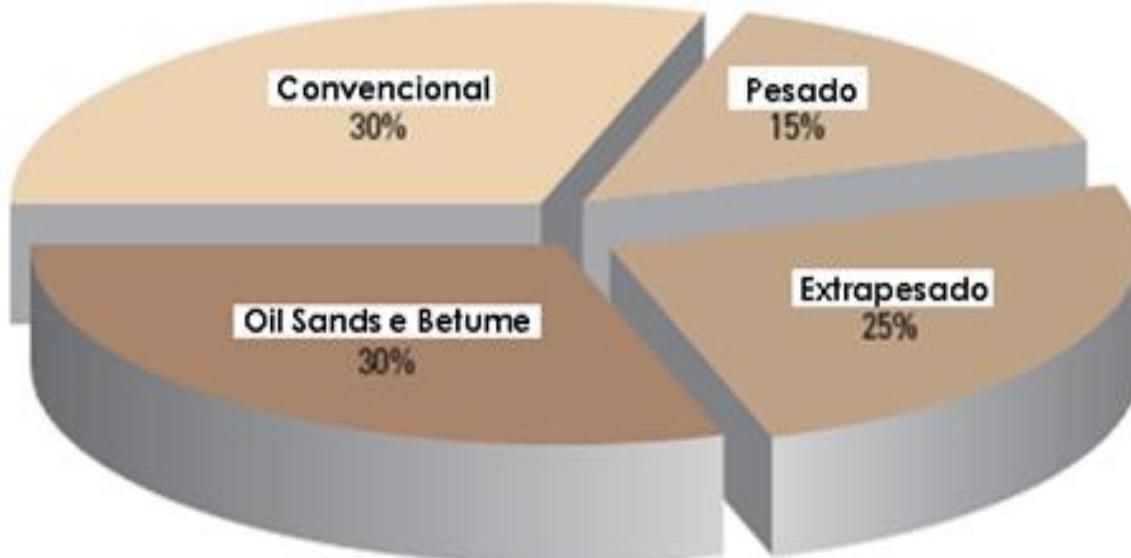


Figura 1. Distribuição das reservas mundiais de petróleo (Alboudwarej, 2007)



Aspectos Teóricos - Óleos Pesados no Brasil

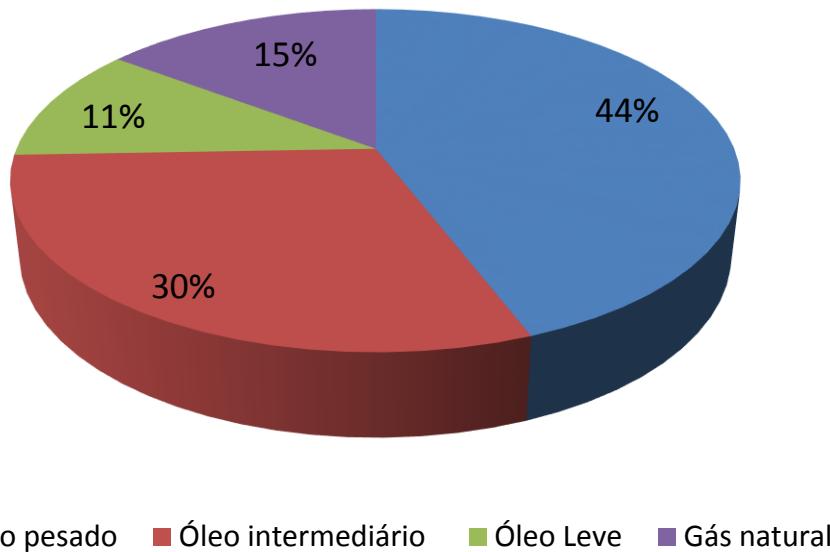
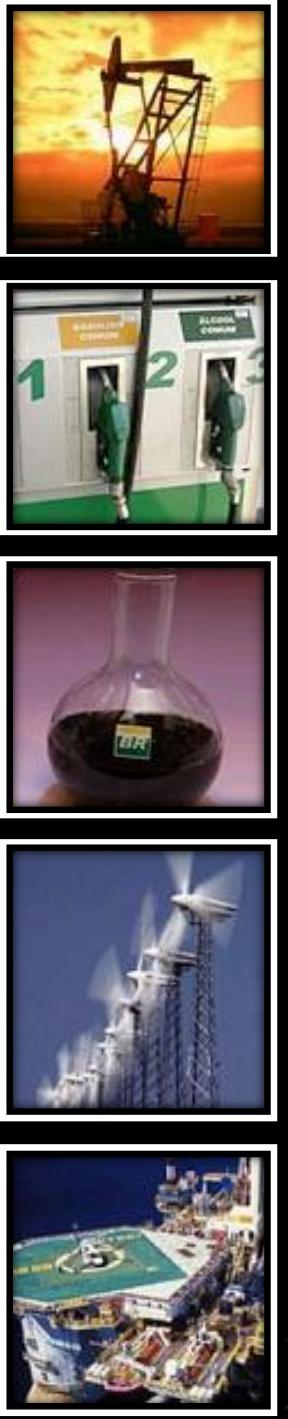


Figura 2. Distribuição das reservas de petróleo no Brasil (Adaptado de Rachid, 2005)

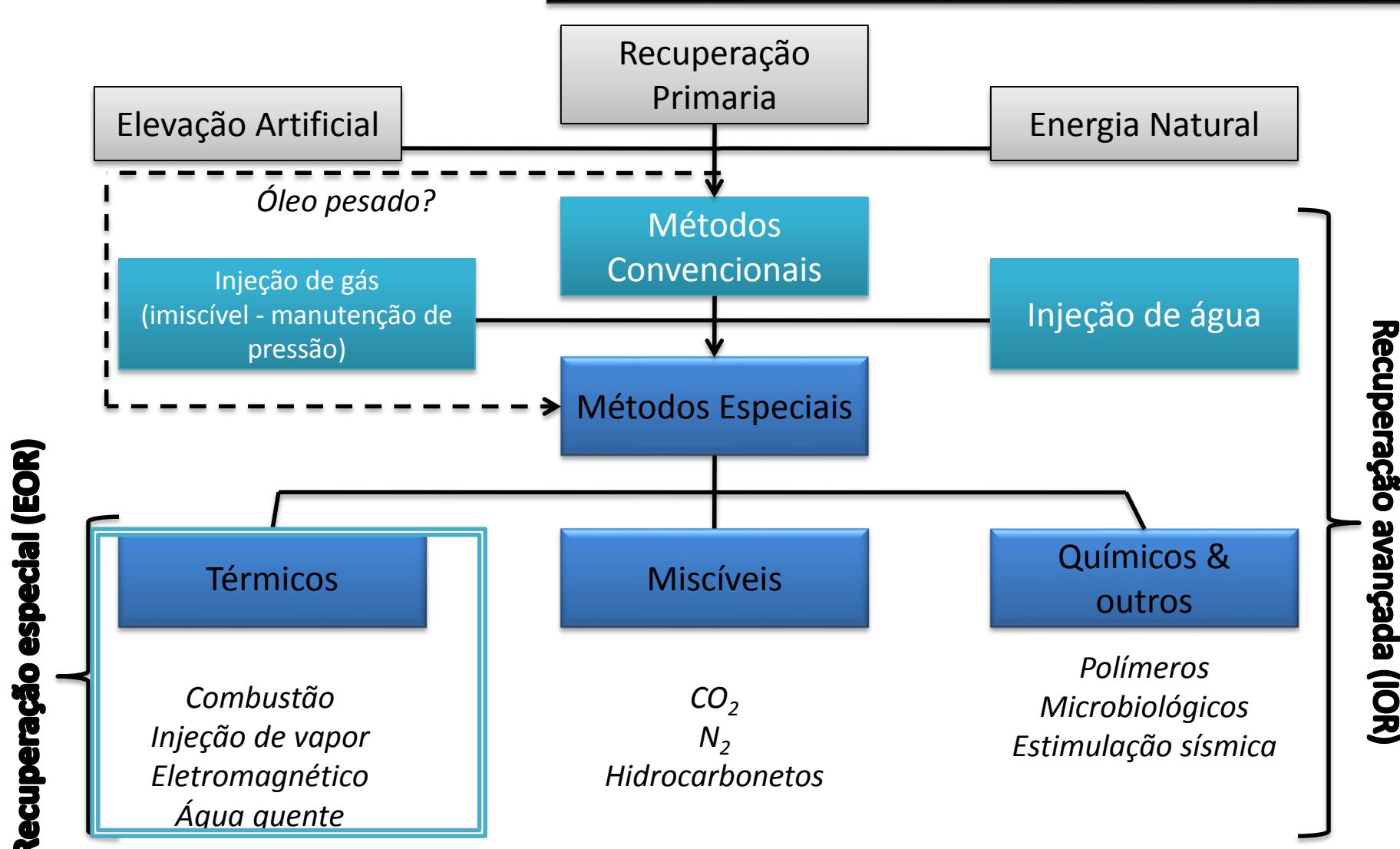


Aspectos Teóricos - Óleos Pesados no RN



Figura 3. Vaporduto no Campo de Estreito

Aspectos Teóricos – Métodos de Recuperação Avançada





Propriedades térmicas de sólidos e líquidos

Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor

A transferência de calor é o movimento de energia térmica de um local para outro.

- **Calor sensível** – é a energia térmica que pode ser sentida, que provoca uma variação de temperatura nos corpos.
- **Calor latente** – é a energia térmica associada com a mudança de fase de uma matéria (muda a estrutura física dos corpos).

Maneiras nas quais a energia térmica é transportada:

- **Radiação** – Transmissão de energia eletromagnética da superfície de um material no estado de vibração molecular.
- **Condução** - é um modo do fenômeno de transferência térmica causado por uma diferença de temperatura entre duas regiões em um mesmo meio ou entre dois meios em contato no qual não se percebe movimento global da matéria na escala macroscópica.
- **Convecção** – É a transferência de energia térmica através do movimento de fluido dentro de uma região de diferente temperatura.



Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Condução



Durante a injeção de vapor, a condução térmica é responsável pelas perdas de calor para as camas sub e sobrejacentes. Pode ser importante também dentro do reservatório quando a velocidade do fluido é baixa.

$$Q = -K \cdot A \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)$$



Onde:

Q = Fluxo de calor (w ou Btu/h)

K = Condutividade térmica (W/m°C ou Btu/h ft°F)

A = Área transversal, normal à direção x (m² ou ft²)

T = Temperatura (°C ou °F)



x = distância ao longo da direção de transferência de calor (m ou ft)

Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Convecção

É o transporte de energia térmica através do movimento do fluido dentro de uma região de diferente temperatura..

- Convecção forçada – Ocorre quando o movimento de fluido é induzido por uma força externa(Ex. Injeção de vapor).
- Convecção natural – Ocorre quando o gradiente de temperatura no fluido causa diferença de densidade, a qual induz recirculação dentro do fluido.

$$Q = \delta \cdot A \cdot (T_f - T_s)$$

Onde:

Q = Transferência de calor entre o líquido e o sólido. (w ou Btu/h)

δ = coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m².°C ou Btu/h.ft².°F)

A = Área de superfície de transferência de calor (m² ou ft²)

T_f = Temperatura do fluido (°C ou °F); T_s = temperatura do sólido (°C ou °F)

Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor

fluido	δ (Btu/h.ft ² .°F)
Vapor	100 a 3000
água	50 a 3000
Óleo	1 a 300

Em injeção de vapor em reservatórios, uma forma diferente de convecção também ocorre, que é o transporte de energia térmica (calor sensível e calor latente) através do meio poroso por um fluxo de fluido.



Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



↳ Condutividade térmica



Expressa a capacidade de um material de transmitir uma unidade de energia térmica (J ou Btu) em uma unidade de tempo (s ou h) por uma unidade de área (m^2 ou ft^2) quando uma unidade de diferencial de temperatura ($^{\circ}C$ ou $^{\circ}F$) é imposta através de uma unidade de espessura.

$$K_h = \frac{qL}{A(\Delta T)} = \frac{Btu}{hr \cdot ft \cdot ^{\circ}F}$$


$$1 \text{ W/m}^{\circ}\text{C} = 0,5778 \text{ Btu/h ft } ^{\circ}\text{F} = 0,002388 \text{ cal/s cm } ^{\circ}\text{C}$$

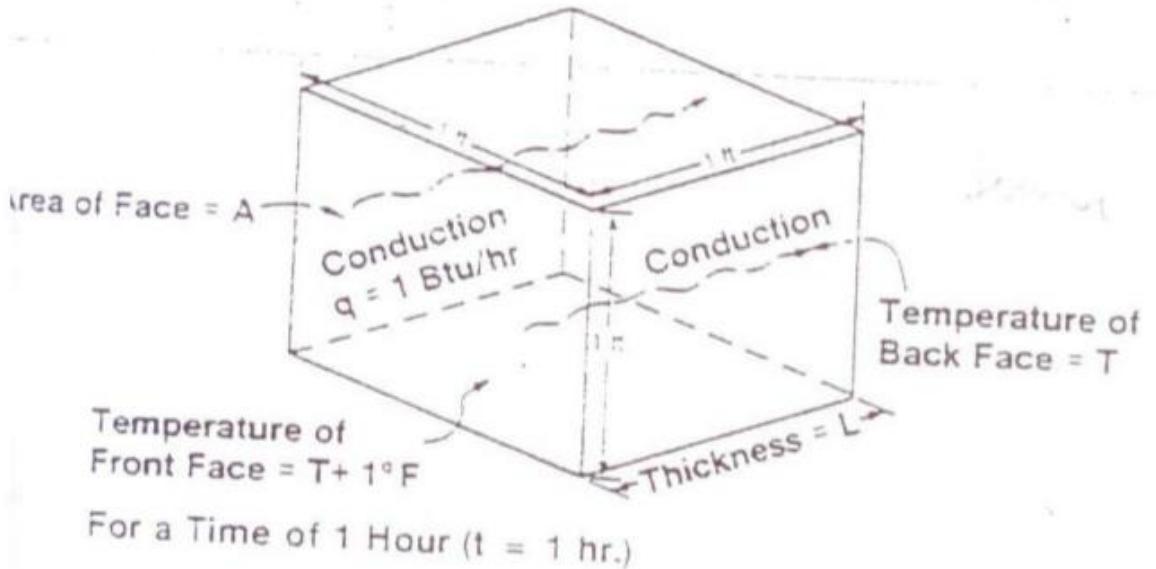




Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Conduvidade térmica



$$K_h = \frac{qL}{A(\Delta T)} = \frac{\text{Btu}}{\text{hr} - \text{ft} - {}^{\circ}\text{F}}$$

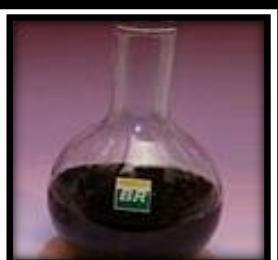
$$1 \text{ W/m}^{\circ}\text{C} = 0,5778 \text{ Btu/h ft } {}^{\circ}\text{F} = 0,002388 \text{ cal/s cm } {}^{\circ}\text{C}$$



Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Condutividade térmica em areias oleíferas inconsolidadas

- 
- ↳ A condutividade térmica da rocha do meio poroso depende da mineralogia dos grãos, da cimentação, da saturação de fluido, do tipo de fluido, da temperatura, da pressão e da porosidade.
 - ↳ A condutividade térmica dos grãos de areia depende de sua composição. Em particular, o quartzo tem a maior condutividade térmica entre os componentes, e como consequência, a condutividade média é fortemente determinada pelo conteúdo de quartzo.
- 
- 



Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Condutividade térmica em areias oleíferas inconsolidadas



Condutividades térmicas de minerais componentes de rochas (Cermak e Ryback)

Condutividade térmica à temperatura Ambiente (W/m °C)
Quartzo 7,69
Chert (Silex) 4,53
Flint (Silex) 3,71
Sílica (Vítrea) 1,36
Calcita 3,57
Dolomita 5,50
Feldspato 2,3-2,5



Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Condutividade térmica em areias oleíferas inconsolidadas



Somerton, Keese, Chu descobriram que a condutividade térmica média (sem poros) pode ser estimada pela equação abaixo:

$$K_{hm} = 2,86 + 4,86G$$



Onde:

K_{hm} = condutividade térmica média da matriz, W/m °C.

G = é a fração de volume de quartzo no sólido.



A condutividade térmica do reservatório poroso é menor que a calculada pela equação acima porque os poros são preenchidos com fluidos tendo condutividades térmicas mais baixas que a dos grãos de areia.



Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Condutividade térmica em areias oleíferas inconsolidadas

Somerton et al. Desenvolveram a seguinte equação para estimar a condutividade térmica de reservatórios portadores de óleo como função da natureza dos grãos, da porosidade, e da saturação de água.

$$K_{hr} = 1,273 - 2,25\phi + 0,390K_{hm} \cdot S_w^{0,5}$$

Onde:

K_{hr} = é a condutividade térmica da composição de materiais, em W/m°C.

K_{hm} = condutividade térmica média do material granular, estimada pela equação do slide anterior.



Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Condutividade térmica em areias oleíferas inconsolidadas

Exercício Estime as condutividades térmicas das situações da tabela abaixo para dois reservatórios de óleo, cada um tendo uma porosidade de 35%. Em um caso, o reservatório é assumido como quartzo puro e no outro com 30%.

Saturação de água	Condutividade térmica W/m °C	
	100% de quartzo	30% de quartzo
0,21		
0,4		
0,6		
0,8		
1,0		



Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Condutividade térmica de rochas consolidadas

São maiores que aquelas de rochas inconsolidadas por causa da natureza da rocha matriz.





Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Condutividade térmica do óleo

A condutividade térmica de hidrocarbonetos líquidos pode ser estimada pela correlação de Biand e Davidson conforme a equação:

$$K_{ho} = \frac{0,117}{d} \cdot (1 - 0,00054 \cdot T)$$



Onde:

K_{ho} = condutividade térmica do óleo, em W/m°C

d = densidade relativa do óleo, à 60/60°F

T = temperatura, em °C





Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Condutividade térmica da água

A condutividade térmica da água no seu ponto de ebulação pode ser estimada por:

$$K_{hw} = 0,57 + 1,69 \cdot 10^{-3}T - 6,01 \cdot 10^{-6}T^2$$



Onde:



K_{hw} = condutividade térmica da água, em W/m°C

T = temperatura de 0 a 300, em °C





Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Condutividade térmica da materiais diversos

	Gás (1 atm)	Líquido	Sólido
Hidrogênio	0,179		
Hélio	0,143		
Nitrogênio	0,024		
Água	0,024	0,60	2,22
Metano	0,033		
Propano	0,017	0,08	
Tolueno		0,14	
Prata			419
Cobre			389
Alumínio			201
Aço			46
Madeira			0,1 – 0,2
Rocha			1,8
Vidro (Pirex)			1,1
Materiais de Isolamento			0,02 – 0,12





Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Capacidade calorífica



Expressa a quantidade de energia térmica que deve ser adicionada para elevar a temperatura de um corpo. É a quantidade de energia térmica (J ou Btu) necessária para elevar a temperatura em uma unidade ($^{\circ}\text{C}$ ou $^{\circ}\text{F}$) em um corpo de uma unidade de massa (Kg ou lb).



Quanto maior a capacidade calorífica, mais o corpo necessita de calor para que sua temperatura seja incrementada.





Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Capacidade calorífica de arenitos



A capacidade calorífica de arenitos pode ser obtida pela correlação de Cassis, conforme a seguinte equação:

$$C_{rs} = 0,715 + 0,00170 \cdot T - 1,908 \cdot 10^{-6} T^2$$



Onde:

C_{rs} = Capacidade calorífica do material da rocha, em $\text{kJ/Kg}^\circ\text{C}$

T = Temperatura de 0 a 300, em $^\circ\text{C}$





Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Capacidade calorífica de carbonatos



A capacidade calorífica de carbonatos pode ser obtida pela correlação de Cassis, conforme a seguinte equação:

$$C_{rc} = 0,823 + 0,001511 \cdot T - 1,438 \cdot 10^{-6} T^2$$



Onde:

Crc = Capacidade calorífica do carbonato, em kJ/Kg°C

T = Temperatura de 0 a 300, em °C





Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Capacidade calorífica do óleo



Dados experimentais para capacidades caloríficas de 13 óleos pesados e betumes diferentes foram publicados por Cassis et al. A média destes dados é dada por:

$$C_o = 1,605 + 0,004361 \cdot T - 4,046 \cdot 10^{-6} T^2$$



Onde:

C_o = Capacidade calorífica do óleo, em kJ/Kg°C

T = Temperatura de 0 a 300, em °C





Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Capacidade calorífica da água

A capacidade calorífica da água na fase líquida nas condições de saturação pode ser representada, com excelente aproximação, pelas equações seguintes:

$$10^{\circ}\text{C} \leq T \leq 240^{\circ}\text{C}$$

$$C_w = 4,182 - 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot T + 3,44 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 4,26 \cdot 10^{-8} \cdot T^3$$

$$300^{\circ}\text{C} \geq T \geq 240^{\circ}\text{C}$$

$$C_w = 11,550 - 0,064518 \cdot T + 1,5087 \cdot 10^{-4} \cdot T^2$$

Onde:

C_w = Capacidade calorífica da água, em $\text{kJ/Kg}^{\circ}\text{C}$

T = Temperatura de 0 a 300, em $^{\circ}\text{C}$





Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Capacidade calorífica Volumétrica do Reservatório

A capacidade calorífica volumétrica do reservatório é calculada pela seguinte equação:

$$\rho C = (1 - \phi) \rho_s C_{rs} + \phi S_w \rho_w C_w + \phi S_o \rho_o C_o + \phi S_g \rho_g C_g$$





Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Densidade dos Fluidos e da Rocha Reservatório

- 
- À medida que o reservatório é aquecido durante a injeção de vapor, as densidades dos fluidos e da rocha mudam por causa da expansão térmica.
 - As diferenças nas densidades dos fluidos promovem a segregação gravitacional e sobrevarredura do vapor;


$$1000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ g/cm}^3 = 62,43 \text{ lb/ft}^3$$




Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Densidade da água no ponto de ebulação



A densidade da água no ponto de ebulação pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\rho_w = 1001,7 - 0,1616T - 0,00262T^2$$



Onde:



P_w = densidade da água, em Kg/m^3 na pressão de saturação
 T = temperatura no range de 10 a 290 °C



Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Densidade do óleo

Para óleos no range de 0 a 15°API, a densidade do óleo podem ser representados com certa precisão :


$$\rho_o = \rho_{o15} \left[1 - 0,06285 \left(\frac{T-15}{100} \right) + 0,001426 \left(\frac{T-15}{100} \right)^2 \right]$$



Onde:

$$\rho_{o15} = \left(\frac{141,5}{131,5 + {}^{\circ}API} \right). (999)$$

ρ_{o15} = a densidade do óleo a 15°C, em Kg/m³

T= temperatura, em °C

ρ_o = densidade do óleo, em kg/m³





Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Densidade da rocha reservatório

Valores típicos de densidades da rocha do reservatório são dadas na Tabela abaixo:



	Kg/m ³
Arenitos	2630
Carbonatos	2680





Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Viscosidade do óleo

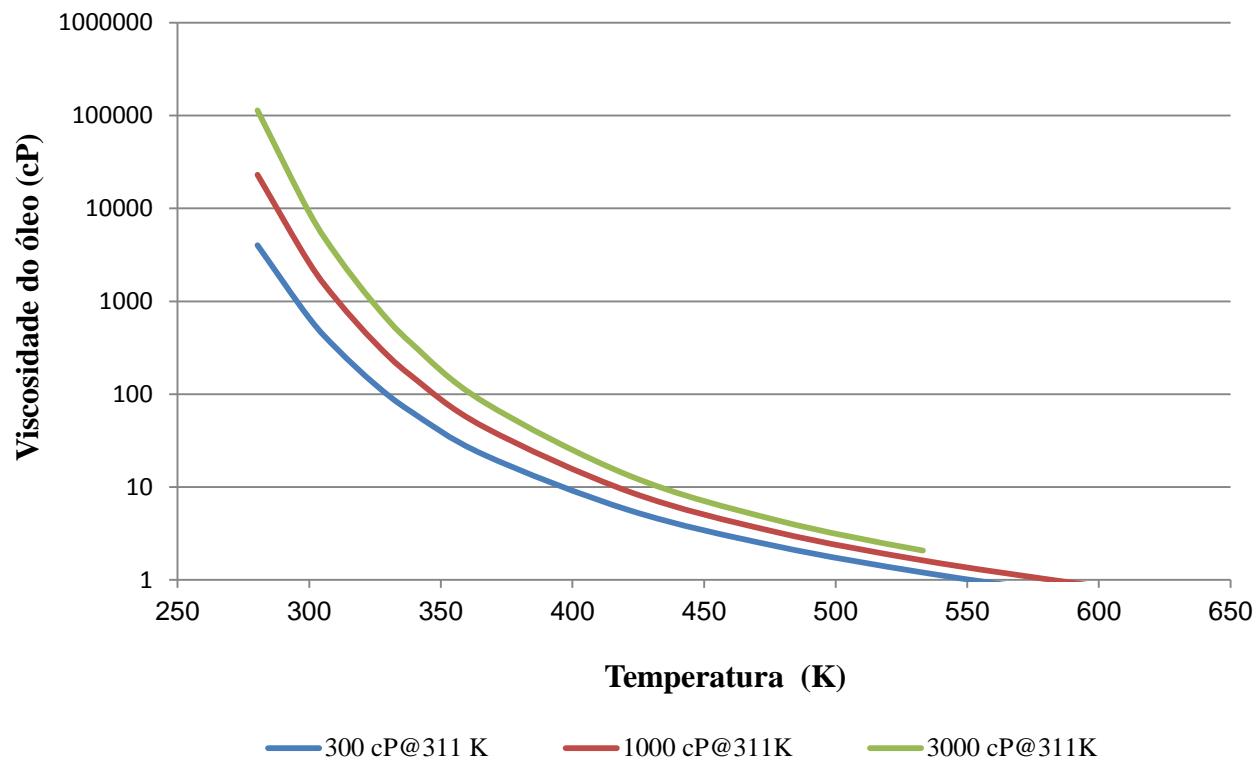
- 
- A viscosidade do óleo é fortemente dependente da temperatura;
 - A importância da viscosidade é mostrada na lei de Darcy;
 - As grandes reduções de viscosidades dos óleos pesados à elevadas temperaturas tornam este parâmetro particularmente significante na recuperação de óleo.
- 
- 



Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Viscosidade do óleo





Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Viscosidade do óleo bruto



Svrcek e Mehrotra mostraram que as viscosidades de um range de betumes podem ser representadas para temperaturas de até 13°C pela seguinte relação:

$$\log_{10}[\log_{10}(\mu + 0,7)] = b' - 3,5556 \cdot \log_{10}(T + 273)$$



Onde:

μ = viscosidade dinâmica, em cP

T= Temperatura em °C

b' = constante característica de cada óleo.

Table 2. Values of b_1 in equation (8) with $b_2 = -3.63029$.

Bitumen sample	b_1
Athabasca (GCOS)	9.7325
Athabasca (GCOS)	9.7233
Athabasca (ARC)	9.6900
Peace River (CORE)	9.7454
Peace River (PRISP)	9.6883
Monte Largo	9.6471





Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Viscosidade do vapor saturado

$$\mu_s = 0,00879 + 0,0000354T$$



Onde:



μ_s = viscosidade do vapor saturado



T= Temperatura, $90^{\circ}\text{C} < T < 300^{\circ}\text{C}$.



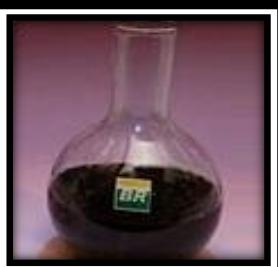
Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Viscosidade da água no ponto de ebulação

10°C < T < 100°C

$$\frac{1}{\mu_w} = 0,5462 + 0,021192T + 0,00008934T^2$$



100°C < T < 300°C

$$\frac{1}{\mu_w} = 0,040079T + 0,4997$$



Onde:

μ_w = viscosidade da água, em cP.



Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Propriedades termodinâmicas do vapor

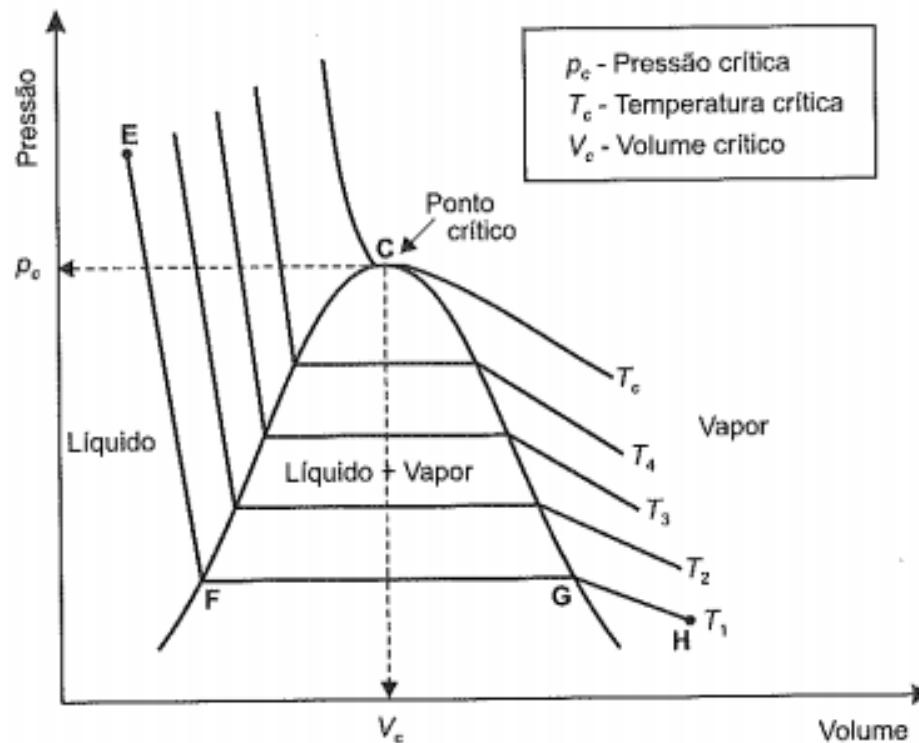
- Quando o vapor é injetado no reservatório, o calor é liberado à medida que o vapor se condensa em água
 - O calor liberado por esta mudança de fase é chamado calor latente do vapor
- 
- 
- 



Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Propriedades termodinâmicas do vapor – comportamento de fase do vapor





Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor

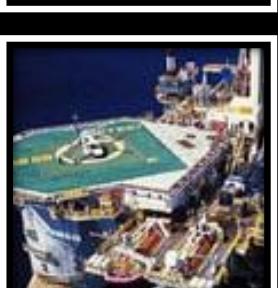


Propriedades termodinâmicas do vapor – Pressão de saturação



A pressão de saturação de vapor correspondente à uma temperatura $T(^{\circ}\text{C})$ pode ser calculada pela seguinte equação de Sanford Moss.


$$100^{\circ}\text{C} < T < 275^{\circ}\text{C}$$


$$\log_{10} P = 9,8809 - \left[2,42223 + \frac{326,57}{T + 273,15} \right]^2$$


$$275^{\circ}\text{C} < T < 374,2^{\circ}\text{C}$$


$$\log_{10} P = 4,4988 - \left[\frac{2043}{T + 273,15} \right]^2$$



Propriedades térmicas - Transferência de calor durante o processo de injeção de vapor



Propriedades termodinâmicas do vapor – Entalpia



Entalpia é a medida de conteúdo de calor de um fluido



Em campos de óleos pesados, é empregado vapor saturado, molhado.



A entalpia do vapor de qualidade f_s pode ser calculada:

$$H_s = (1 - f_s)H_L + f_s H_v$$

Onde:

H_s = entalpia do vapor, em kJ/kg ou Btu/lb

H_L = entalpia da fase líquida, em kJ/kg ou Btu/lb

H_v = entalpia da fase vapor, em kJ/kg ou Btu/lb

F_v = qualidade do vapor, em fração em peso



Injeção de água quente



Injeção de água quente - Introdução

- 
- Com poucas mudanças no equipamento, a injeção de água pode ser estendida a uma técnica térmica por aquecimento da água injetada;
 - A eficiência é aumentada pela melhora da eficiência de varrido e expansão térmica do óleo;
- 
- 
- 



Injeção de água quente - Desvantagens

- 
- Devido a baixa quantidade de calor da água aquecida, um reservatório típico requer 2,5 a 3 volumes porosos de água para elevar sua temperatura até um valor próximo da água injetada;
 - O água carreia menos calor por unidade de massa e, por ter maior viscosidade, geralmente resulta em vazões de injeção menores que as da injeção de vapor ;
 - Diferentemente de um sistema vapor-água, a água esfria quando perde energia, resultando em um crescimento lento da zona de alta temperatura em torno do poço injetor;
- 
- 
- 



Injeção de água quente – Mecanismos de deslocamento

- 
- Melhora da mobilidade do óleo resultante da redução da viscosidade;
 - Redução da saturação de óleo residual a altas temperaturas;
- 





Injeção de água quente – Deslocamento

- 
- Quando se injeta água em um meio poroso linear isotérmico, o cut de água é dada pela equação do fluxo fracionário:

$$f_w = \frac{1}{1 + \frac{k_o}{k_w} \frac{\mu_w}{\mu_o}}$$

- 
- Obtém-se a seguinte equação de fluxo fracionário a quente, a partir do fluxo a frio e da relação entre viscosidades;

$$f_{w2} = \frac{f_{w1}}{f_{w1} + F_\mu (1 - f_{w1})}$$





Injeção de água quente – Deslocamento

- 
- ◆ Cuja derivada com relação à S_w é:


$$\frac{df_{w2}}{dS_w} = f'_2 = \frac{F_\mu f'_{w1}}{\left[f_{w1} + F_\mu (1 - f_{w1}) \right]^2}$$



Injeção Cíclica de vapor



Injeção cíclica de vapor - Introdução

- 
- Este método de recuperação foi descoberto pela Shell na Venezuela em 1959 quando se produzia óleo pesado por injeção contínua de vapor;
 - A injeção cíclica de vapor é também conhecida como: *Huff and Puff*, *Steam soak*, estimulação de vapor, ou ainda estimulação cíclica;
 - É aplicada para reforçar a recuperação primária de reservatórios de óleos viscosos. É primeiramente uma técnica de estimulação que, através da redução da viscosidade e efeitos de limpeza ao redor do poço, ajuda à energia natural do reservatório a expulsar o óleo;
 - Geralmente é utilizado antes injeção contínua de vapor para melhorar a injetividade e antecipar o retorno financeiro do projeto de injeção.
 - A injeção é chamada de cíclica porque pode ser repetida diversas vezes onde cada ciclo consiste de três partes distintas: fase de injeção, fase de 'soaking' e fase de produção;





Injeção cíclica de vapor – Introdução



● **Fase de injeção:** Fase em que uma certa quantidade de vapor previamente calculada é injetada o mais rápido possível. Geralmente dura de 5 a 15 dias;



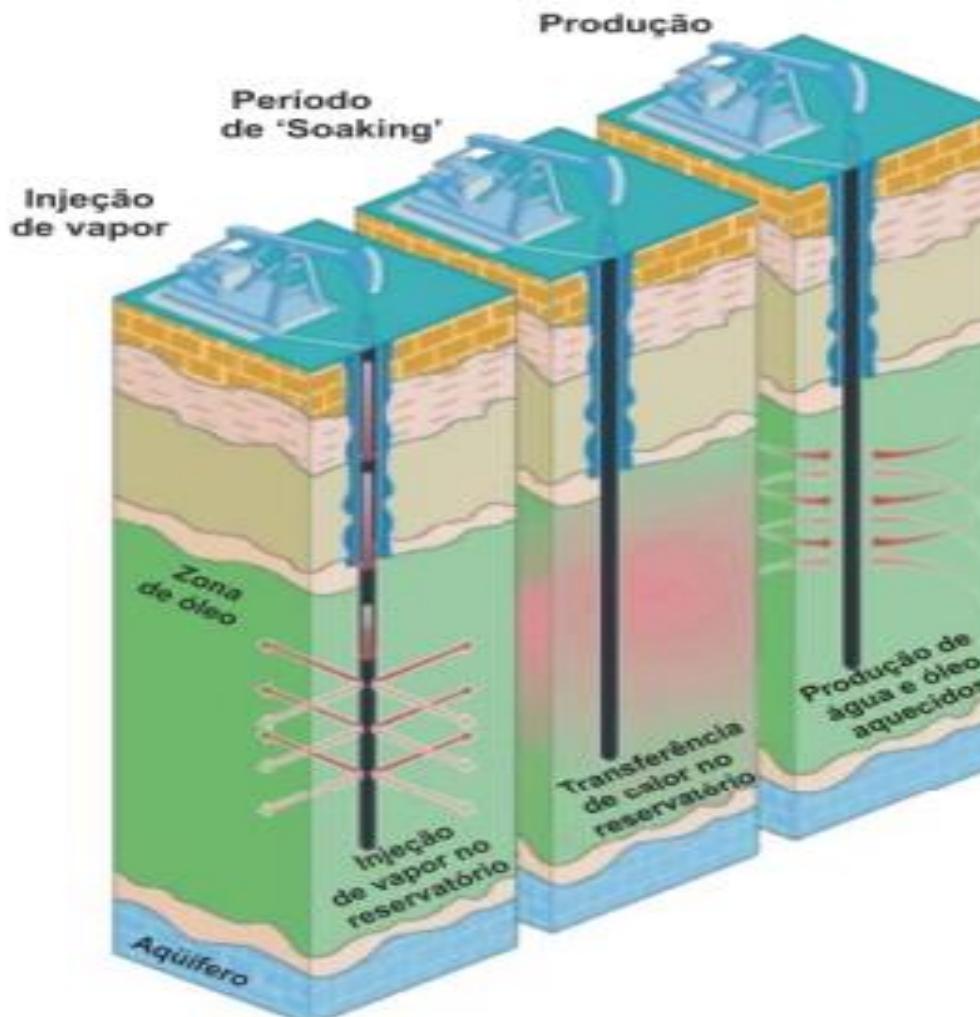
● **Fase de ‘soaking’:** Período posterior à injeção no qual o poço permanece fechado para permitir a condensação do vapor (*soaking*) e a transferência do calor latente para a rocha e para o óleo. Normalmente usa-se um fechamento de 2 a 10 dias.



● **Fase de produção:** É o período em que o poço é colocado em produção. Produz inicialmente muita água e logo em seguida vem o pique de óleo. Pode entrar em urgência se a pressão do reservatório for suficientemente alta, ou então se o período de soaking for insuficiente para condensar o vapor. Normalmente, no entanto, os poços são equipados para bombeio mecânico. O poço é recolocado em produção durante meses a anos.



Injeção cíclica de vapor - Introdução





Injeção cíclica de vapor – Mecanismos de Produção



O ciclo é repetido um número de vezes até que o limite econômico na produção seja alcançado. O calor injetado causa um aumento na temperatura do reservatório que leva a uma diminuição da viscosidade do óleo, logo a mobilidade do óleo é acentuada. O efeito da redução da viscosidade é temporário devido ao resfriamento subsequente da região aquecida com o tempo. As forças que causam a produção do óleo devem consistir da pressão do reservatório, gravidade, efeito da compactação na formação de fluidos, força do gás dentro da solução e expansão térmica.





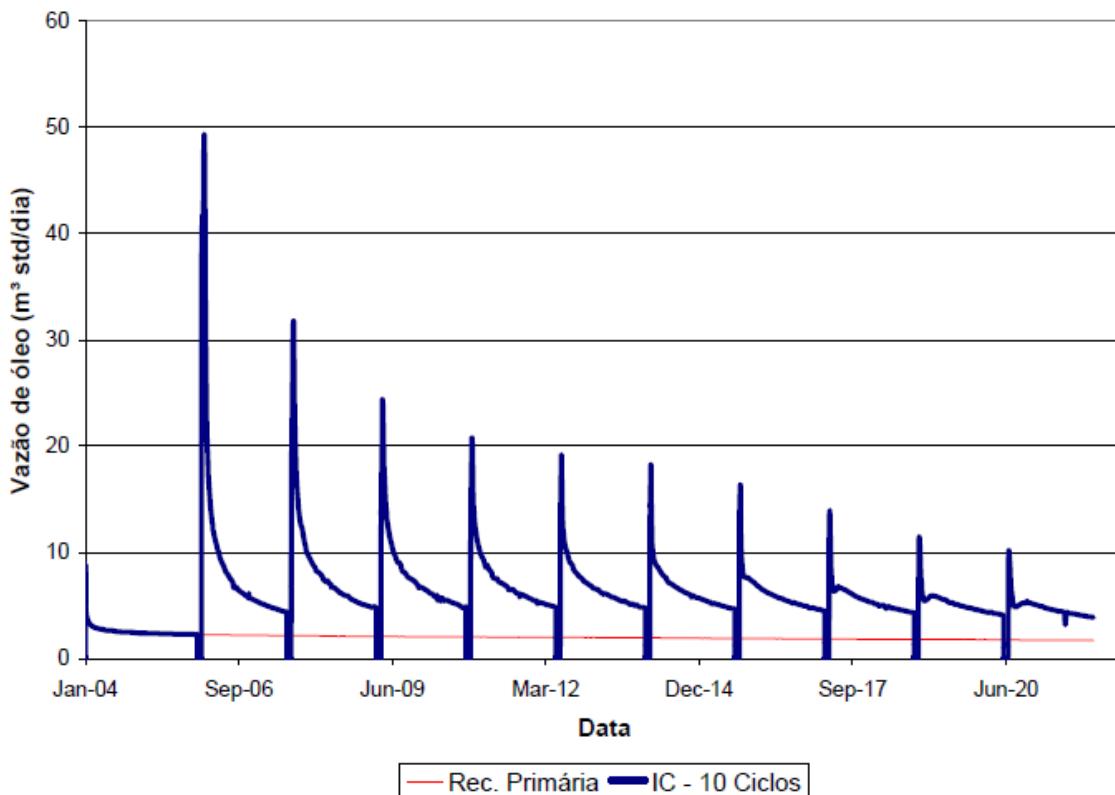
Injeção cíclica de vapor - Potencial do método

- 
- O efeito de uma estimulação é apenas antecipar a produção, já que nenhuma energia está sendo adicionada de modo permanente no sistema;
 - Observa-se que o reservatório devolve toda a água utilizada na estimulação;
 - Portanto, atribui-se a injeção cíclica o papel de aumentar o fator de recuperação primário.
- 
- 



Injeção cíclica de vapor – Durabilidade dos ciclos

- 
- Os ciclos posteriores perdem gradativamente seu rendimento. Os picos de produção, e a duração do período produtivo adquirem a forma abaixo:





Injeção cíclica de vapor – Durabilidade dos ciclos

- 
- Pode-se tentar restabelecer a força do ciclo subsequente por aumento da energia injetada.
 - Os resultados obtidos são favoráveis, mas há um limite para esse artifício;
 - O combustível consumido e o tempo gasto na injeção podem não ser compensados pelo adicional de óleo a ser produzido;
 - Os fatores que reduzem a produtividade dos ciclos sucessivos são os seguintes:
 - ❖ Depleção do reservatório;
 - ❖ Aumento da saturação de água ao redor do poço;
 - ❖ Excessiva produção inicial de água que retarda o pico de óleo;
 - ❖ Perda de calor em função da maior área aquecida.
- 
- 



Injeção cíclica de vapor – Durabilidade dos ciclos



A duração do período produtivo depende do mecanismo que foi mencionado:

- 
- Se foi apenas redução de viscosidade, o ciclo perde produção rapidamente, podendo durar de 2 a 6 meses. Geralmente acompanha a curva de queda de temperatura na cabeça;
 - Se houve remoção de dano severo, e há pressão no reservatório, o ciclo pode durar anos;
- 
- 



Injeção cíclica de vapor - Potencialização dos ciclos

- 
- A injeção simultânea em poços vizinhos, seja cíclica ou contínua, potencializa os resultados por aumento de energia interna do reservatório, podendo até duplicar a resposta de 1 ciclo;
 - Grandes projetos de injeção cíclica têm poços no local correto, pequeno espaçamento, e mais de um gerador, o que permite o esquema de injeção simultânea e interferência entre poços;
 - O número máximo de ciclos varia entre 1 e 20;
- 
- 
- 



Injeção cíclica de vapor - Energia dos ciclos

- 
- A energia a ser injetada em cada ciclo é muito variável, porque o processo é nitidamente de tentativa-e-erro;
 - Na ausência de qualquer outra informação, usa-se geralmente entre 10 e 100 toneladas de vapor por metro de espessura efetiva, o que corresponde à faixa de 20 a 200 MM BTU/metro;
- 
- 
- 



Injeção cíclica de vapor - Otimização dos ciclos

- 
- A otimização é um processo estatístico. Exige uma amostra representativa e um critério de classificação;
 - Exemplo: dois grupos de poços iguais recebem energias diferentes no mesmo ciclo. O grupo que der maior relação energia produzida/energia queimada define o tamanho ideal para aquele ciclo;
 - A amostra deve ser estatisticamente representativa;
 - A resposta a estimulação não depende só da energia injetada mas de outros fatores que interferem fortemente no processo.
- 
- 
- 



Injeção cíclica de vapor – Parâmetros que interferem nos ciclos



Parâmetros do reservatório:

- 
- Viscosidade;
 - Permeabilidade;
 - Saturação de óleo;
 - Pressão do reservatório;
 - Gás em solução.
- 





Injeção cíclica de vapor – Parâmetros que interferem nos ciclos



Parâmetros operacionais:

- 
- Título do vapor;
 - Tempo de soaking;
 - Cota de injeção;
 - Tempo de injeção..
- 
- 



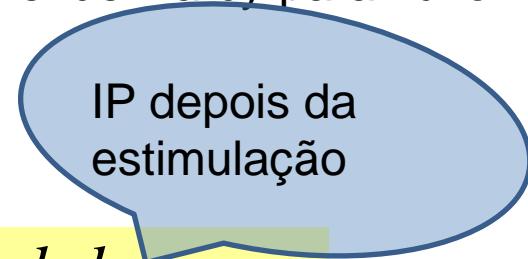
Injeção cíclica de vapor - Mudança de IP nos poços estimulados



A variação do IP em poço estimulado pode ser calculada com simples manipulações algébricas sobre a lei de Darcy para fluxo radial no estado permanente.

Sem dano e com aquecimento

$$IP = \frac{2\pi k_o h}{\mu_c \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)}$$


$$IP = \frac{2\pi k_o h}{\mu_h \ln\left(\frac{r_h}{r_w}\right) + \mu_c \ln \frac{r_e}{r_h}}$$

Onde:

R_e = raio do reservatório

R_h = raio aquecido

R_w = raio do poço

$$F = \frac{IP_{depois}}{IP_{antes}} = \frac{\ln(r_e / r_w)}{\frac{\mu_h}{\mu_c} \ln\left(\frac{r_h}{r_w}\right) + \ln\left(\frac{r_e}{r_h}\right)}$$



Injeção cíclica de vapor - Previsão de comportamento - Owens e Suter



● O método de Owen & Suster é extremamente simplificado pois baseia-se unicamente na redução de viscosidade para calcular o aumento de vazão;



● Não tem modelo de temperatura dentro do reservatório, portanto usa-se a temperatura da cabeça do poço para calcular a viscosidade em cada instante;

$$\frac{Q_{quente}}{Q_{fria}} = \frac{\mu_{fria}}{\mu_{quente}}$$



● O declínio de temperatura é harmônico

$$\Delta Tt = \frac{\Delta Ti}{1 + Dt}$$

$$\Delta Tt = T(\text{atual}) - T(\text{normal do reservatório})$$

$$\Delta ti = T(\text{injeção}) - T(\text{normal do reservatório})$$

D=declínio diário

T=tempo em dias



Injeção cíclica de vapor - Previsão de comportamento - Owens e Suter

- 
- Com essas duas condições obtém-se em cada instante a temperatura, depois a viscosidade naquela temperatura e logo a vazão naquela viscosidade ;
 - É importante destacar que essa previsão é excessivamente otimista, pois está sendo considerado que o raio aquecido é igual ao raio de drenagem do poço, o que não ocorre na prática;
- 
- 
- 



Injeção cíclica de vapor - Previsão de comportamento - Boberg e Lantz

- 
- O método de Boberg & Lantz é bem mais sofisticado que o de Owens & Suter. Inclui o dano a formação e o cálculo de temperatura na zona aquecida à medida que o calor vai sendo perdido, tanto para as adjacências, quanto pela produção de fluidos quentes;
 - O cálculo da curva de produção é muito elaborado, embora possa ser feito manualmente se poucos pontos forem requeridos;
 - O método de Boberg & Lantz também superestima os resultados.
- 
- 



Injeção cíclica de vapor - Previsão de comportamento - Boberg e Lantz



Pique de produção após a estimulação:

◆ A equação básica é a seguinte:

$$\frac{Q_{o(quente)}}{Q_{o(fria)}} = \frac{IP_{(quente)}}{IP_{(frio)}}$$



◆ A relação entre os IP's é dada pela expressão

$$\frac{IP_{quente}}{IP_{frio}} = \frac{1}{\left(\frac{\mu_{o(quente)}}{\mu_{o(frio)}} \right) \cdot F_1 + F_2}$$





Injeção cíclica de vapor - Previsão de comportamento - Boberg e Lantz



Pique de produção após a estimulação:

F1 e F2 podem ser obtidos na tabela abaixo segundo o regime de fluxo.

Condição de fluxo	Fluxo radial	
	F1	F2
Regime permanente	$\frac{\ln\left(\frac{r_h}{r_w}\right) + S_h}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) + S}$	$\frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_h}\right)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) + S}$

r_e = pode ser metade do espaçamento entre os poços;

r_h = raio aquecido;

S = fator skin ; S_h =fator skin posterior a estimulação.



Injeção Contínua de vapor



Injeção de vapor – Breve histórico

- 
- A idéia de se utilizar o calor para melhorar a produtividade dos poços é quase tão antiga quanto a indústria do petróleo;
 - O objetivo inicial pretendia apenas limpar e remover dos poços os depósitos de parafinas e asfaltenos;
 - Tanto no poço quanto no reservatório, só há duas maneiras de proceder: injetar um fluido pré-aquecido ou gerar calor no local de interesse;
 - Embora a idéia seja antiga, o uso científico da injeção de vapor, apoiado pelo laboratório, só deslanchou na década de 50, atingindo o auge das aplicações em meados dos anos 80;
 - A injeção de vapor apresenta dois modos de operar: o cíclico e o contínuo.



Injeção de vapor - Custos

- 
- Os custos da injeção de vapor são muito elevados, representados principalmente pela maior densidade de poços e pelo combustível consumido;
 - A maior proximidade entre injetores e produtores está associada à necessidade de minimizar perdas de calor para formações adjacentes;
 - O consumo de combustível é muito elevado, mas permite que o seu pagamento seja feito com o próprio óleo que vai sendo produzido;
 - O consumo de um gerador de vapor é em torno de 13 m³/dia, sendo oportuno comparar com o óleo adicional que está sendo produzido.
- 
- 



Injeção de vapor - Usuários

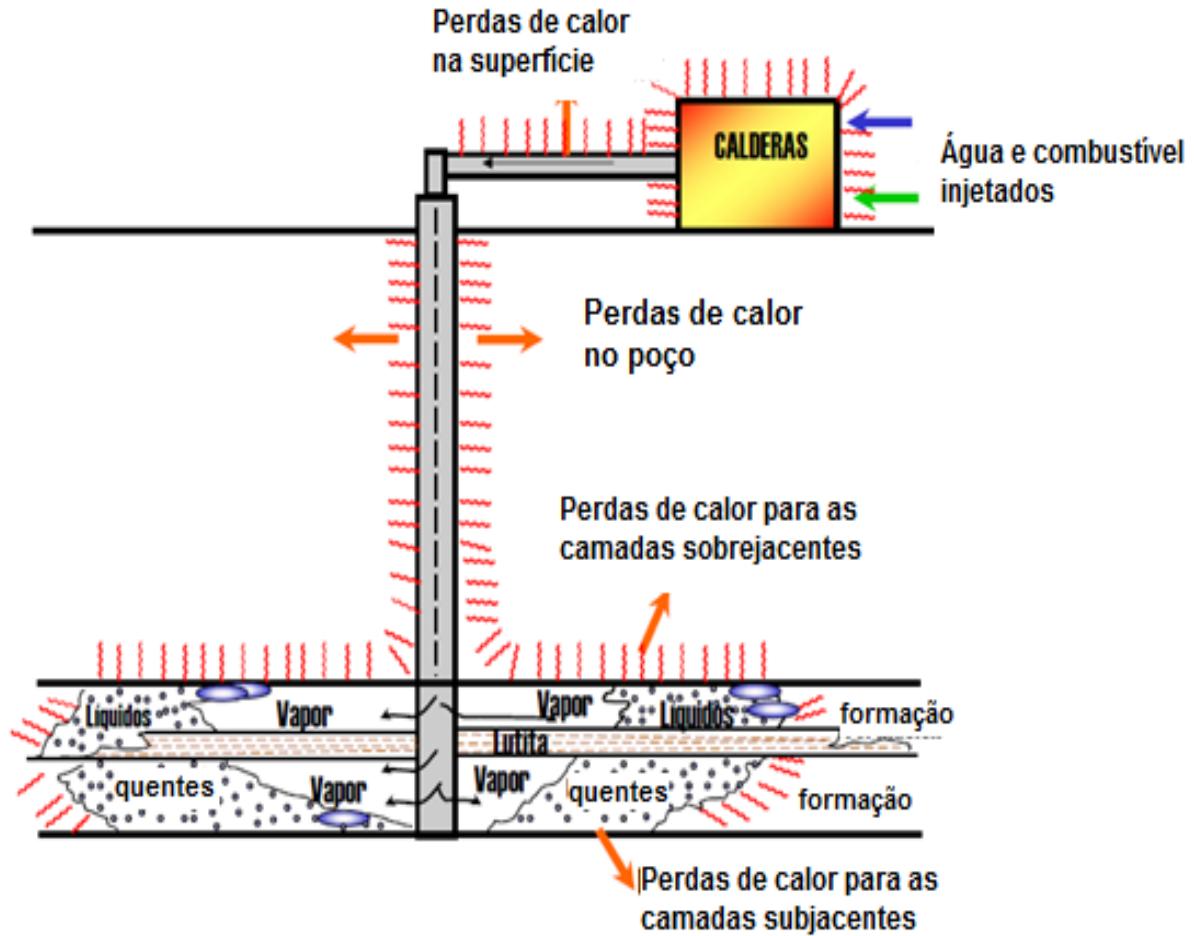
- 
- Estados Unidos – com super-projetos na Califórnia, na região de Kern River;
 - Venezuela – Costa leste do lago Maracaibo e vastas possibilidades na faixa do rio Orinoco;
 - Canadá – com a exploração de areias betuminosas de Alberta, nas regiões de Cold Lake, Athabaska e Peace River;
 - Indonésia – com o grande campo de Duri;
 - Brasil, é realizado em menor escala do que os países acima citados, operando em estados do Nordeste como Rio Grande do Norte, Sergipe e Bahia.
- 
- 



Injeção de vapor - Características

- 
- No processo de injeção contínua, o vapor é injetado em um ou mais poços chamados poços injetores, e o óleo é empurrado para os poços produtores;
 - Freqüentemente os dois métodos de injeção de vapor são combinados e os poços são produzidos por estimulação antes de iniciar a injeção contínua ;
 - A injeção contínua pode fornecer recuperações em torno de 50% do óleo *in place*. Volumes de vapor são tradicionalmente medidos em termos de volume equivalente de água fria (CWE);
 - Nem todo reservatório é candidato a receber injeção contínua de vapor, algumas limitações de reservatório fazem com que esse processo não seja aplicado de forma adequada;
- 
- 

Injeção de vapor - Características





Injeção de vapor - Características

- 
- Isolamento térmico pode ser usado para estender a profundidade prática máxima para a injeção de vapor ;
 - Outro importante critério para uma injeção contínua com sucesso é que o reservatório deve ser espesso, pelo menos 5 m de espessura, e preferivelmente mais espesso;
 - Normalmente, projetos de sucesso com injeção contínua de vapor estão em reservatórios relativamente rasos e espessos – por exemplo, 300 a 600 m de profundidade e 30 m de espessura. Estes reservatórios geralmente consistem em areias inconsolidadas ou fracamente consolidadas com permeabilidade e porosidade razoavelmente elevadas, e alta saturação de óleo.
- 
- 



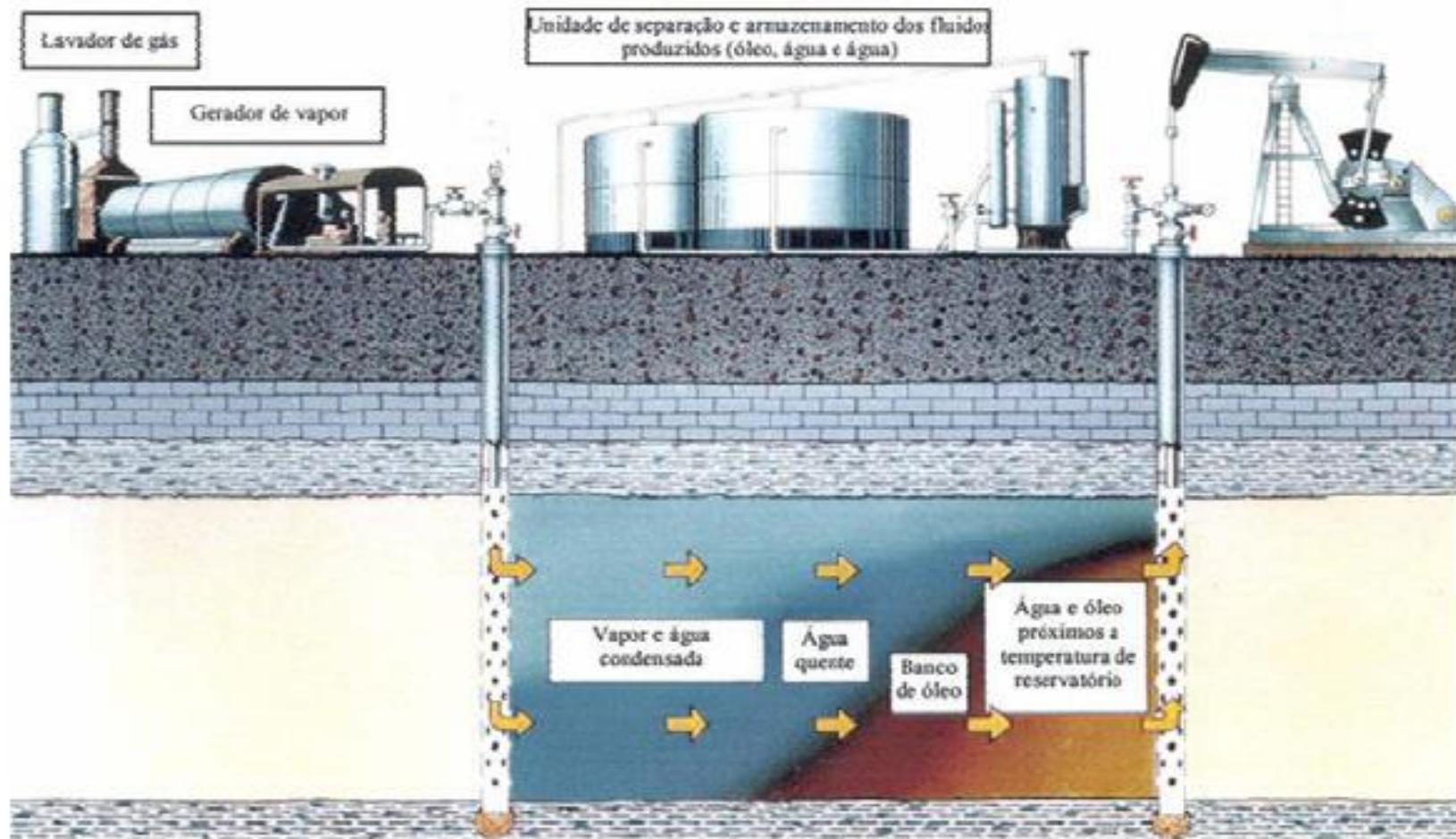
Injeção de vapor - Adequabilidade



Mathews lista os seguintes fatores que são desfavoráveis para a injeção contínua de vapor:

- 
1. Saturação de óleo menor que 0,40;
 2. Porosidade menor que 20%;
 3. Espessura porosa líquida da zona de óleo menor que 9 m;
 4. Permeabilidade menor que 100 mD;
 5. Razão da espessura líquida para a espessura bruta menor que 50%;
 6. Camadas de muito baixa saturação de óleo e alta permeabilidade na zona de óleo que agem como zonas de fuga;
 7. Viscosidades extremamente baixas;
 8. Fraturas;
 9. Grandes variações de permeabilidade na zona de óleo;
 10. Pobre continuidade do reservatório entre injetores e produtores;
 11. Reservatórios profundos de alta pressão e reservatórios muito rasos com sobrecarga insuficiente para permitir injeção de vapor sem fraturar.
- 
- 

Injeção de vapor -Descrição do processo



Injeção de vapor -Descrição do processo

Onde:

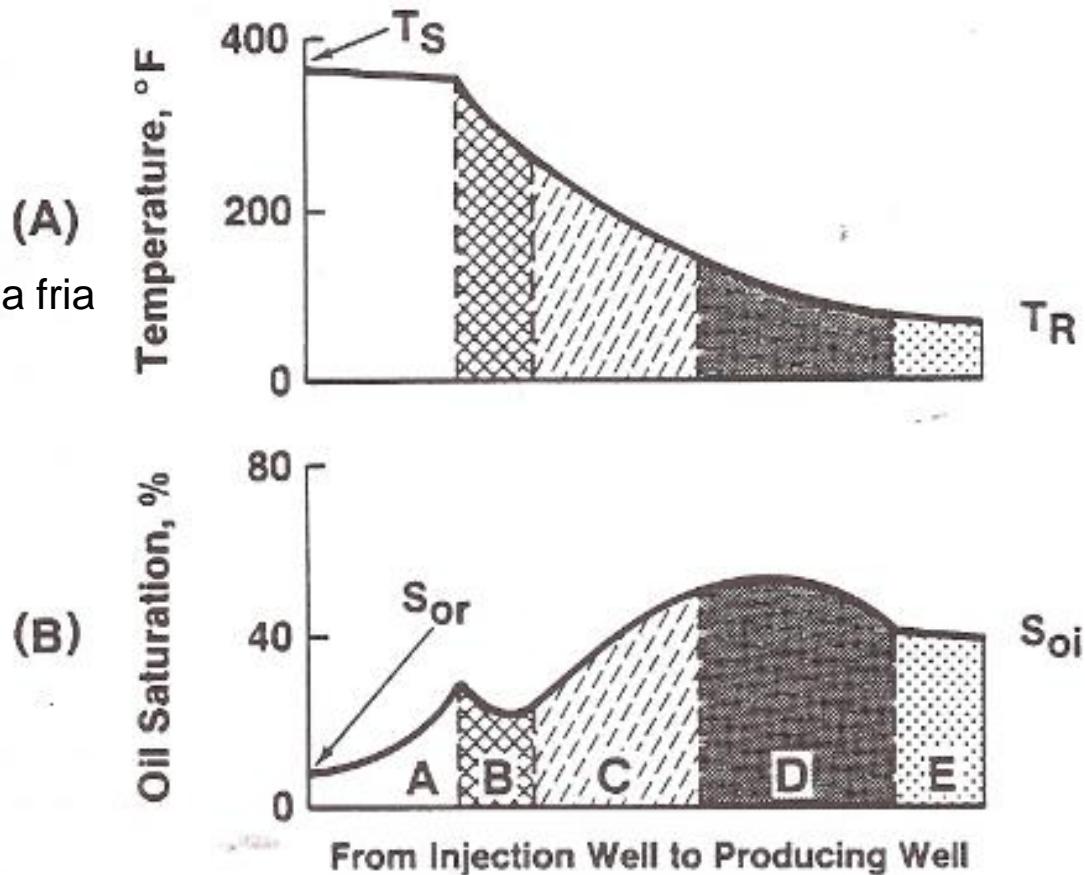
- A – Zona de vapor
- B – Banco de solvente
- C – Banco de Água quente
- D – Banco de Óleo – Zona condensada fria
- E – Zona de fluidos do reservatório

T_r – Temperatura do reservatório

T_s – Temperatura do vapor

S_{oi} – Saturação de óleo inicial

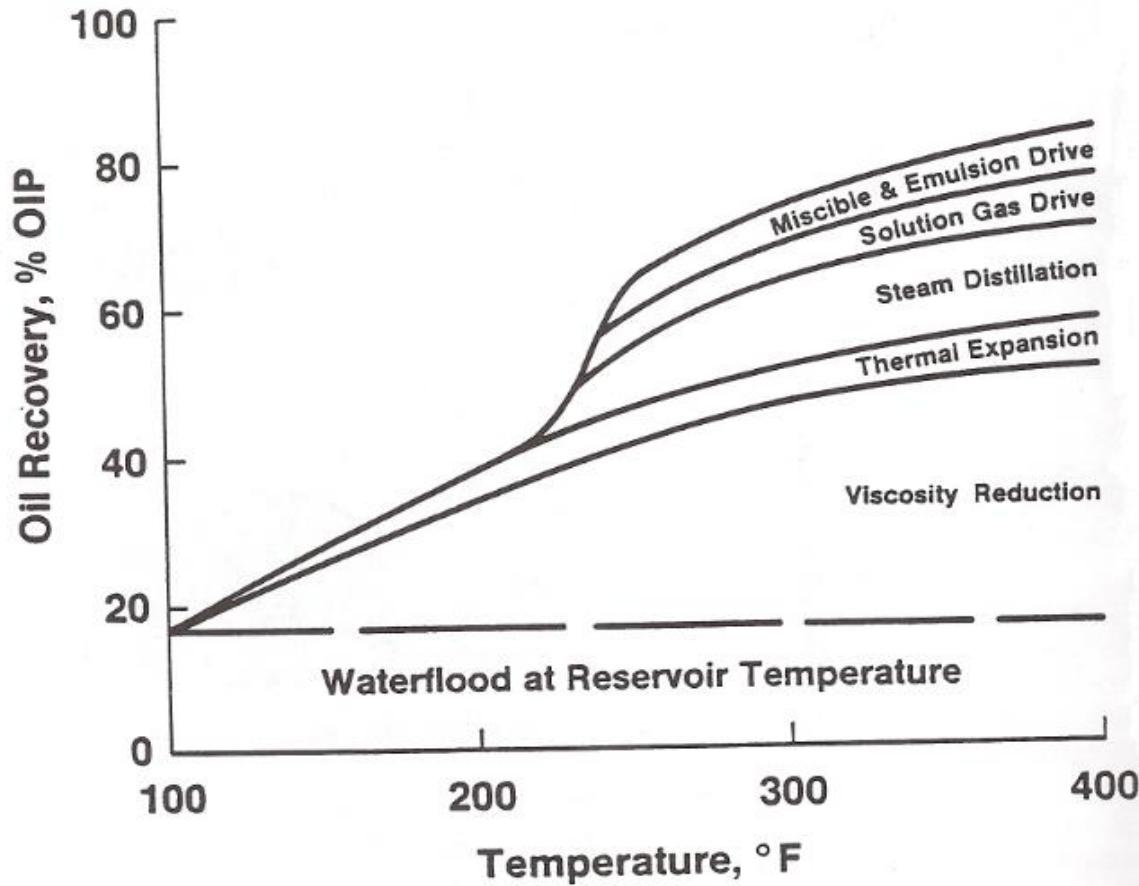
S_{or} – Saturação de óleo residual



Injeção de vapor -Descrição do processo

À medida que o vapor entra no reservatório, forma uma zona saturada de vapor em torno do poço. Esta zona, aproximadamente à temperatura do vapor injetado, se expande à medida que mais vapor é injetado. À frente da zona saturada de vapor (A), o vapor se condensa em água por causa da perda de calor para a formação e forma uma zona de condensado quente (B,C). Empurrado pela injeção contínua de vapor, o condensado quente transporta calor à frente da frente de vapor para dentro das regiões mais frias mais distantes do injetor. Com o tempo, o condensado perde seu calor para a formação, e sua temperatura se reduz para a temperatura inicial do reservatório.

Injeção de vapor -Mecanismos de produção





Injeção de vapor - Mecanismos de produção



Redução da viscosidade

● O decréscimo na viscosidade do óleo (μ_o) com o incremento da temperatura é o mecanismo mais importante para recuperação de óleos pesados;

$$M = \frac{\mu_o \cdot K_w}{\mu_w \cdot K_o}$$



● Com óleos de mais baixa viscosidade, as eficiências de deslocamento e de varrido areal são melhoradas;



● A mudança na viscosidade do óleo com a temperatura é normalmente reversível.



● Esta reversibilidade da mudança de viscosidade com a temperatura pode ser a causa da formação do banco de óleo.



Injeção de vapor – Mecanismos de produção



Expansão térmica



A expansão térmica, também é um importante mecanismo de recuperação na região de água quente, recupera de 5 a 10% do VOIP dependendo do tipo de óleo, da sua saturação inicial, e da temperatura da zona aquecida. À medida que o óleo se expande com o incremento da temperatura, a sua saturação incrementa, tornando-se mais móvel. O montante da expansão depende da composição do óleo, porque a expansão térmica é maior para óleo leve do que para óleo pesado, ou seja, a expansão térmica é mais efetiva em recuperação de óleo leve que em óleo pesado.





Injeção de vapor – Mecanismos de produção



Destilação do óleo pelo vapor



Sob a ação do calor as frações mais leves evaporam-se e condensam-se mais adiante. Além disso, a alta velocidade do vapor provoca o arraste de frações menos leves (stripping) que ajudam a formar um banco de solventes, produzindo um deslocamento miscível de alta eficiência.

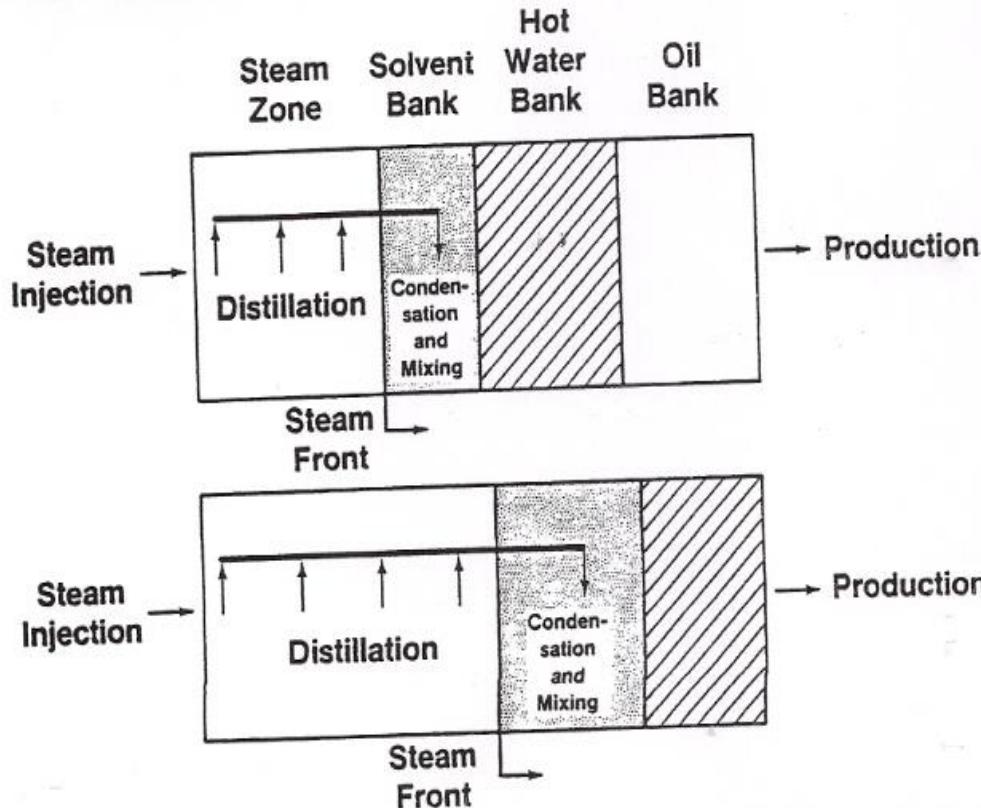




Injeção de vapor – Mecanismos de produção



Destilação do vapor

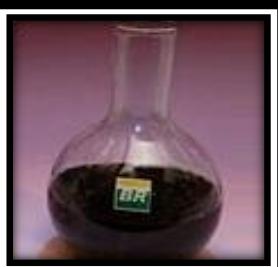




Injeção de vapor – Mecanismos de produção



Mecanismo do gás em solução



O mecanismo de gás em solução, também encontrado na injeção de água quente, é um processo de conversão de calor em energia mecânica para deslocar o óleo. Como a temperatura à frente da frente de vapor aumenta, gases dissolvidos se tornam menos solúveis e se liberam da mistura líquida. Estes gases liberados se expandem, proporcionando uma força de arraste o qual desloca o óleo e, consequentemente, aumenta a sua recuperação.





Injeção de vapor – Mecanismos de produção



Saturação residual de óleo

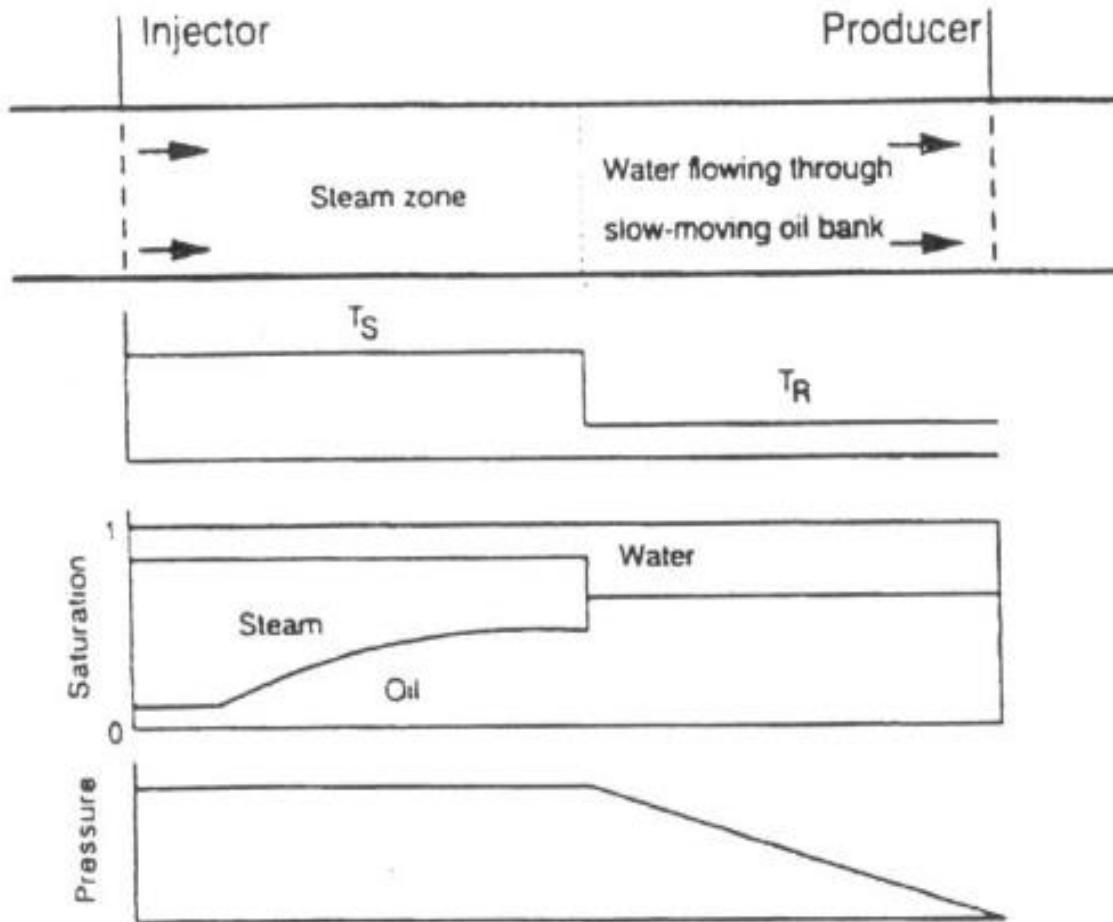


Pode ser observado que, quando a temperatura aumenta a saturação de água irredutível (Sw_i) também aumenta, enquanto a saturação de óleo residual diminui..



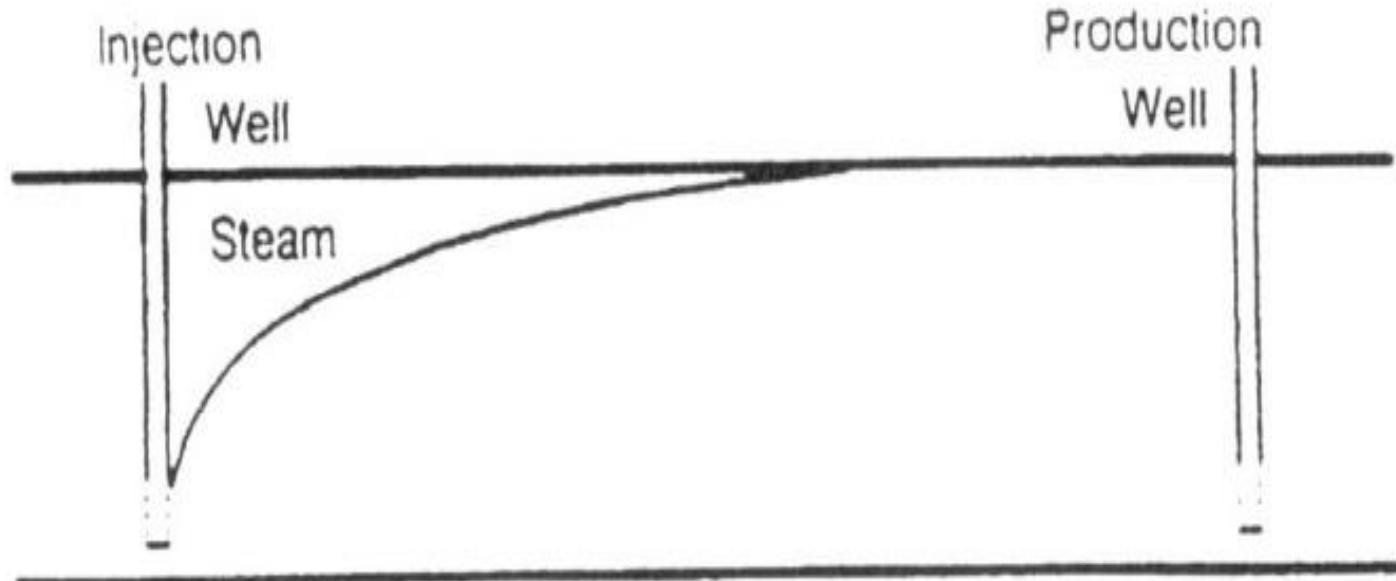
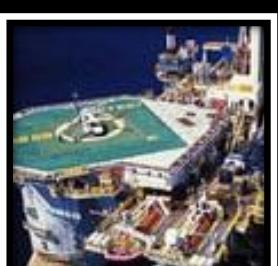


Injeção de vapor – Distribuição da temperatura





Injeção de vapor - Segregação gravitacional



Injeção de vapor – A abordagem de Marx e Lengenheim

O modelo de Marx e Lengenheim estima a área aquecida como uma função de tempo quando uma vazão de vapor é especificada.

Taxa instantânea de injeção de calor em Btu/h = $(m_v \cdot H_v)$ → 1 bbl = 350lbm/bbl

$$A_s = \frac{H_o M_1 \cdot h}{4\alpha_2 M_2^2 (T_s - T_r)} \left(e^{t_d} \cdot erfc(\sqrt{t_d}) + 2 \sqrt{\frac{t_d}{\pi}} - 1 \right)$$

$$\alpha = \frac{k_2}{M_2}$$

$$G(t_d)$$

$$t_d = 4 \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^2 \left(\frac{\alpha_2}{h^2} \right) t$$

Onde:

h = espessura da zona aquecida, ft

$M_1 = \rho_1 C_1$ = capacidade calorífica média da zona de vapor, Btu/ft³.°F

$M_2 = \rho_2 C_2$ = capacidade calorífica das camadas adjacentes, Btu/ft³.°F

ΔT = Temperatura da zona de vapor – temperatura original do reservatório, °F

α = difusividade térmica da camada sobrejacente, ft²/hr



Injeção de vapor – A abordagem de Mandl e Volek



Uma zona de vapor pode ser mantida através da região aquecida, prevista pelo modelo Marx e Langenheim, enquanto houver calor latente suficiente para manter a zona de vapor a uma temperatura constante. Como a zona aquecida se expande, é atingido um tempo em que a região aquecida é separada em uma zona de vapor e uma de água quente. O tempo crítico, quando há a formação de uma nítida zona de água quente foi determinada por Mandl e Volek através de uma balanço de energia na frente de condensação.


$$e^{t_{cD}} \operatorname{erfc}(\sqrt{t_{cD}}) = (1 - \left(\frac{f_{sd} L_{vdh}}{H_s} \right))$$
$$G_1(t_D) = e^{t_D} \operatorname{erfc}(\sqrt{t_D})$$



L_v = calor de vaporização do vapor, Btu/lbm; f_{sd} = título do vapor;
 H_s = entalpia do vapor (Btu/lbm)



Injeção de vapor – A abordagem de Myhill e Stegemeier



A eficiência térmica de um processo de injeção de vapor em um reservatório é definida como a razão do calor remanescente na zona de vapor em relação ao total de calor injetado.


$$E_{hs} = \frac{G(t_d)}{t_d}$$





Injeção de vapor – A abordagem de Myhill e Stegemeier



A energia perdida para as camadas sobrejacente e subjacente num tempo t, é dado por:.


$$Q_l = H_o t (1 - E_{hs})$$

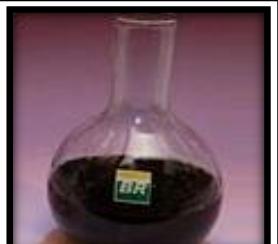


Injeção de vapor - Função Razão Óleo-Vapor



A razão óleo-vapor máxima (Fos) é definida como a razão do volume de óleo deslocado da zona de vapor para o volume de água tendo uma massa igual à do vapor injetado. O volume deslocado é dado por:

$$Np = A_s \cdot z_n \cdot \phi \cdot \Delta S$$



Onde:



A_s = área da zona de vapor, ft^2

z_n = espessura líquida do reservatório, ft

ϕ = porosidade, fração

ΔS = variação média na saturação de óleo, fração



Injeção de vapor - Função Razão Óleo-Vapor

O volume de vapor requerido para aquecer a zona de vapor pode ser calculado pela quantidade de calor acumulada na zona de vapor, a eficiência térmica, e o conteúdo de calor do vapor:

$$V_1 = \frac{M_1 \cdot A_s \cdot Z_t \cdot \Delta T \cdot (1/E_{hs})}{\rho w \cdot (C_w \Delta T + f_{sd} L_v)}$$

Onde:

Z_t = espessura total (ft);

C_w = capacidade calorífica da água (Btu/lb. $^{\circ}$ F);

L_v = calor de vaporização do vapor, Btu/lb;

f_{sd} = qualidade do vapor nas condições de fundo.

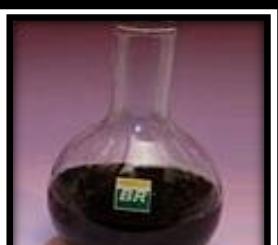
:



Injeção de vapor - Função Razão Óleo-Vapor



A razão óleo/vapor pode ser calculada pela expressão seguinte:


$$FoS = \frac{N_p}{V_1}$$





Injeção de vapor – Razão Óleo/Vapor Equivalente



Para normalizar a razão óleo/vapor para o equivalente a 1000 Btu/lb de vapor na saída do gerador, é necessário a seguinte correção:


$$F_{ose} = \frac{1000}{C_w \cdot (T_s - T_b) + f_{sb} L_v} \cdot F_{os}$$



Onde

T_s = temperatura do vapor injetado ou da zona de vapor, °F

T_b = Temperatura na saída do gerador, °F

f_{sb} = qualidade do vapor na saída do gerador, fração



Injeção de vapor - Balanço de Energia

A razão Óleo-vapor equivalente pode ser modificada para definir a razão energia recuperada do processo para energia requerida para gerar o vapor (valor contido no óleo recuperado por unidade de volume de óleo dividido pelo calor requerido para gerar vapor por unidade de volume de óleo):

$$E_d = \frac{\gamma_o \cdot h_o \cdot F_{ose} \cdot E_b}{1000}$$

Eficiência do gerador

Btu/lb

Uma relação simples entre a densidade relativa e a energia contida no óleo recuperado é dada por Zaba et al.:

$$h_o = 13100 + 5600 / \gamma_o$$

A equação de balanço total de energia passa a ser então:

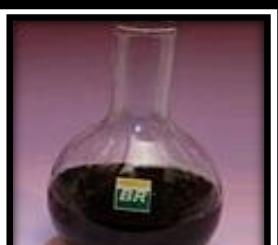
$$E_d = (13,1\gamma_o + 5,6) \cdot E_b \cdot F_{ose}$$



Injeção de vapor – A abordagem de Jeff Jones



O modelo de Myhill-Stegemeier dá resultados de produção elevados não realistas no início do processo, razoáveis no meio, e a medida que o processo se aproxima do final, vazões que são diversas vezes muito altas. Jones considera que há três períodos principais em uma injeção contínua de vapor e que os fatores dominantes mudam à medida que o processo segue um estágio próximo.





Injeção de vapor - A abordagem de Jeff Jones



1º estágio - Durante o primeiro estágio o fator dominante é a viscosidade muito elevada do óleo frio e, em alguns casos, preencher a saturação de gás com óleo. Durante esse período, água canaliza através do óleo, e há pouca produção até que o óleo aquecido possa se aproximar do poço de produção. É durante este período que a estimulação por vapor dos poços produtores pode ser particularmente valiosa e com betumes pesados, quase essencial.

2º estágio – Neste estágio o óleo quente é movido para o poço produtor com relativa facilidade, e a vazão de produção é em torno da taxa de crescimento da câmara de vapor. As suposições de Myhill-Stegemeier são razoavelmente válidas. O pique de produção ocorre no início desse estágio.



Injeção de vapor – A abordagem de Jeff Jones



3º estágio – A teoria de Myhill-Stegemeier permitiria o segundo estágio continuar indefinidamente, com a razão de produção caindo assintóticamente para zero à medida que a área para as perdas verticais são incrementadas. Na prática a área de drenagem é finita e a vazão de produção torna-se limitada por causa da depleção do reservatório. A depleção não é contemplada na teoria de Myhill-Stegemeier.

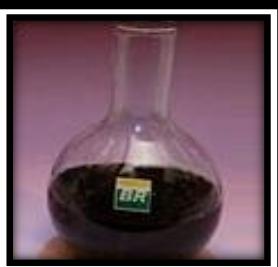




Injeção de vapor - A abordagem de Jeff Jones



Fatores empíricos de Ajuste de Jones



Jones leva em conta os efeitos dos fatores recém descritos pela multiplicação das vazões de produção previstas pela teoria de Myhill-Stegemeier pelos três fatores empíricos: V_{pd} , A_{cd} e V_{od} .

$$q = V_{pd} \cdot A_{cd} \cdot V_{od} \cdot \frac{H_o \cdot \phi \cdot (S_o - S_{or})}{(\rho \cdot C)_1 \cdot (T_s - T_r)} e^{t_d} \cdot erfc(\sqrt{t_d})$$

$G_1(t_d)$



V_{pd} expressa o efeito da saturação inicial de gás. É dado pela seguinte equação:

$$V_{pd} = \left(\frac{V_{s.inj} \cdot 5,62}{43560 \cdot A \cdot h_n \cdot \phi \cdot S_g} \right)^2$$

Volume de vapor injetado(bbl) →
Espessura líquida (ft) →
Área efetiva da malha (acres) →

$0 \leq V_{pd} \leq 1;$ Ou, caso contrário $V_{pd} = 1$



Injeção de vapor – A abordagem de Jeff Jones



O fator A_{cd} leva em conta o efeito na viscosidade inicial do óleo. É calculado através da equação abaixo. Será observado que quanto maior o valor de μ_{oi} , menor o valor de A_{cd} . À medida que a área da zona de vapor incrementa, o valor de A_{cd} incrementa até o valor limite forçado de 1. Para uma viscosidade de 10^6 cP, o radicando é exatamente igual a unidade.

$$A_{cd} = \frac{A_s}{A \cdot \sqrt{0,11 \cdot \ln\left(\frac{\mu_{oi}}{100}\right)}}^2$$

Área da zona de vapor, em acres

Área da malha, em acres

$$0 \leq A_{cd} \leq 1; \quad \text{Ou, caso contrário } A_{cd} = 1$$





Injeção de vapor - A abordagem de Jeff Jones



V_{od} é o fator que leva em conta o efeito da depleção. É dado pela equação abaixo:

$$V_{od} = \sqrt{1 - \frac{N_p}{N} \cdot \frac{S_{oi}}{\Delta S_o}}$$

(bbl) (S_{oi}-S_{or})

$$0 \leq V_{od} \leq 1; \quad \text{Ou, caso contrário } V_{pd} = 1$$





Injeção de vapor - Injetividade

- 
- A vazão no qual o vapor pode ser injetado no reservatório não é prevista pela teoria de Myhill-Stegemeier e nem em suas modificações;
- 
- A economicidade de um projeto de injeção contínua de vapor é grandemente dependente das vazões nas quais o vapor é injetado e o óleo recuperado;
- 
- Vazões baixas de injeção implicam vazões lentas de produção e baixos fluxos de caixa;
- 
- Vazões lentas de injeção resultam em uma grande proporção do calor injetado sendo perdido devido o longo tempo requerido;



Injeção de vapor - Injetividade



● O maior valor da experimentação pré-comercial de piloto de campo reside na determinação das vazões práticas de injeção de vapor que podem ser obtidas;



● Uma vez isto conhecido, a abordagem de Myhill-Stegemeier podem gerar estimativas razoáveis da performance esperada;



● A vazão na qual a injeção pode ser obtida no reservatório é abordada pela consideração do fluxo estacionário entre os poços injetores e produtores, para várias geometrias, assumindo que o fluido injetado tem as mesmas propriedades do óleo deslocado;





Injeção de vapor - Deslocamento Permanente entre um par isolado de poços verticais



A pressão de um fluxo radial de óleo para um poço produtor vertical isolado ou de um poço injetor vertical isolado pode ser calculada usando a seguinte equação:


$$P = P_o - \frac{q \cdot \mu}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot h} \ln R$$



Onde P é a pressão no raio R do poço no qual a injeção é q . Para um produtor q é negativa.





Injeção de vapor - Deslocamento Permanente entre um par isolado de poços verticais



A diferença de pressão entre os poços injetor e produtor é dada por:

$$\Delta P = P_{wi} - P_{wp} = \frac{q \cdot \mu}{k \cdot \pi \cdot h} \ln\left(\frac{L}{R_w}\right)$$



Se $R_{wi} \neq R_{wp}$, então a média geométrica, $R_w = (R_{wi} \cdot R_{wp})^{1/2}$, pode ser usada na equação acima.



Isto pode ser rearranjado para gerar a injetividade normalizada (em unidades consistentes).

$$\text{Injetividade normalizada} = \frac{q \cdot \mu}{k \cdot h \cdot \Delta P} = \frac{\pi}{\ln\left(\frac{L}{R_w}\right)}$$





Injeção de vapor - Deslocamento Permanente entre um par isolado de poços verticais



A injetividade normalizada de Morel-Seytoux é dada por:

$$\frac{q(bpd).\mu(cP)}{k(mD).h(ft).\Delta P(psi)} = 1,127 \cdot 10^{-3} \left(\frac{q \cdot \mu}{k \cdot h \cdot \Delta P} \right)_{consistente}$$



A injetividade decresce à medida que L cresce; contudo, o efeito não é muito grande por causa da natureza da função logarítmica.





Injeção de vapor – Tempo de breakthrough



O volume de óleo que é deslocado durante o período de irrompimento é dado pela equação:

$$qt_{bt} = \frac{\pi \cdot h \cdot L^2 \cdot \phi \cdot \Delta S_o}{3}$$
$$t_{bt} = \frac{\phi \cdot \Delta S_o \cdot \mu \cdot L^2 \cdot \ln(L/R_w)}{3k\Delta P}$$

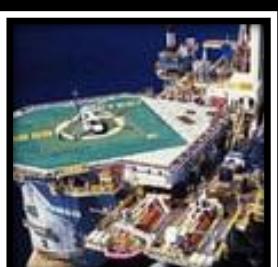


Este volume de óleo é independente da vazão de injeção. É igual a um terço do volume de óleo móvel contido dentro do cilindro do reservatório de altura h e raio L .





Injeção de vapor - Cálculos simplificados de Vogel para o calor na injeção Contínua de vapor



O calor estocado dentro da câmara de vapor é dado por:

$$Q_s = A_s \cdot h \cdot \rho_1 \cdot C_1 \cdot (T_s - T_R)$$

Vogel assume que a câmara de vapor se espalha imediatamente através do topo de toda malha. Ele então calcula as perdas de calor verticais para a camada sobrejacente e também para o material abaixo da câmara de vapor. Para calcular estas perdas de calor, ele usa a equação abaixo para a perda de calor para cima e para baixo:

$$Q_L = 2 \cdot K_2 \cdot A_s \cdot (T_s - T_R) \cdot \sqrt{\frac{t}{\pi \cdot \alpha_2}}$$



Combustão *in situ*



Combustão *in situ* – Descrição do processo

- 
- É uma técnica de recuperação térmica de óleo na qual o calor é produzido dentro do reservatório.
 - Contrasta com a injeção de fluidos aquecidos, em que o calor é gerado na superfície e transportado para o reservatório por meio de um fluido;
 - No processo de combustão *in situ* uma pequena porção do óleo do reservatório entra em ignição, que é sustentada pela injeção de ar;
 - Como em qualquer reação de combustão, o oxigênio se combina com o combustível “óleo” formando dióxido de carbono e água, liberando calor.
 - A composição do óleo afeta a quantidade de energia liberada (calor).





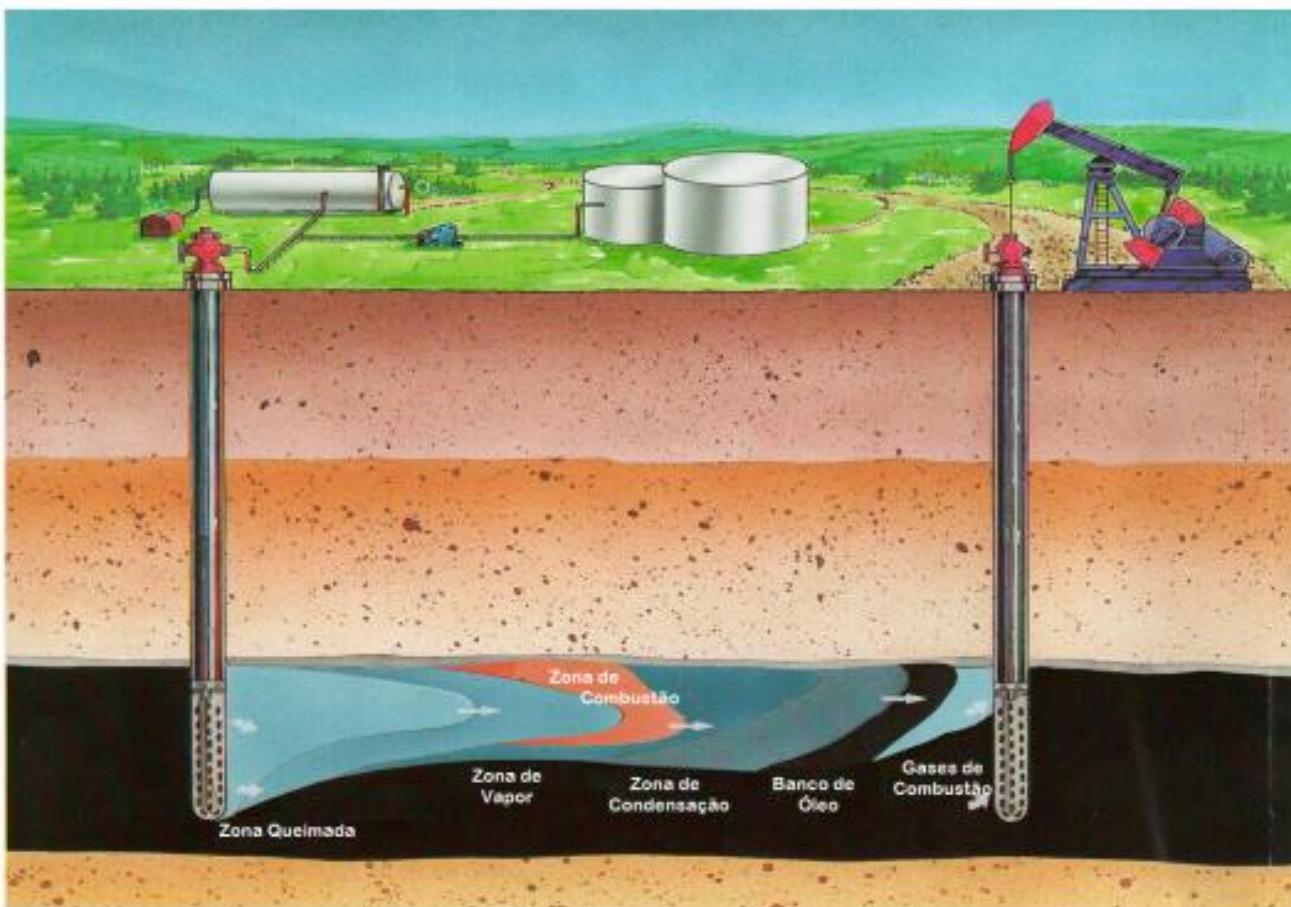
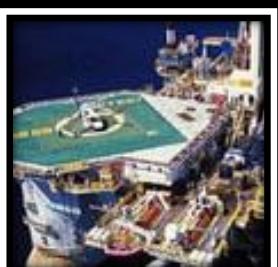
Combustão *in situ* - Descrição do processo

- 
- A ignição do óleo no reservatório é o primeiro requisito para a combustão *in situ*;
 - Em muitos reservatórios a ignição é espontânea e em outros requer aquecimento;
 - Se não espontânea, a ignição pode ser auxiliada pelo uso de aquecedores de fundo, preaquecendo o ar de injeção ou por meio de injeção de ar com um produto químico oxidável, tal como a linhaça.





Combustão *in situ* – Descrição do processo



Esquema do processo de combustão in-situ (Alberta Research Council, 2006)



Combustão *in situ* - Descrição do processo



Ignição do óleo



Liberação de Calor (*in situ*)

Manutenção pela injeção de ar



Combustão *in situ* - Descrição do processo



Queima do óleo

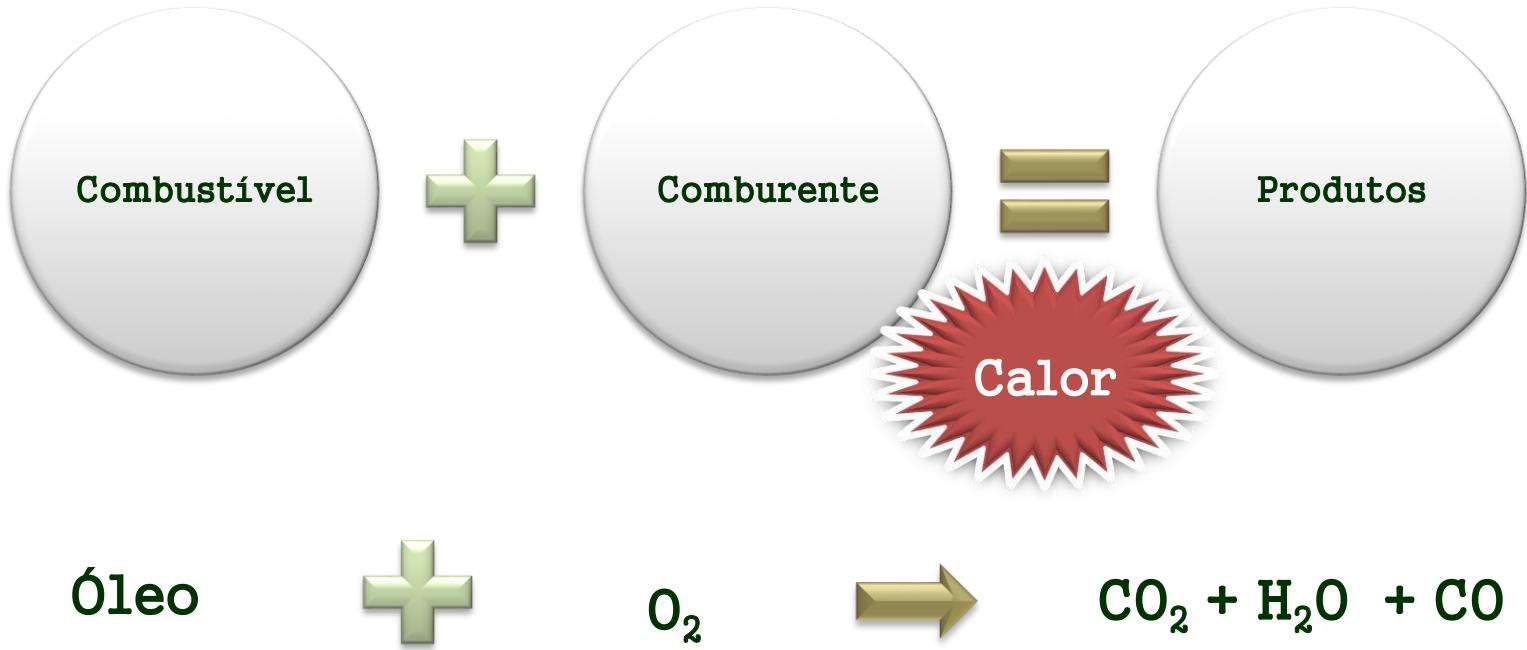
Redução da viscosidade

Vaporização das frações mais leves

Esse conjunto de fatores faz com que o óleo se desloque em direção aos poços produtores.



Combustão *in situ* – Reações químicas



Reação de Oxidação de um Hidrocarboneto

- A reação gera calor mesmo sem combustão

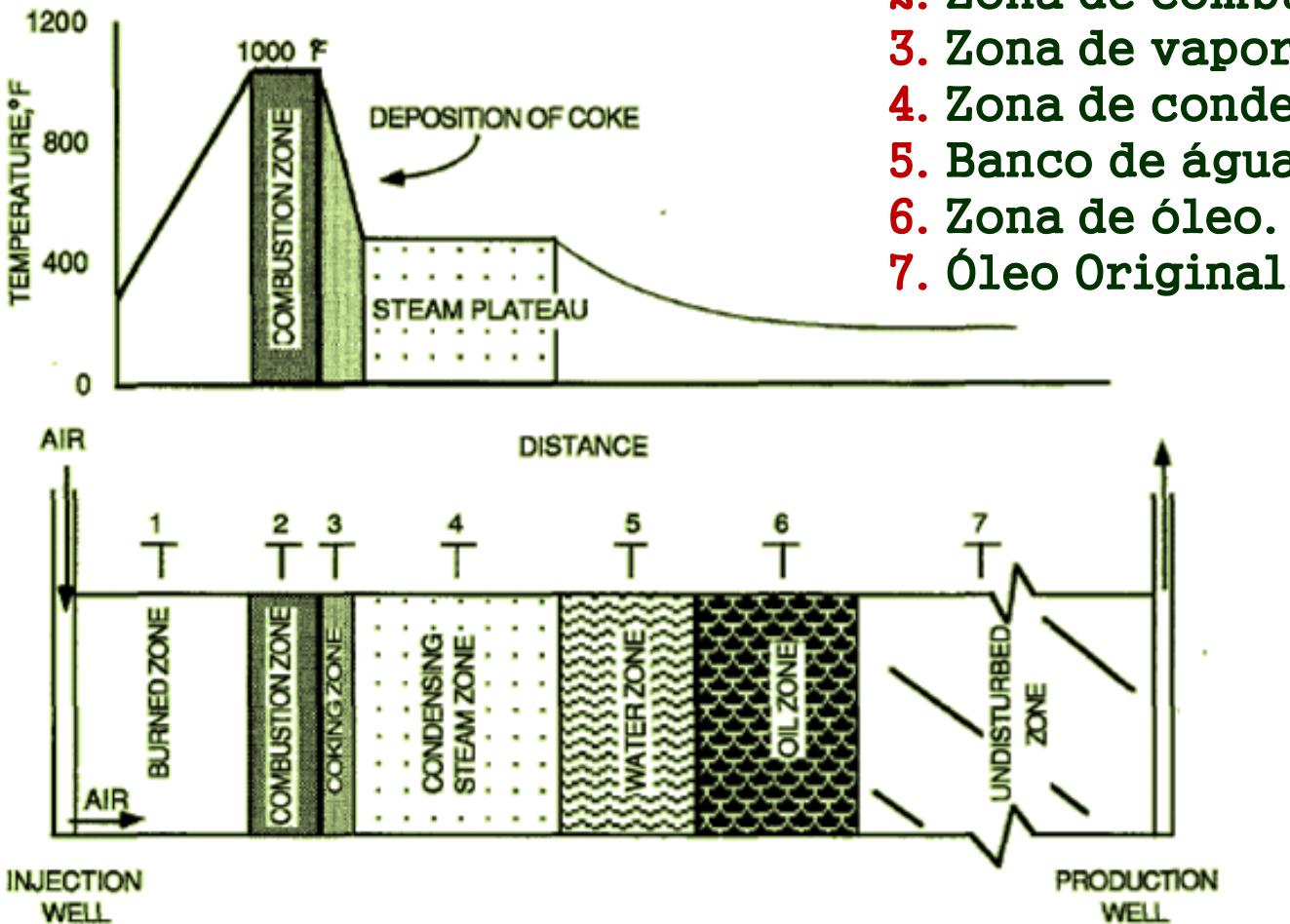


Combustão *in situ* – Mecanismos do processo

- 
- A frente de combustão se assemelha a uma onda de calor atravessando o reservatório
 - Após à ignição, a frente de combustão é sustentada por um escoamento contínuo de ar
 - Com o distanciamento da frente de combustão do poço injetor, diversas zonas bem definidas se desenvolvem entre o injetor e o produtor
 - Os componentes leves vaporizados e o vapor gerado pela combustão são carregados adiante, até que se condensam depois de entrar em contato com as porções mais frias do reservatório
 - A frente de combustão se move somente após a queima de todo combustível depositado
- 
- 

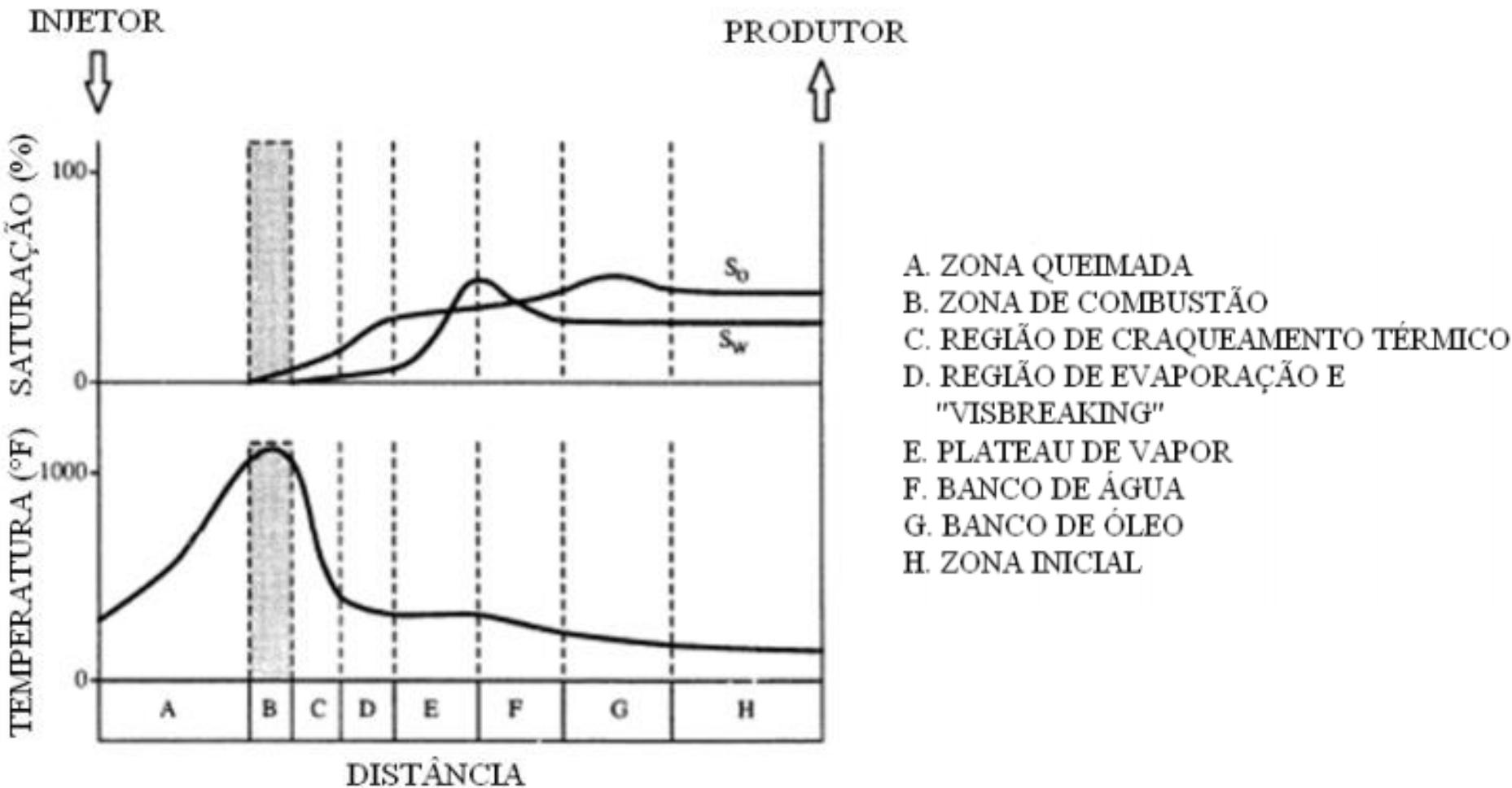


Combustão *in situ* – Mecanismos do processo



1. Zona queimada.
2. Zona de combustão.
3. Zona de vaporização.
4. Zona de condensação.
5. Banco de água.
6. Zona de óleo.
7. Óleo Original.

Combustão *in situ* - Mecanismos do processo





Combustão *in situ* – Tipos



Propagação da frente de combustão em relação ao escoamento de ar

mesma direção

combustão direta

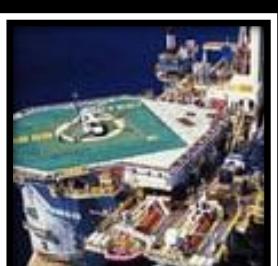
direção contrária

combustão reversa

- A utilização de combustão direta é muito ineficiente, porque o ar tem baixa capacidade de transportar calor
- Somente 20% do calor vai adiante da frente de combustão. O que permanece atrás é perdido para as rochas adjacentes



Combustão *in situ* – Tipos



Combustão
direta

seca

somente ar ou oxigênio
enriquecido são injetados

molhada

água também é injetada



Combustão *in situ* – Aplicação

- 
- Principalmente em reservatórios com óleos de alta viscosidade;
 - Reservatórios com espessuras maiores ou iguais a 3 m (prevenção de perdas excessivas de calor);
 - Permeabilidade maior que 100 mD (para permitir o fluxo de óleo mais viscoso);
 - O °API do óleo deve estar no intervalo entre 10 e 40. (Óleos de °API menores depositam combustível em excesso);
 - A quantidade de óleo existente no reservatório deve ser maior que 0,1 m3 de óleo/m3 de rocha .
- 
- 



Combustão *in situ* – Vantagens

- 
- É uma técnica provada e os reservatórios candidatos podem ser comparados com projetos anteriores para verificar a viabilidade;
 - O processo não é limitado a óleo de alta viscosidade;
 - Pode-se obter alta eficiência de deslocamento, embora algum óleo seja queimado e não produzido;
 - O fluido de injeção (ar) é facilmente disponível.
- 
- 



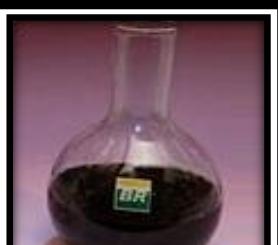
Combustão *in situ* - Desvantagens

- 
- Problemas de produção freqüentes:
 - ❖ emulsões
 - ❖ danos ao equipamento pelo calor

 - A distribuição de calor é ineficiente em projetos de combustão típicos:
 - ❖ Uma zona aquecida, relativamente grande, é formada atrás da frente, onde pouco benefício traz
 - ❖ A injeção de água, simultânea ou alternada, pode auxiliar nesse problema
- 
- 



Combustão *in situ* – Parâmetros de influência

- 
- ◆ Temperatura e pressão no reservatório;
 - ◆ Composição do óleo (Quantidade de carbonos dos hidrocarbonetos, mais leves ou mais pesados);
 - ◆ Presença de água.
- 
- 
- 



Combustão *in situ* – Considerações econômicas

- 
- O balanço econômico é fortemente ditado pelo reservatório e seu óleo. As características de deposição do combustível determinam o volume de ar requerido para o projeto. As propriedades do reservatório determinam as vazões de injeção de ar e a velocidade da frente de queima necessárias.
 - Ambas determinam o dimensionamento das instalações de compressores necessárias para um projeto específico e que geralmente representam um investimento considerável. Os custos de compressão de ar podem ser altos, dependendo da pressão requerida.
 - Um bom indicador econômico de operação é a razão entre os volumes de ar injetado e óleo produzido. Injeções de sucesso têm razões ar/óleo menores que $3500 \text{ m}^3\text{std}/\text{m}^3$.





Obrigado!!!