

## FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) E TESTES EXPERIMENTAIS AJUDAM A COMPREENDER O FENÔMENO DO DESLOCAMENTO DO GRAVEL PACK EM POÇOS DE PETRÓLEO

João Vicente Martins de Magalhães, [jvmm@petrobras.com.br](mailto:jvmm@petrobras.com.br)

Rafael Amorim Ferreira Leal, [rafaelleal@petrobras.com.br](mailto:rafaelleal@petrobras.com.br)

André Leibsohn Martins, [aleibsohn@petrobras.com.br](mailto:aleibsohn@petrobras.com.br)

Agostinho Calderon, [agoscal@petrobras.com.br](mailto:agoscal@petrobras.com.br)

Marcus Vinícius Duarte Ferreira, [mvdferreira@petrobras.com.br](mailto:mvdferreira@petrobras.com.br)

Petrobras S.A., Av. Horácio Macedo, 950, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro

Bruno Simões, [bruno.simoese@halliburton.com.br](mailto:bruno.simoese@halliburton.com.br)

Diego Barbosa, [diego.barbosa@halliburton.com.br](mailto:diego.barbosa@halliburton.com.br)

Halliburton, Av. Prefeito Aristeu Silva, 1000, Novo Cavaleiros, Macaé, RJ

**Resumo.** Na exploração e produção de petróleo em águas ultra-profundas, nos campos operados pela PETROBRAS, um dos problemas encontrados com maior frequência é a necessidade da eliminação da produção de areia, tendo em vista que a maioria destes campos produz a partir de arenitos inconsolidados. O Gravel Packing a poço aberto é a técnica mais utilizada para esta tarefa. Devido ao fato das operações de Gravel Packing ocorrerem a milhares de metros abaixo da superfície, faz-se necessária a simulação computacional para prever como ocorre o fenômeno de deposição das partículas (Gravel) no poço. Para tal foi utilizado o pacote comercial de fluidodinâmica FLUENT 12, que calcula o campo de velocidade do fluido, acoplado a um outro pacote comercial, baseado em elementos discretos, chamado EDEM, que trata da mecânica das partículas. O acoplamento dos dois softwares mostrou-se adequado e a comparação dos resultados computacionais com os dados experimentais mostra um bom ajuste entre ambos. Além disso, foi possível simular problemas de entupimento prematuro no poço, mostrando que a simulação computacional é robusta e capaz de captar tais fenômenos.

**Palavras-chave:** fluidodinâmica computacional, gravel pack, petróleo, elementos discretos

### 1. INTRODUÇÃO

Na exploração e produção de petróleo em águas profundas e ultra-profundas, nos campos operados pela PETROBRAS na costa Brasileira, um dos problemas encontrados com maior frequência é a necessidade da eliminação da produção de areia, tendo em vista que a maioria destes campos produz a partir de arenitos inconsolidados.

O Gravel Packing a poço aberto horizontal (*Horizontal Open Hole Gravel Packing - HOHGP*), é a técnica mais utilizada, dentre as técnicas de contenção de areia. Devido à grande experiência adquirida pela PETROBRAS neste tipo de operação ao longo dos últimos 11 anos, aliado aos bons resultados alcançados, hoje, esta é a principal técnica utilizada para conter os sólidos da formação, com mais de 270 poços completados desta maneira (Marques, 2007).

A janela operacional para o HOHGP é delimitada pela máxima vazão que se pode bombear a mistura gravel-fluido sem que a pressão gerada no poço aberto, junto à sapata do último revestimento, seja maior que a pressão de fratura da formação. Por outro lado, o limite mínimo da janela operacional consiste na mínima vazão que se pode bombear abaixo da qual ocorrerá o embuchamento prematuro no Rat-hole. Maiores detalhes acerca da janela operacional, bem como a definição de embuchamento prematuro podem ser vistos em Magalhães *et al.* (2005 a), já uma breve explanação de como ocorre a operação de Gravel Packing pode ser obtida em Martins (2005).

No HOHGP temos, na maioria das vezes, operações sendo realizadas dentro de uma janela operacional extremamente fechada, principalmente em águas profundas, onde formações pouco competentes são encontradas e em poços horizontais extensos, onde as perdas de carga geradas durante o deslocamento do gravel são expressivas. Portanto, se bombearmos a uma vazão muito alta, o risco de fraturar a formação é grande e, ao mesmo tempo, se bombearmos em vazões muito baixas, para diminuir a perda de carga, corremos o risco de embuchar prematuramente o Rat-hole.

Adicionalmente, uma das grandes dificuldades da indústria de petróleo baseia-se no fato de que a maioria das operações realizadas nos poços, tais como o Gravel Packing, ocorrem a grandes profundidades abaixo do solo, sem a possibilidade de observação direta. Todos os controles aplicados nas operações são baseados em medições diretas e/ou indiretas, mas sem, contudo, o apoio visual.

Pelos fatos apresentados acima, surgiu a motivação para realizar um estudo em fluidodinâmica computacional (CFD) com o objetivo de: determinar vazões críticas que levam ao embuchamento prematuro no Rat-hole em poços horizontais, promover um maior conhecimento acerca dos mecanismos e da dinâmica de turbulência que ocorre na

contração do Rat-hole para o poço aberto, bem como, desenvolver uma matriz de testes computacionais para uma ampla caracterização do escoamento do Gravel Pack em tais poços, testando diversos materiais propantes utilizados pela indústria e validando os resultados computacionais com resultados experimentais de uma campanha de testes já realizada pela Petrobras, em um simulador físico especialmente construído para os testes aqui expostos.

## 2. DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO ESTUDO

O escoamento do Gravel Pack, estudado através de simulação numérica no presente trabalho, são escoamentos líquido-sólido. A metodologia utilizada foi baseada no acoplamento entre dois diferentes softwares, o ANSYS FLUENT<sup>®</sup> e o EDEM<sup>®</sup>. O primeiro resolve o escoamento para a fase contínua (no presente caso, a fase líquida), enquanto o segundo resolve as trajetórias de cada partícula (gravel) injetada dentro do domínio de cálculo. Um módulo de acoplamento entre os softwares promove a interação entre os mesmos e permite que a presença das partículas gere resistência para o escoamento do fluido e vice-versa.

A metodologia de acoplamento dos softwares foi adotada devido à particularidade dos problemas modelados, onde a deposição de partículas é fundamental no comportamento do processo. Essa deposição de partículas resulta em alta concentração volumétrica de sólidos, dificultando assim a resolução numérica do escoamento através dos tradicionais modelos para a simulação de sistemas granulares. De acordo com a necessidade a metodologia de acoplamento entre o ANSYS FLUENT<sup>®</sup> e o EDEM<sup>®</sup> vem se mostrando capaz de simular esses complexos escoamentos multifásicos.

Dentro desse contexto, a modelagem se dá, basicamente, em três etapas:

- Equações para o cálculo do escoamento da fase contínua (ANSYS FLUENT<sup>®</sup>), onde são utilizadas as equações de quantidade de movimento e as equações de turbulência;
- Equações para o cálculo das trajetórias das partículas (EDEM<sup>®</sup>), onde são utilizadas as equações da Lei de Newton do movimento que descrevem o movimento das partículas, bem como os aspectos relevantes para uma simulação através do método de elementos discretos (Dem Solutions, 2006).
- Módulo de acoplamento entre os softwares, descrevendo o comportamento do método e como a influência das partículas interfere no escoamento do campo fluido.

## 3. DESCRIÇÃO DOS SOFTWARES

### 3.1. Ansys Fluent<sup>®</sup>

O ANSYS FLUENT<sup>®</sup> é historicamente conhecido por sua grande robustez no cálculo de escoamentos de fluidos, principalmente em se tratando de escoamentos multifásicos. No que diz respeito aos problemas multifásicos envolvendo sólidos granulares, diversas abordagens vem sendo desenvolvidas recentemente, principalmente para tentar reproduzir de maneira satisfatória problemas em que a fração volumétrica de sólidos é muito alta.

Mesmo com os avanços obtidos, uma grande limitação ainda é encontrada, principalmente quando a deposição de sólidos é um fenômeno importante no processo. O empacotamento de partículas (packing) é um processo ainda difícil de ser reproduzido pelos atuais códigos de CFD.

Na atual abordagem, o software ANSYS FLUENT<sup>®</sup> realiza metade do processo iterativo, efetuando apenas o cálculo do escoamento do domínio fluido (líquido). As informações a respeito da posição e velocidade das partículas são obtidas através do módulo de acoplamento entre o ANSYS FLUENT<sup>®</sup> e o EDEM<sup>®</sup>, melhor descrito adiante. Apesar de o modelo matemático utilizado envolver uma fase discreta (partículas do gravel), o ANSYS FLUENT<sup>®</sup> "enxerga" a fase sólida como contínua, através da média volumétrica do número de partículas em cada uma das células computacionais.

As hipóteses assumidas para a formulação do modelo matemático no software Fluent são as seguintes:

- Propriedades físicas constantes;
- Fluido newtoniano;
- Regime transiente;
- Escoamento turbulento;
- Fases estão misturadas em escala macroscópica (campos de velocidade diferentes para o sólido e para o líquido).

### 3.2. DEM Solutions EDEM<sup>®</sup>

O método de elementos discreto (*DEM - Discrete Element Model*) é uma metodologia que vem cobrir uma grande lacuna existente nos modelos contínuos de duas fases para simular escoamentos de partículas. O desenvolvimento do

método de elementos discretos teve início em 1971, mas o grande desenvolvimento da metodologia foi a partir do início dos anos 90 (Dem Solutions, 2008).

Nessa abordagem, é realizada a simulação do problema discreto. DEM é capaz de capturar a natureza dual do escoamento granular, o qual se comporta como uma fase sólida e uma fluida. O comportamento dessa fase "fluida" resulta da interação coletiva de cada objeto individual (partícula discreta). A principal vantagem da metodologia é a possibilidade de obter dados em escala de partícula.

O método de elementos discretos consiste em três princípios básicos:

- Interação das partículas modeladas através de contatos, onde todos os contatos são considerados, partícula-partícula e partícula-geometria.
- Movimento da partícula modelado através do balanço de forças em cada uma das partículas do domínio.
- Esquema de discretização explícita no tempo com algoritmos de diferenças finitas.

Tipicamente as partículas podem ter qualquer formato, são consideradas elásticas e não sofrem deformações permanentes. Dentro desse contexto, o EDEM<sup>®</sup> é o principal software para a simulação através do método de elementos discretos, desenvolvido principalmente para estudos na área de óleo e gás, química, farmacêutica e mineral.

### 3.3. Módulo de Acoplamento EDEM-Fluent

O módulo de acoplamento desenvolvido pela DEM Solution para sincronizar os softwares EDEM e Fluent apresenta diferentes parâmetros de controle, a serem ajustados para uma melhor convergência e rapidez dos resultados. Basicamente, o loop de interações entre o código de CFD e o código de DEM funciona conforme mostrado na Figura 1.

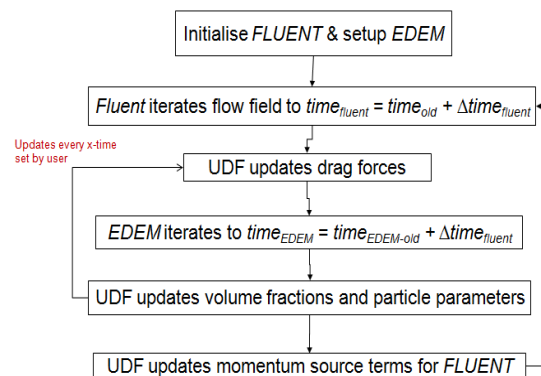


Figura 1. Loop de iterações no acoplamento EDEM-Fluent

O cálculo do acoplamento é iniciado com o primeiro passo de tempo do escoamento da fase fluida. Por simplificação, assume-se que nesse ponto temos um escoamento completamente desenvolvido.

Quando as iterações para o primeiro *timestep* convergem, informações a respeito do campo de velocidade são passadas para o EDEM, o qual calcula a força de arraste em cada partícula. Nesse momento o EDEM inicializa as iterações até atingir o passo de tempo determinado pelo Fluent.

Ao ser alcançada a sincronização em relação ao tempo físico de simulação, o Fluent recebe informações sobre a velocidade e posição das partículas. Com esses dados, é calculado em cada célula do domínio fluido a fração volumétrica de sólidos e um termo fonte, baseado na força de arraste, conforme descrito no parágrafo anterior. A fração volumétrica de sólidos dentro de cada célula computacional do Fluent é obtido através dos chamados *Sample Points* (pontos de amostragem). Os *Sample Points* são pontos regulares que demarcam cada partícula. A Figura 2 ilustra uma partícula quando 64 *Sample Points* estão presentes.



Figura 2. Sample Points em uma partícula do EDEM

## 4. METODOLOGIA DE ANÁLISE

Um trabalho de simulação numérica em dinâmica dos fluidos computacional é constituído de basicamente cinco etapas: determinação da geometria, geração da malha computacional, setup físico, solver e pós-processamento.

### 4.1. Geometria

O número de partículas existentes em uma geometria no processo real de *gravel packing* é enorme, sendo completamente inviável a simulação com os recursos computacionais disponíveis atualmente. Para se ter uma idéia da dificuldade do problema, em uma operação onde são bombeados sete barris por minuto de fluido (velocidade = 0,019 m<sup>3</sup>/s), o fluxo de partículas é de aproximadamente 6,5 milhões por segundo, com uma fração volumétrica de sólidos de apenas 0,043. Como o método de elementos discretos calcula os choques e interações em cada uma das partículas, o presente domínio torna-se absurdamente custoso do ponto de vista computacional.

A geometria real é composta por diversos dutos concêntricos. Um esquema dessa geometria real pode ser visualizado nas Figuras 3(a) e 3(b).

Portanto, o domínio de cálculo utilizado no presente estudo foi simplificado e passou a ser bidimensional, já que busca apenas manter o princípio de operação do processo de *gravel packing* e verificar a modelagem desenvolvida com base no acoplamento de técnicas de CFD e de DEM.

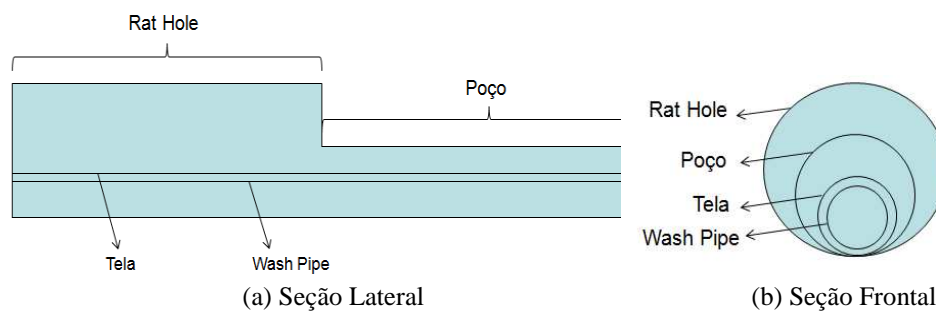


Figura 3. Geometria Real - Processo de *Gravel Packing*

### 4.2 Malha Computacional

O objetivo é dividir o domínio de cálculo em elementos suficientemente pequenos para capturar os gradientes de velocidade e outras variáveis existentes no escoamento (Maliska, 2004). São nesses volumes de controle que serão aplicadas as equações de conservação que descreverão o modelo matemático proposto.

Para o estudo do processo de *gravel packing*, simulações bidimensionais foram realizadas. Desta forma, apenas um elemento discreto é necessário para representar a espessura do domínio de cálculo. Para esse caso foi gerada uma malha hexaédrica, a qual pode ser visualizada na Figura 4. A malha computacional gerada para representar o *rat-hole* e parte do poço aberto teve um tamanho final de aproximadamente 9.000 nós.



Figura 4. Malha Superficial

### 4.3 Setup Físico

Nesta etapa, também chamada de Pré-Processamento, são determinadas as condições físicas de operação e os modelos matemáticos propostos para descrever o escoamento. Para o caso, aqui estudado, foi considerado fluido incompressível escoando sob regime turbulento. Para representar o movimento das partículas, as forças que atuam sobre as mesmas são:

- Forças de contato entre as partículas;
- Forças de contato entre as partículas e a geometria (paredes);
- Força de arraste devido à presença da fase fluida escoando.

Observa-se que as forças de coesão entre as partículas não foram consideradas nesta abordagem até o momento, mas podem ter influência significativa. Seus efeitos serão avaliados futuramente.

Para a fase fluida, foram assumidas as seguintes hipóteses:

- Propriedades físicas constantes: massa específica do fluido =  $1114 \text{ kg/m}^3$ ; viscosidade =  $0,001 \text{ kg/m.s}$ ;
- Regime turbulento (Modelo  $k-\epsilon$ ) e transiente (Passo de tempo =  $1 \times 10^{-5} \text{ s}$ ).

As condições de contorno para fechamento do problema foram obtidas dos dados reais de campo, e são descritas a seguir.

- Condição de contorno na entrada (*Inlet*): velocidade prescrita ( $0,26 \text{ m/s}$ ) – equivalente a uma vazão de 7 barris por minuto na geometria proposta;
- Condição de contorno na saída (*Outlet*): pressão prescrita (pressão atmosférica);
- Paredes do poço: condição de não-deslizamento;
- Paredes laterais da geometria: condição de simetria (simulação bidimensional).
- Modelagem da tela: a perda de carga do fluido ao passar pela tela é desprezível. Nessas condições, assumiu-se a hipótese de que essa tela não existe no domínio fluido, apenas no domínio das partículas. Essa situação modela a superfície filtrante, já que a medida que as partículas se depositam na tela, surgirá a resistência do fluido em passar pelo meio poroso formado (leito de gravel).

Para as partículas, foram assumidas as hipóteses:

- A criação das partículas é distribuída uniformemente em toda a seção do poço ou *rat hole*. O lançamento das partículas foi testado em duas diferentes posições: No poço e no *rat hole*, conforme mostra a Figura 5.
- Partículas com formato esférico, com diâmetro de  $1,26 \text{ mm}$  (Figura 6);
- Massa específica das partículas =  $2400 \text{ kg/m}^3$ ;
- Forças de coesão desprezíveis.

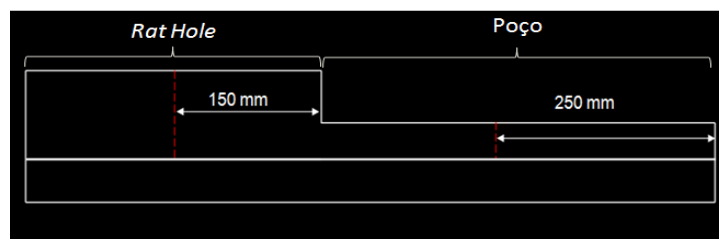


Figura 5. Posição do lançamento de partículas

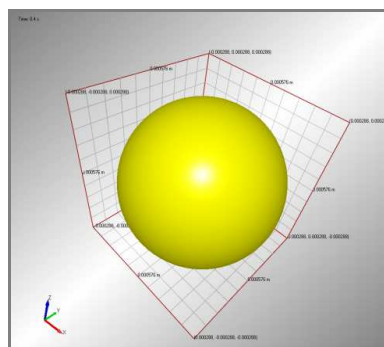


Figura 6. Partícula de grama modelada

#### 4.4 Solver do Sistema Linear

O código ANSYS Fluent CFD tem seu solver estruturado para resolver o problema através do método dos volumes finitos, o que fornece grande robustez e precisão nos cálculos. Neste estudo inicial, optou-se por um critério de convergência para o resíduo médio das equações (RMS) no valor de  $10^{-3}$ , perfeitamente aceitável para escoamentos multifásicos (FLUENT, 2009). O acoplamento pressão-velocidade é resolvido através do método SIMPLE (Patankar, 1980), e a discretização do momento bem como as equações de turbulência são resolvidas através do método *First Order Upwind*.

### 5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Os resultados a serem descritos mostram, em caráter preliminar, a reprodução numérica da deposição de partículas durante o processo de *Gravel Packing*. O principal objetivo é testar a metodologia e a modelagem desenvolvida, observar características do transporte horizontal de sólidos particulados, bem como testar se as simulações numéricas conseguem captar e reproduzir o fenômeno de embuchamento prematuro que muitas vezes ocorre no rat-hole de poços horizontais (Magalhães et al., 2006 a). Este fenômeno, se observado nas simulações, poderia ser usado como uma validação qualitativa da modelagem.

O primeiro caso testado foi o mais simplificado, visando verificar a capacidade da metodologia em trabalhar com altas concentrações volumétricas de sólidos particulados, tecnicamente chamado de propante. A concentração de sólidos enquanto os mesmos estão em suspensão não é muito alta, mas a partir do momento em que as ondas alfa e beta se formam, o nível de empacotamento é muito alto. Esse primeiro teste teve como objetivo principal reproduzir as ondas alfa e beta típicas do processo de *gravel packing* (Magalhães et al., 2006 b).

A Figura 7 ilustra diferentes instantes de tempo dessa simulação, onde as partículas estão coloridas com a magnitude da velocidade. Os resultados mostraram-se bastante satisfatórios. As propagações das ondas alfa e beta foram reproduzidas, qualitativamente, com sucesso e a simulação foi numericamente estável.

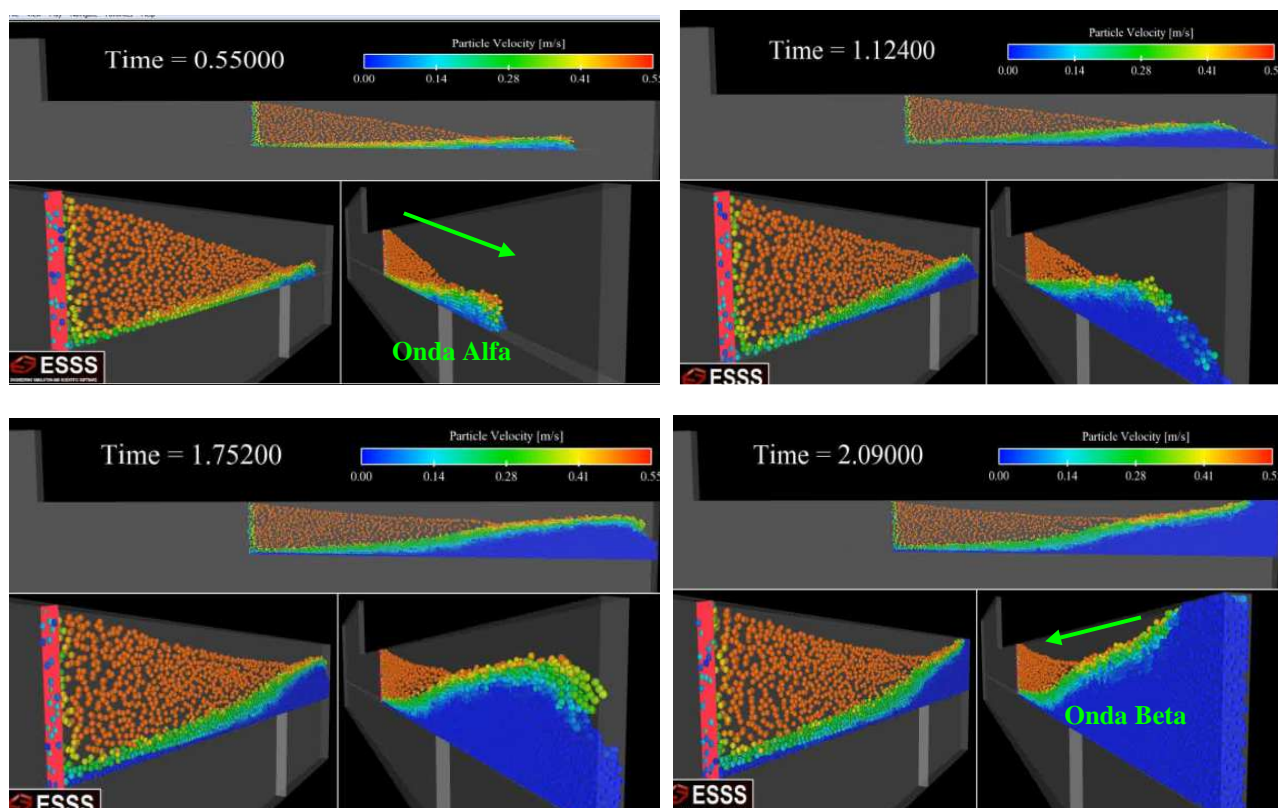


Figura 7. Sedimentação das partículas do gravel através das ondas Alfa e Beta

A perda de carga do fluido durante o deslocamento das partículas também apresenta comportamento qualitativamente coerente, conforme mostra Figura 8. Nesta, o plano de corte está colorido com a fração volumétrica de sólidos. Observe-se que à medida que o leito fica mais espesso, após o início da onda beta, a perda de carga aumenta consideravelmente, pois o fluido só poderá passar pelo meio poroso do leito. Este comportamento é condizente com o que é observado nas operações de campo e mostra o excelente paralelo entre as simulações numéricas e a realidade.

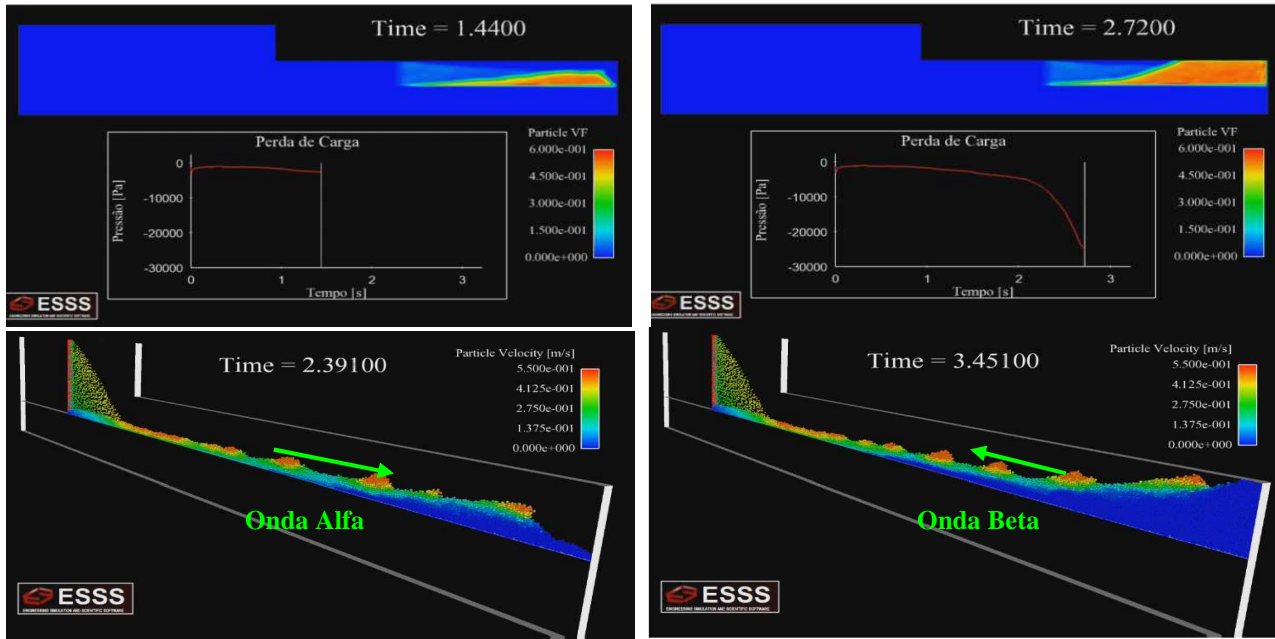


Figura 8. Acúmulo de sólidos e perda de carga observada para as ondas alfa e beta

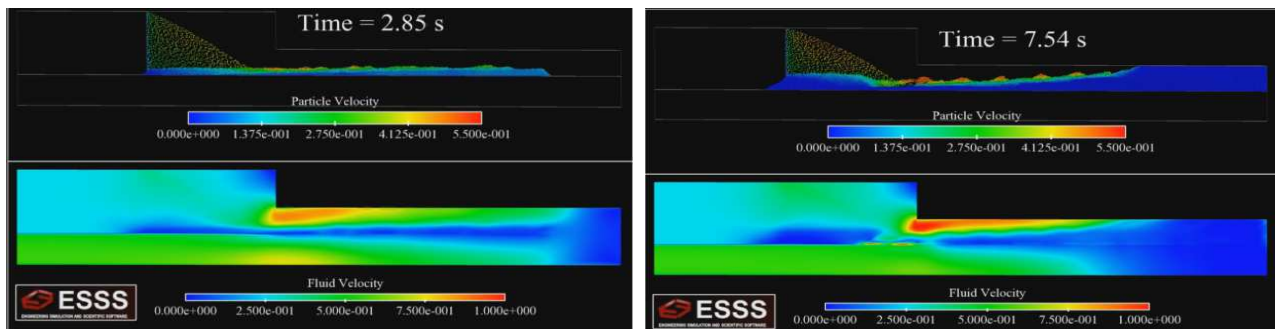


Figura 9. escoamento das fases sólida (partículas de granel) e contínua (fluido carreador)

No início da simulação representada na Figura 9, o escoamento na região do poço está praticamente estagnado, mas à medida que os sólidos se depositam, o campo de velocidade é influenciado pela distribuição das partículas. Observou-se, também, que ocorre forte aceleração do fluido na região de estrangulamento. Esta aceleração é uma consequência da condição de contorno usada (vazão definida) e ocorre, basicamente, para evitar o empacotamento excessivo e obstrução do canal de passagem por parte das partículas, ou seja, evitar o embuchamento prematuro no rat-hole. Observou-se, portanto, que o acoplamento entre os softwares está funcionando a contento e o campo de velocidade calculado no FLUENT influencia as partículas sólidas (gravel) e vice-versa. A figura 10, a seguir mostra o CFD onde a vazão de bombeio foi progressivamente reduzida até que se atingisse o embuchamento prematuro.

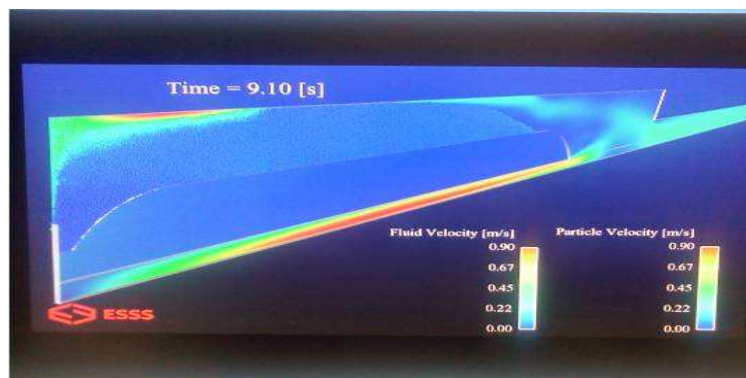


Figura 10. Simulação computacional (CFD) do embuchamento prematuro no rat-hole do poço

## 6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foi construído então um aparato experimental que representasse tanto o poço aberto quanto o rat-hole, para assim poder enxergar como se dá a deposição do Gravel ao redor das telas. Estes testes simularam, pela primeira vez, o deslocamento do Gravel Pack em um simulador físico de diâmetro real. Dotado de três janelas de visualização feitas em acrílico transparente. Nestas janelas foi possível aferir alturas de onda alfa e estudar a dinâmica de deposição das partículas sólidas na contração do rat-hole (12¼") para o poço aberto (8½"). Para a representatividade dos testes, o simulador físico foi equipado com telas e wash pipes reais, reproduzindo assim a dinâmica da operação em escala real.

Com o simulador físico foi possível: visualizar a deposição das partículas sólidas (gravel), testar novos materiais propantes, definir novas vazões mínimas de trabalho, novas concentrações de bombeio, bem como registrar, através de filmagem, a dinâmica da turbulência que ocorre na contração do rat-hole para o poço aberto, para futura comparação com as simulações em fluidodinâmica computacional (CFD). A figura 11 mostra o projeto do simulador físico.

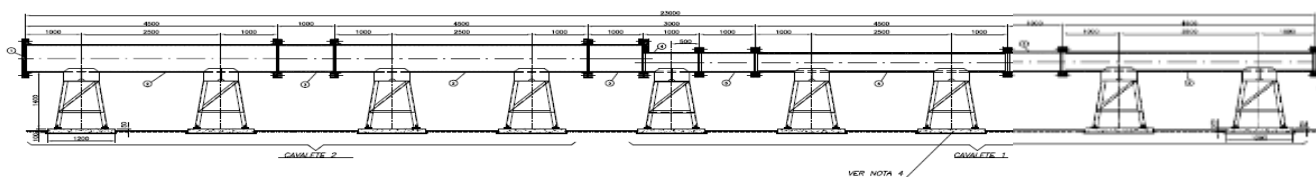


Figura 11. Simulador físico

A figura 12 a seguir, mostra uma foto tirada do simulador físico no momento em que a onda alfa passa pelo rat-hole. A janela de acrílico, mostrada na foto, permitiu a visualização da deposição dos sólidos e fitas de metal graduadas permitiram a aferição da altura do leito (altura da onda alfa).



Figura 12. Detalhe da janela de acrílico para visualização com o leito produzido pela onda alfa

O principal resultado experimental buscado neste trabalho, refere-se à coleta dos valores de altura de onda alfa para os diferentes materiais propantes utilizados (gravel), nas diferentes configurações de geometria e nas diferentes concentrações. A figura 13 mostra os resultados experimentais da altura de leito da onda alfa, no eixo y, para todos os testes realizados, em função dos resultados teóricos para altura de leito calculados através de simulações numéricas feitas num software de propriedade da Petrobras especialmente desenvolvido para simular o deslocamento e deposição de gravel (SimGPH) (Martins 2005), plotados no eixo x. Nesta comparação entre resultados experimentais e teóricos, quanto mais próximos os pontos estiverem da bissetriz do gráfico, melhor é o ajuste entre os valores observados e os calculados pelo software.

Resumindo os resultados, podemos dizer que os testes experimentais foram satisfatórios quanto à comparação com os resultados numéricos, já que a grande maioria dos pontos (81,63%) encontra-se dentro da faixa de erro experimental de 10% (linha pontilhada vermelha), que é perfeitamente aceitável para este tipo de análise.

As exceções nas quais os desvios entre os valores calculados e os experimentais ultrapassam os 10% se deram basicamente nos testes onde ocorreram problemas devido à estabilização na vazão de bombeio ou pela formação de grumos (aglomerados de propante) durante o bombeio.



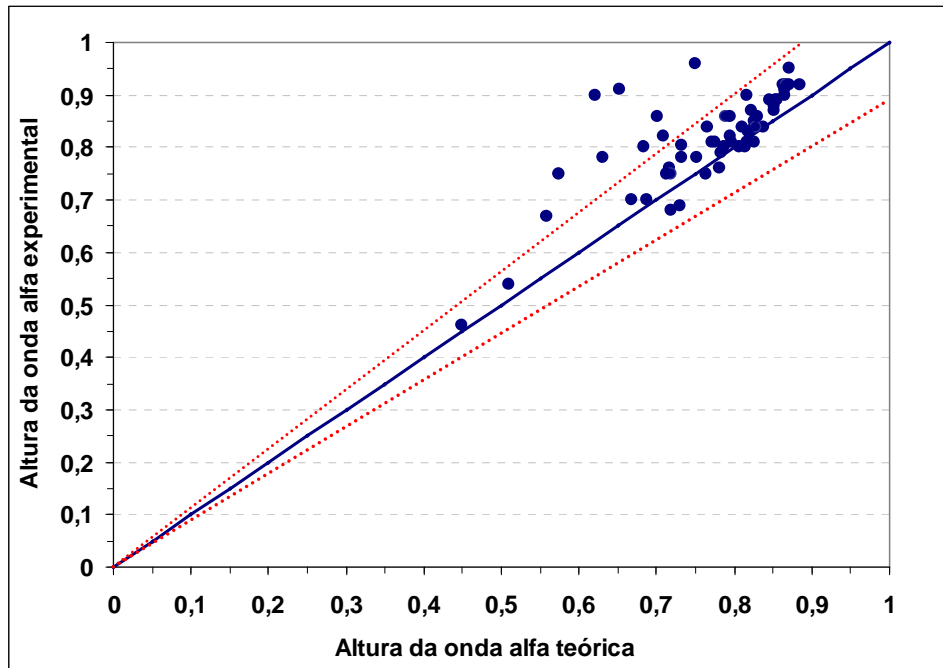


Figura 13: Comparativo dos resultados experimentais versus resultados teóricos para altura da onda alfa

A figura 14 a seguir mostra a simulação feita, em CFD, para aferição da altura de leito da onda alfa, onde o resultado foi comparado com o resultado experimental de altura de leito tirado do teste experimental (fig. 12) para os mesmos dados de sólido, vazão e demais parâmetros de escoamento.

O resultado numérico aponta para uma altura de leito entre 85,96% e 86,26% nas posições 1 e 2, onde temos o leito estabilizado, enquanto que o resultado experimental é de 85%. Isto mostra o excelente ajuste da simulação numérica com a realidade. Portanto, uma vez calibrado os parâmetros numéricos do CFD, tais como, coeficientes de restituição de choques entre as partículas, forças de contato partícula-geometria e forças de arraste devido à presença da fase fluida, poderemos ampliar os testes para uma extensa matriz numérica. Podendo simular diferentes condições de escoamento, novos materiais sólidos (gravel) e diferentes geometrias. Este é o principal objetivo das simulações em CFD, pois uma vez calibradas elas nos dá a chance de simular inúmeras condições diferentes de escoamento, fornecendo resultados fidedignos a um custo muito menor que os testes experimentais.

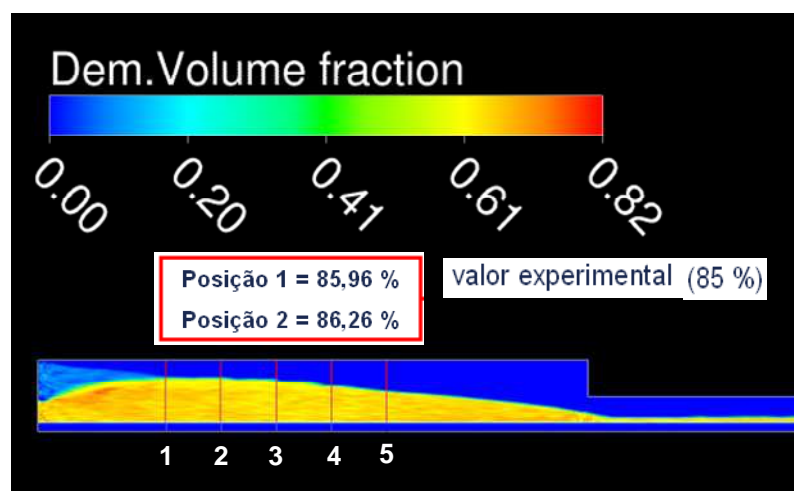


Figura 14: Comparativo entre simulação numérica (CFD) e experimento para a altura do leito da onda alfa.

## 7. CONCLUSÕES

- Em geral, os resultados da abordagem CFD-DEM mostrados no presente trabalho apresentam resultados fisicamente coerentes. Características do escoamento, como perfis de velocidade, perda de carga, fluxos volumétricos, fração volumétrica puderam ser mensurados e avaliados através dos métodos numéricos de análise. Na verdade, alguns desses valores só poderiam ser mensurados através de cálculos de modelagem computacional.
- A reprodução com sucesso das ondas alfa e beta reforçam a robustez da metodologia de CFD para abordar problemas onde o transporte horizontal de sólidos se faz necessário.
- A correta modelagem do meio filtrante (tela) se torna extremamente necessário para obter resultados mais coerentes, pois parte do escoamento passa pelo anular tela/wash-pipe o que leva a diferenças significativas na altura da onda alfa, restringindo o escoamento na parte superior da duna onde é observada uma aceleração do fluxo.
- Os resultados se mostram promissores, tanto pelo bom ajuste já alcançado entre a altura da onda alfa, calculada e experimental, quanto pelo embuchamento prematuro no *rat-hole*, já observado.

O principal objetivo da continuação deste trabalho é se aproximar progressivamente de um caso real de operação, gerando resultados que possam auxiliar na compreensão do problema e ter utilidade para formulação de melhorias no processo. Grande parte da física envolvida no problema foi modelada com sucesso, sendo hoje o fator computacional o maior limitante na extrapolação para casos reais.

## 8. REFERÊNCIAS

- ANSYS INC., 2009, Fluent User Guide.  
DEM SOLUTIONS, 2006, EDEM<sup>®</sup> User Guide.  
DEM SOLUTIONS, 2008, EDEM Training Guide.  
Magalhães (a), J.V.M., Calderon, A., Martins, A.L., 2006, "Gravel Pack Placement Limits in Extended Horizontal Offshore Wells", SPE Drilling and Completion, Vol. 22, No 3, pp. 193-197.  
Magalhães (b), J.V.M., Calderon, A., Martins, A.L. Leal, R.A.F., 2006, "Estudos para Deslocamento de Gravel Pack em Poços Horizontais Extensos em Cenários de Óleos Pesados", ENAHPE 2006. Domingos Martins - ES.  
Maliska, C. R., 2004, "Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional". São Paulo: 2<sup>o</sup> Ed. LTC.  
Marques, L. *et al.*, 2007, "The 200<sup>th</sup> Openhole Gravel-Packing Operation in Campos Basin: A Milestone in the History of Petrobras Completion Practices in Ultradeep Waters", Paper SPE apresentado na 2007 SPE European Formation Damage Conference, Scheveningen, Holanda, SPE 106364-MS. DOI: 10.2118/106364-MS.  
Martins, A.L., Magalhães, J.V.M., Calderon, A., 2005, "A Mechanistic Model for Horizontal Gravel Pack Displacement". SPE Journal. Vol. 10, No 3, pp. 229-237. SPE-82247-PA. DOI: 10.2118/82247-PA.  
Patankar, S.V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flows", Hemisphere Publishing Corporation, New York.

## 9. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.