

# MODELAGEM COMPUTACIONAL DA PRISÃO DIFERENCIAL DA COLUNA DE PERFURAÇÃO EM POÇOS NÃO CONVENCIONAIS

Denis A. F. de Souza<sup>1</sup>, Renato N. Elias<sup>1</sup>, José L. D. Alves<sup>1</sup>, Luiz Landau<sup>1</sup>, Alvaro L. G. A. Coutinho<sup>1</sup>, Rosana F. T. Lomba<sup>2</sup>, André L. Martins<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia (LAMCE) - COPPE/UFRJ, email:  [{denis, rnelias, jalves, landau}@lamce.ufrj.br](mailto:{denis, rnelias, jalves, landau}@lamce.ufrj.br), [alvaro@nacad.ufrj.br](mailto:alvaro@nacad.ufrj.br)

<sup>2</sup> CENPES / Petrobras, email:  [{rlomba, aleibsohn}@cenpes.petrobras.com.br](mailto:{rlomba, aleibsohn}@cenpes.petrobras.com.br)

## SINOPSE

A prisão diferencial da coluna de perfuração em poços de petróleo não convencionais é um fenômeno indesejável em uma operação de perfuração, pois pode levar a prejuízos como a suspensão das atividades da sonda ou até mesmo com o abandono do poço. A complexidade do problema exige estudos para sua compreensão e definição de um tratamento adequado.

Neste trabalho examina-se a modelagem computacional dos fenômenos envolvidos na prisão diferencial, visando desenvolver uma metodologia que aumente os conhecimentos sobre o problema e os parâmetros envolvidos e que possa vir a ajudar no dimensionamento de fluidos de perfuração. Emprega-se para tal modelagem o programa ANSYS Flotran na análise do escoamento de um fluido pelo anular de perfuração. Ao se integrar o ANSYS Flotran com um modelo de filtração cruzada, implementado separadamente, pode-se estimar a altura da torta de filtração e se obter informações sobre o comportamento do problema.

Como uma etapa adicional, vislumbra-se a avaliação das forças de torque e arrasto necessárias ao desprendimento da coluna. Para tal, novamente o programa ANSYS foi adotado para a modelagem do contato mecânico entre a coluna e a torta/parede do poço.

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização de poços horizontais ou de grande inclinação e afastamento, denominados poços não convencionais, são uma alternativa no desenvolvimento e exploração de novos campos ou na recuperação avançada de campos marginais e/ou maduros. Contudo, apesar da alta tecnologia empregada e sucessos obtidos com essas soluções, há que se conviver com o aumento do risco de prisão diferencial da coluna (1).

A prisão diferencial ocorre quando a pressão dos poros da formação é maior que a pressão hidrostática do anular, acarretando o aprisionamento da coluna. Durante uma operação de perfuração o fluido de perfuração é bombeado através da coluna até o fundo do poço, retornando em parte à superfície pelo anular formado entre a coluna de perfuração e a parede do poço. O fluido de perfuração, tem diversas funções, incluindo o controle das pressões de subsuperfície, a remoção de cascalhos, e a

refrigeração e lubrificação da broca e da coluna de perfuração. Um dos problemas que pode ocorrer durante a exploração de poços não convencionais é o assentamento e a prisão da coluna de perfuração devido às grandes inclinações e afastamentos dos poços, bem como ao diferencial de pressão, provocado quando parte do fluido de perfuração penetra para a formação rochosa e parte adere à parede do poço. Nesse caso, pode-se formar uma torta de filtração, que se muito espessa, pode contribuir para a prisão do equipamento de perfuração. O aprisionamento da coluna pode gerar prejuízos como a suspensão da operação e gastos excessivos com o aluguel da sonda e até mesmo com o abandono do poço. Diversos trabalhos (1,2,3) práticos para a compreensão, previsão, redução e possíveis diagnósticos foram desenvolvidos. Neste trabalho pretende-se empregar simulação computacional para se compreender os diferentes mecanismos físicos envolvidos no aprisionamento da coluna, fornecendo ferramentas para possível prevenção do problema.

A tecnologia de perfuração em poços não convencionais envolve diversos fenômenos físicos, tais como, um escoamento no anular de perfuração, a filtração e a invasão do fluido de perfuração para a formação rochosa (matriz porosa) e a formação de uma torta de filtração. Visando a compreensão desses fenômenos, uma modelagem computacional foi utilizada para abordar de maneira qualitativa o problema. O programa comercial ANSYS Flotran foi adotado para solução do escoamento de um fluido não Newtoniano pelo anular de perfuração. Com as análises desse escoamento, se obtém os perfis de velocidades nas vizinhanças das paredes do poço. Essas velocidades são utilizadas como dado de entrada do modelo de filtração cruzada, implementado separadamente, para o cálculo do crescimento e altura da torta de filtração. Caso se forme uma altura de torta relativamente pequena deve-se realimentar o modelo do escoamento atualizando a geometria do anular até uma condição de estabilidade. Agora, caso uma torta muito espessa for obtida pode-se pensar que este efeito tenha contribuído para prisão do equipamento. Portanto o objetivo dessas análises é integrar os mecanismos de cálculo e obter resultados qualitativos que ajudem na compreensão e futuramente na prevenção da prisão diferencial.

Uma etapa posterior seria o entendimento dos fenômenos envolvidos no desprendimento da coluna. Essa etapa se baseia na possibilidade de se avaliar forças de torque e arrasto necessárias ao desprendimento da coluna de perfuração, através de uma modelagem do contato mecânico entre a coluna e a torta/paredes do poço. Novamente para essas análises foram utilizados os recursos disponíveis no ANSYS, como uma abordagem mais rápida para o problema e também para uma avaliação quanto à sua utilização na resolução desse complexo problema da engenharia de poços.

Todos os desenvolvimentos, resultados e conclusões obtidos dos estudos e pesquisas são parte integrante do projeto FINEP/CTPETRO 793 intitulado *Estudos para Evitar Prisão de Coluna Durante a Perfuração em Poços de Grande Inclinação e Afastamento* realizado no Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia da COPPE, na Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Este trabalho se encontra organizado da seguinte maneira. Na seção 2 será feita uma breve descrição do problema de prisão diferencial, da influência da torta da filtração e sua relevância na perfuração de poços não convencionais. Na seção 3 serão dados

detalhes sobre a metodologia de cálculo empregada para tratar o problema. Na seção 4 é analisado um caso com dados de um poço real onde se avalia a influência de alguns parâmetros. Na seção 5 são apresentadas os desenvolvimentos preliminares para a análise de contato e finalmente as conclusões alcançadas.

## 2. PRISÃO DIFERENCIAL

O termo prisão diferencial já se tornou uma expressão comum na linguagem da engenharia de poços, de modo que o controle das pressões é monitorado para se detectar *a priori* qualquer surto de pressão que possa ocorrer, indicando um provável aprisionamento da coluna (1). A prisão diferencial da coluna ocorre quando a pressão dos poros da formação rochosa circundante ao poço é maior que a pressão hidrostática do anular. Este aprisionamento pode ser evitado com um melhor dimensionamento do fluido de perfuração, visando que a permeabilidade da torta decresça rapidamente. O fluido de perfuração tem como uma de suas funções a propriedade de controlar as pressões de subsuperfície para que não hajam efeitos indesejáveis à perfuração como o aprisionamento da coluna. Geralmente a presença de uma torta de filtração é benéfica, pois reduz a perda de fluido e o dano à formação, ou seja ajuda a manter a estabilidade dos poços. Por outro lado, se a torta é muito espessa, o diâmetro efetivo do poço é reduzido e podem surgir efeitos indesejáveis, tais como a indução de entupimentos e/ou um elevado diferencial de pressão no sistema, podendo contribuir para a prisão do equipamento, conforme esquematizado na Figura 1.

Além disso, um crescimento demasiado da altura da torta de filtração pode levar a um torque ou um arrasto excessivos na coluna de perfuração quando for necessária a remoção da coluna. Com as análises de contato descritas na seção 5 se pretende avaliar esses efeitos. Em casos de perfuração de poços não convencionais, o problema fica mais relevante devido a alta inclinação e afastamento do poço.

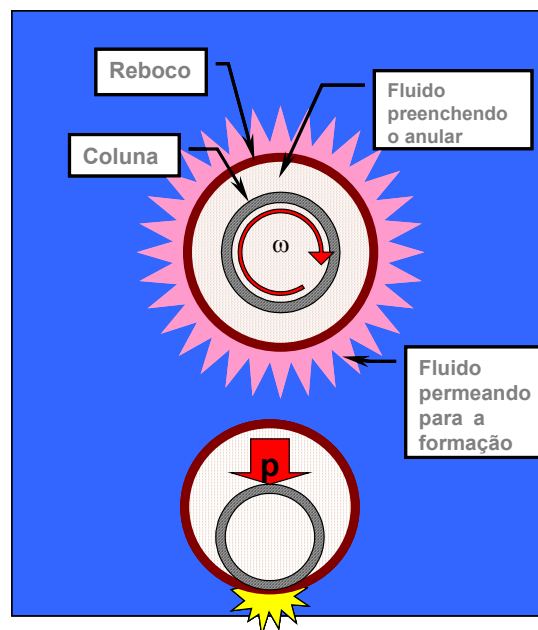


Figura 1. Esquema do problema de prisão diferencial.

### 3. METODOLOGIA DE CÁLCULO DO CRESCIMENTO DA TORTA

Em Fisher *et al* (4) é apresentada uma revisão da literatura em filtração dinâmica de fluidos de perfuração. Entretanto, devido à extrema complexidade dos fenômenos envolvidos, incluindo aí parâmetros fundamentais tais como os mecanismos de transporte de massa, a reologia dos fluidos de perfuração, a migração das partículas durante o carreamento, as propriedades hidrodinâmicas e físico-químicas da suspensão são ainda difíceis de se obter, mesmo que experimentalmente. Trabalhos recentes como o de Isambourg e Ottesen (5) tentam medir experimentalmente alguns desses parâmetros e propriedades dos fluidos de perfuração, mas sem muitas conclusões específicas. Sendo assim, Fisher *et al* (4) propõem um modelo numérico para a modelagem do crescimento de tortas de filtração e a invasão de fluidos na formação ao redor do poço. Este modelo possibilita o estudo com certo detalhe desses fenômenos para um dado conjunto de propriedades do fluido de perfuração. O emprego deste modelo permite que um determinado fluido seja projetado para que, além de suas funções primárias, seja capaz de produzir uma torta de filtração de baixa permeabilidade da forma mais rápida possível e, conseqüentemente, reduzindo os riscos de dano à formação e da prisão de coluna de perfuração.

A modelagem do crescimento da torta de filtração na parede do poço envolve fundamentalmente três mecanismos acoplados:

- O escoamento do fluido de perfuração no anular entre a coluna de perfuração e o poço;
- A invasão do fluido no meio poroso ao redor do poço;
- A filtração na parede do poço.

Um modelo para o escoamento do fluido de perfuração deve levar em consideração a geometria tridimensional do problema, a reologia do fluido (de comportamento não Newtoniano, em muitos casos), o movimento de rotação e a excêntricidade da coluna de perfuração. Além disso, se assume que as partículas sólidas seguem as mesmas trajetórias das partículas de fluidos e que a deposição das partículas sólidas no poço se dá apenas por efeitos hidrodinâmicos (4). Dada a existência de um modelo tridimensional de escoamento incompressível de um fluido não Newtoniano no ANSYS Flotran, este programa comercial foi adotado para realizar análises paramétricas de maneira rápida e facilitada. Uma geração automática dos *scripts* de execução para o ANSYS foi desenvolvida para a realização facilitada de análises paramétricas. Esse aplicativo encontra-se melhor descrito na seção 4. Os modelos de fluidos não Newtonianos podem ter diversas relações constitutivas que refletem sua reologia, descrevendo adequadamente o comportamento dos fluidos de perfuração. Neste trabalho pode-se adotar um fluido com comportamento tipo *Bingham* ou de Lei de Potências (*Power Law*). O segundo mecanismo modela a invasão do fluido de perfuração para a formação através das paredes do poço. Esse escoamento no meio poroso pode ser multifásico, onde pelo menos o fluido que invade a formação é não Newtoniano, dependendo tanto da formação quanto do fluido residente. Tal modelo não estava disponível no pacote ANSYS Flotran e foi desconsiderado nesta etapa. Para se avaliar a altura de torta um modelo simplificado de filtração cruzada (6) foi adotado e implementado. A seguir serão comentados os aspectos da modelagem do escoamento e da filtração.

### 3.1 Modelagem do Escoamento de Fluidos Não Newtonianos pelo Anular de Perfuração

O escoamento de um fluido incompressível não Newtoniano pelo anular de perfuração é considerado em regime permanente, laminar, e isotérmico. Essas hipóteses estão coerentes com a operação real pois não se deseja que ocorram transientes e surtos de pressão durante a perfuração e o bombeamento do fluido, de modo que uma análise permanente é suficiente para tratar o problema. O caráter isotérmico do sistema também é uma premissa uma vez que não se deseja que o fluido de perfuração tenha suas propriedades alteradas com as altas temperaturas que a broca atinge na perfuração.

### 3.2 Modelagem da Altura da Torta em Filtração Cruzada

O modelo de filtração cruzada adotado baseia-se no trabalho de Stamatakis e Tien (6). Esta modelagem envolve o cálculo das forças sobre uma partícula na superfície da torta para determinar a probabilidade da partícula aderir à superfície ao invés de ser transportada pelo escoamento cruzado, conforme esquematizado na Figura 2. O valor da probabilidade de adesão permite que o aumento da espessura da torta seja calculado em cada passo de tempo.

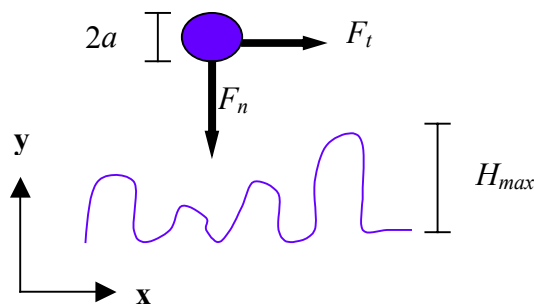


Figura 2. Representação esquemática do modelo de filtração cruzada.

As alturas das protuberâncias desta superfície irregular tem uma distribuição de probabilidade uniforme variando entre 0 e  $H_{max}$ , sendo  $H_{max}$  igual ao raio da partícula.

Uma vez tendo os valores das forças normal e tangente,  $F_n$  e  $F_t$ , os quais são calculados em função das componentes da velocidade do fluido, pode-se então partir para o cálculo da probabilidade,  $\beta$ , dessa partícula ficar presa na protuberância da torta, como se segue:

$$\beta = 1 - \left( 1 - \left( 1 + \frac{F_t}{F_n} \right)^2 \right)^{1/2} \frac{a}{H_{max}} \quad (1)$$

Esta probabilidade é então utilizada para calcular a taxa de crescimento da altura da torta. A taxa de crescimento da torta depende também da velocidade do fluido

permeante (obtida de maneira aproximada pela componente tangencial da velocidade do fluido) e de parâmetros do fluido e do raio do poço, pela seguinte expressão:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\varepsilon_s u \beta r_0}{(\varepsilon_c - \varepsilon_s)(r_0 - h)} \quad (2)$$

A equação (2) permite o cálculo do aumento da espessura da torta  $\delta h$  durante um pequeno intervalo de tempo  $\delta t$ . Usando o modelo de Happel (8), com a inclusão de um fator exponencial para representar o adensamento da torta com o tempo, a permeabilidade  $k_c$  é dada por

$$k_c = a_{eff}^2 \exp(-\alpha t) \left( \frac{2 - 3\theta_c + 3\theta_c^5 - 2\theta_c^6}{3\theta_c^3(3 + 2\theta_c^5)} \right) \quad (3)$$

onde  $\theta_c = \varepsilon_c^{1/3}$  e  $\alpha$  é uma constante de decaimento produzindo um decréscimo na permeabilidade da torta com o tempo  $t$ . Devem ser fornecidos valores empíricos para a constante de decaimento e para o valor efetivo do raio da partícula  $a_{eff}$ , o qual, como resultado dos efeitos de compressão e dos efeitos químicos, pode assumir valores diferentes do raio das partículas em suspensão.

Outro parâmetro a ser calculado é o fator de correção da Lei de Stokes na direção normal à formação da torta o qual é utilizado para o cálculo da força de arrasto lateral,  $C_n$ , expressa como:

$$C_n = 0.36 \left( \frac{k_c}{a^2} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (4)$$

São parâmetros típicos de um fluido de perfuração a viscosidade, a fração de volume de sólidos em suspensão e a densidade. Considerando os valores típicos desses parâmetros, de acordo com (4), verifica-se que as forças de sustentação e a força gravitacional agindo na partícula são várias ordens de magnitude menores que os valores das forças de arrasto hidrodinâmico e de arrasto resultantes das pressões cisalhantes.

Para o tratamento do modelo de crescimento da torta foi desenvolvido um programa simulando a evolução temporal da permeabilidade e a conseqüente formação da torta de filtração de acordo com o modelo aqui apresentado. Nesse algoritmo, os dados de entrada são o raio da partícula, a densidade do fluido, a densidade da partícula, a aceleração da gravidade, a velocidade do fluxo cisalhante (obtido pela análise do escoamento com o ANSYS Flotran), a fração de volume de sólidos na superfície da torta e nela mesma, o raio do poço, o diferencial de pressão entre o poço e a formação e a viscosidade do fluido.

Com esse procedimento numérico pretende-se avaliar como esses diversos parâmetros influenciam no crescimento da torta almejando conclusões sobre as variáveis relevantes no crescimento da torta e na possível prisão da coluna.

#### 4. RESULTADOS NUMÉRICOS DA METODOLOGIA DE FORMAÇÃO DA TORTA

Nesta seção serão apresentados resultados para um conjunto de dados de um poço real. Além disso, se pretende demonstrar como é feita a utilização dos recursos e sua integração para analisar o problema. Dados experimentais do fluido de perfuração foram utilizados para tratá-lo pelo modelo de *Bingham* ou de Lei de Potências. Os Parâmetros reológicos se encontram na Tabela 1 e a densidade do fluido é de 9.8 *lb/gal*.

Foi analisado um trecho de 1 metro, ao invés do comprimento real da coluna, pois a a solução das velocidades é helicoidal e tende a se repetir ao longo do eixo longitudinal.

O diâmetro externo (da formação) e interno (da coluna) são respectivamente de 12 ¼ e 8 ¾ polegadas. Uma alta excêntricidade de 0.8 foi adotada devida a inclinação de 76° com a vertical. Como condições de contorno foram utilizadas uma vazão de 675 g.p.m na entrada do anular (no sentido da broca para superfície) e uma pressão de referência prescrita nula na outra extremidade, caracterizando o escoamento de um fluido incompressível. Foi adotada uma rotação da coluna de 120 r.p.m. Foram realizadas uma análise para o fluido com comportamento de *Bingham* e outra para o de Lei de Potências.

**Tabela 1** Dados do fluido não Newtoniano para ambas reologias.

Reologia	Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade
<i>Bingham</i>	$\mu P$	Viscosidade Plástica	57.6721	cP
	$\tau_0$	Limite do Escoamento	14.9804	$\frac{lbf \cdot s^n}{100 \cdot ft^2}$
	$\mu_{New}$	Viscosidade Newtoniana	5767.21	cP
Lei de Potências ( <i>Power Law</i> )	$\mu N$	Viscosidade Nominal	unitária	cP
	$D_0$	Taxa de Deformação Limite	$10^{-6}$	$s^{-1}$
	K	Índice de Consistência	1.5869	$\frac{lbf \cdot s^n}{100 \cdot ft^2}$
	n	Exp. das Leis das Potencias	0.6329	adimensional

A análise proposta se resume na obtenção de um campo de velocidades nas proximidades das paredes do poço (formação rochosa) para se poder avaliar a altura da torta de filtração. O campo de velocidades é obtido a partir da análise do escoamento pelo anular de perfuração. Nesta etapa serão descritos os procedimentos

para uma análise dessa natureza utilizando o ANSYS Flotran. Além disso, de como se realizar a transição dos dados da geometria e perfil de velocidades do anular para um arquivo de entrada de dados do programa de filtração cruzada.

Neste ponto é importante ressaltar a utilização de um aplicativo para geração de *scripts* de execução do ANSYS. Essa geração automática dos *scripts* tem o objetivo de gerar as malhas, definir as propriedades do fluido e as condições de contorno de maneira facilitada para o usuário. Um esquema desse aplicativo se encontra na Figura 3. Ao serem gerados os *scripts*, pode-se realizar as análises do escoamento e se obter o perfil de velocidades resultante na coluna. Além disso a realização de análises paramétricas pode ser realizada de maneira rápida e facilitada.

Nas Figuras 4 e 5 são apresentados resultados na seção intermediária e em corte longitudinal para as 2 análises previamente citadas.

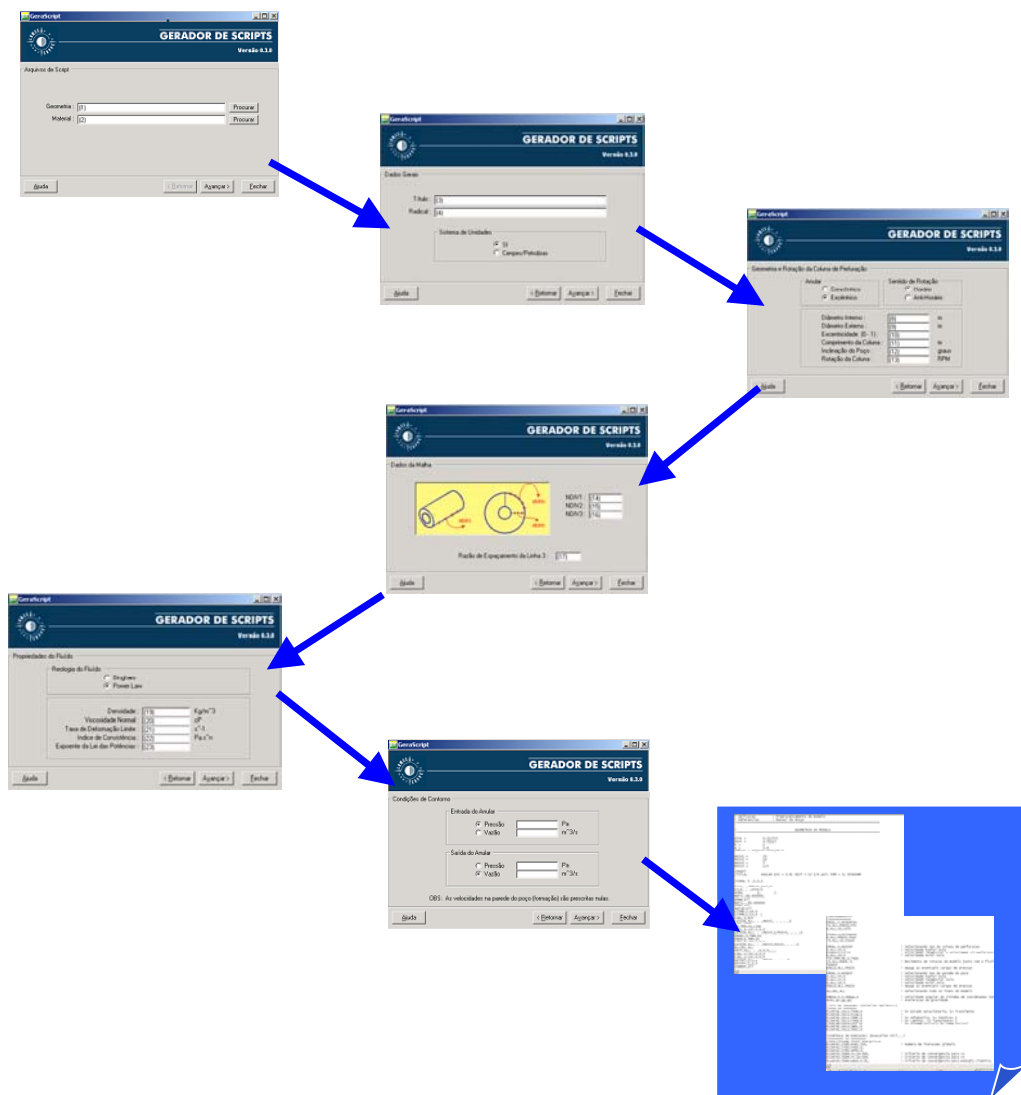
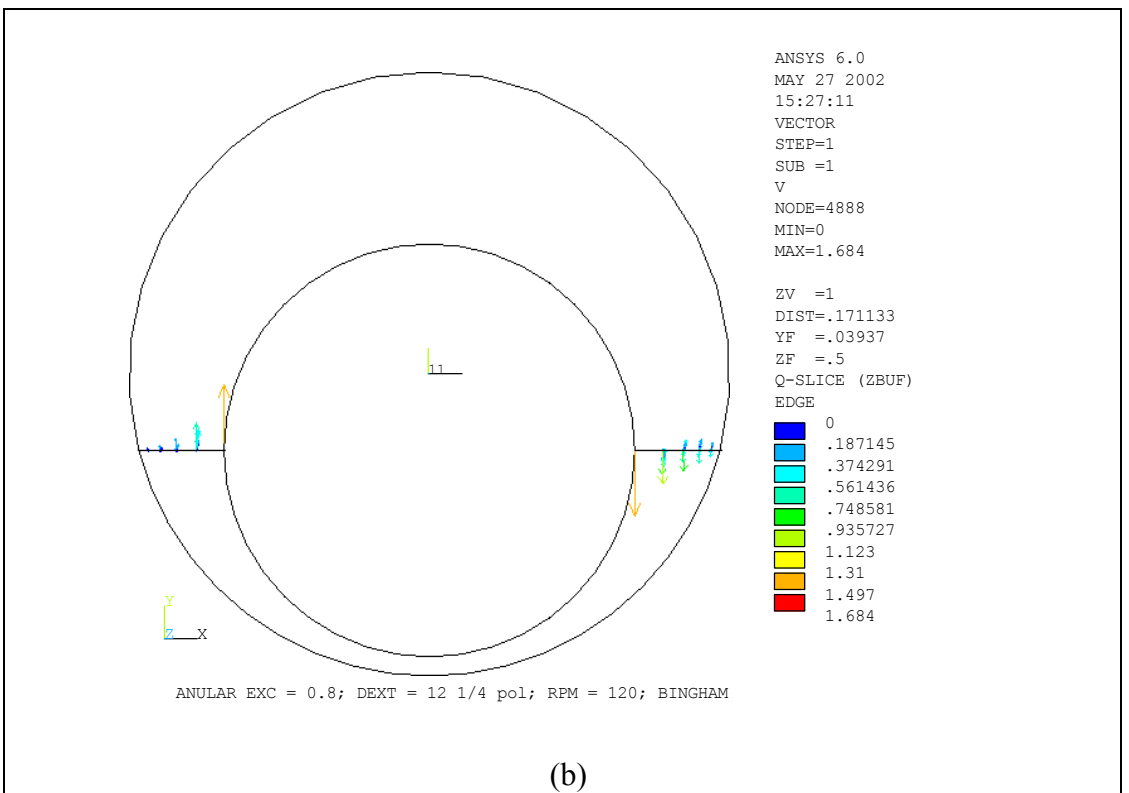
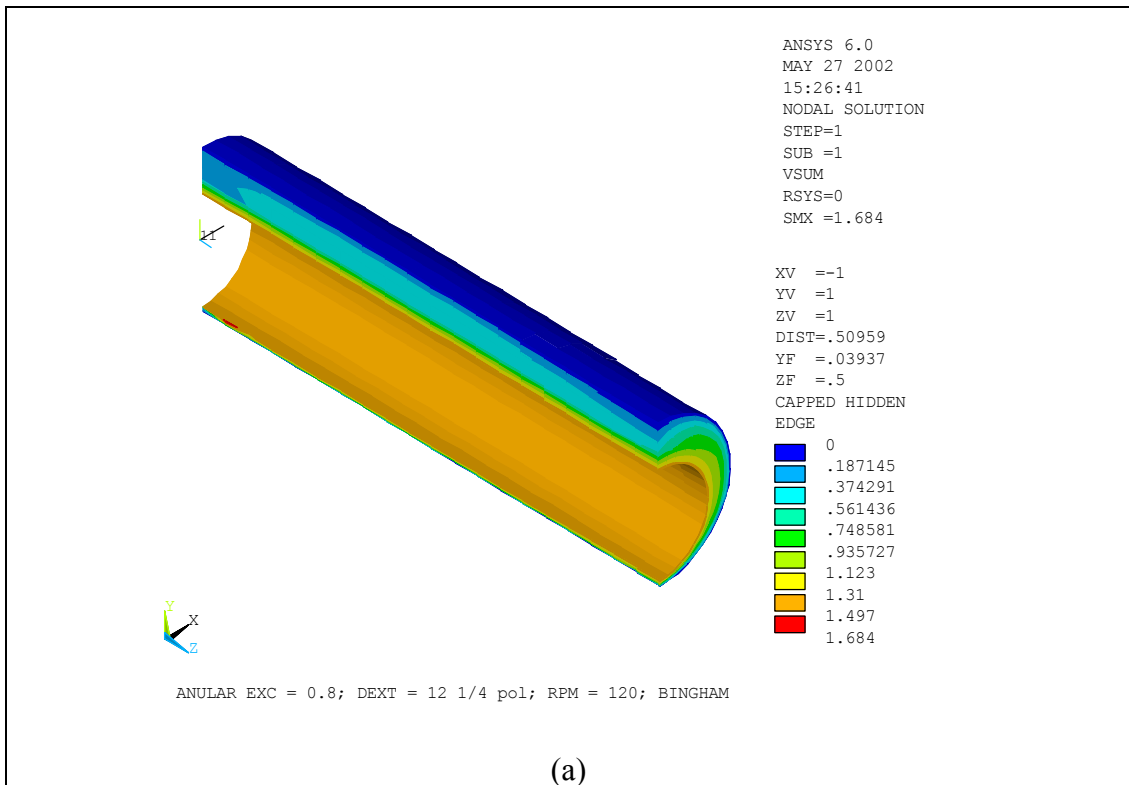
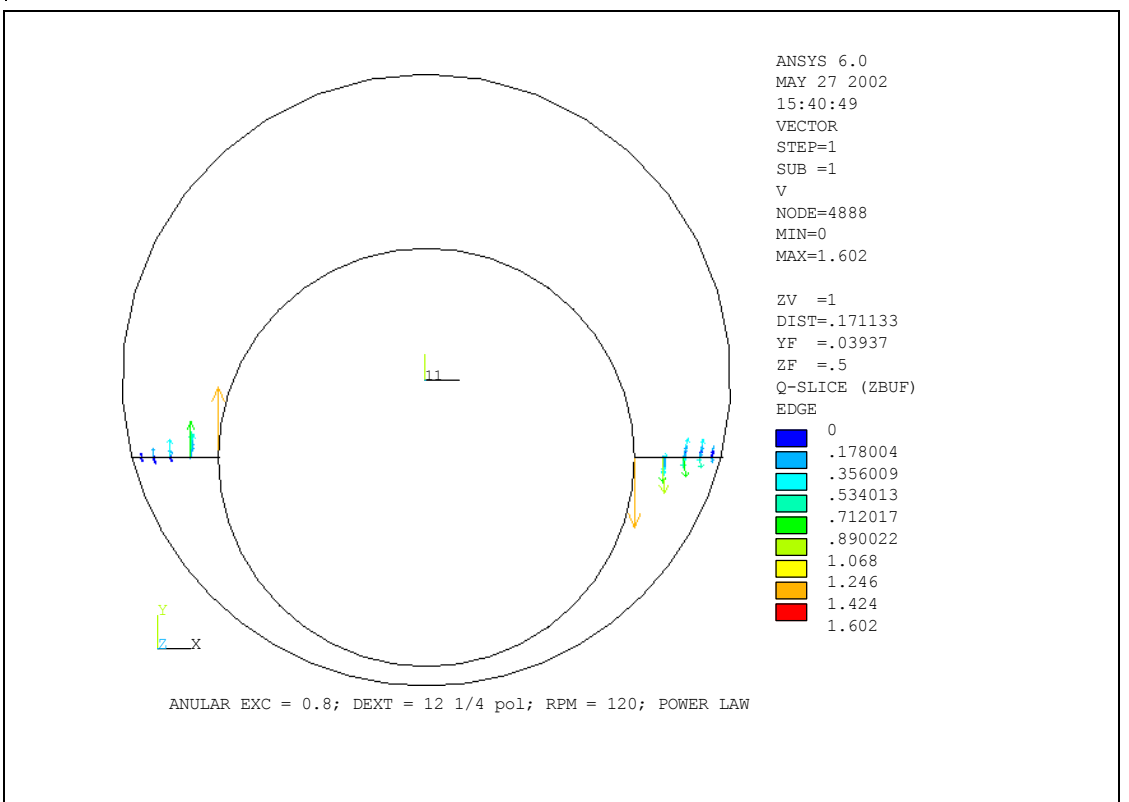
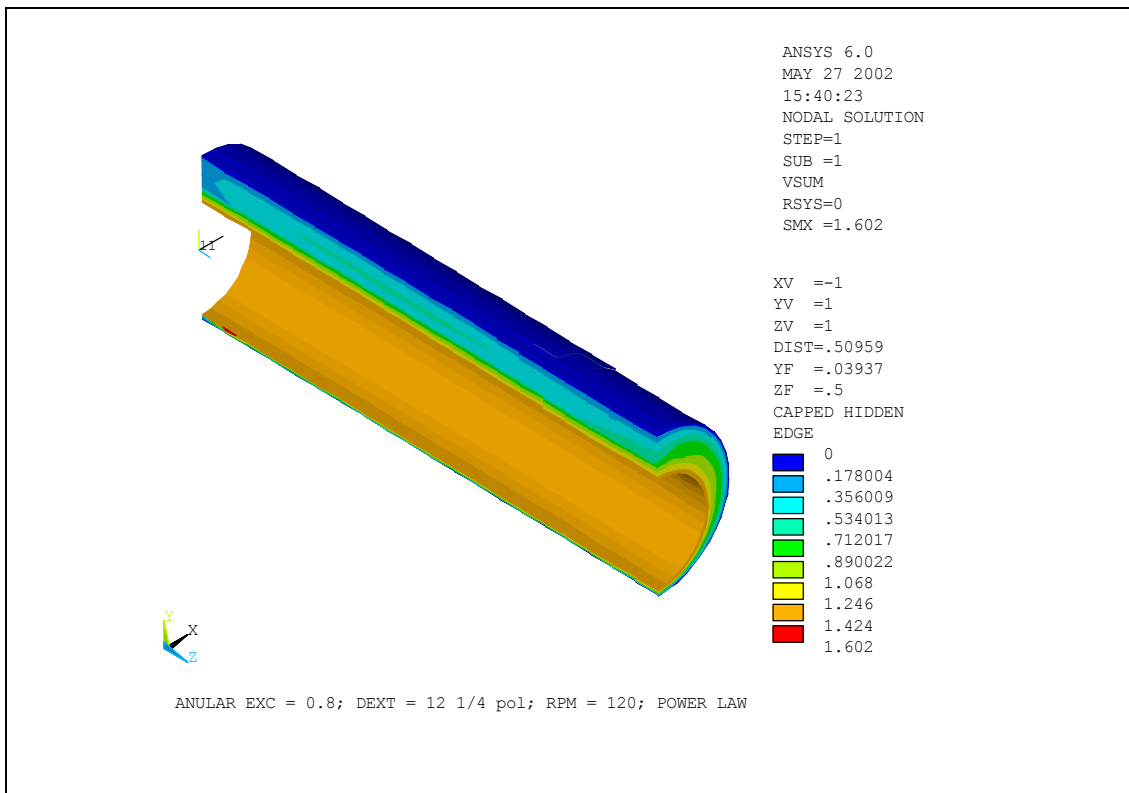


Figura 3 Aplicativo para geração automática de *scripts* para análise de escoamento.





**Figura 4** Resultados do campo de velocidades totais para o fluido *Bingham* com rotação de 120 r.p.m.: (a) em corte longitudinal; (b) em corte na seção intermediária

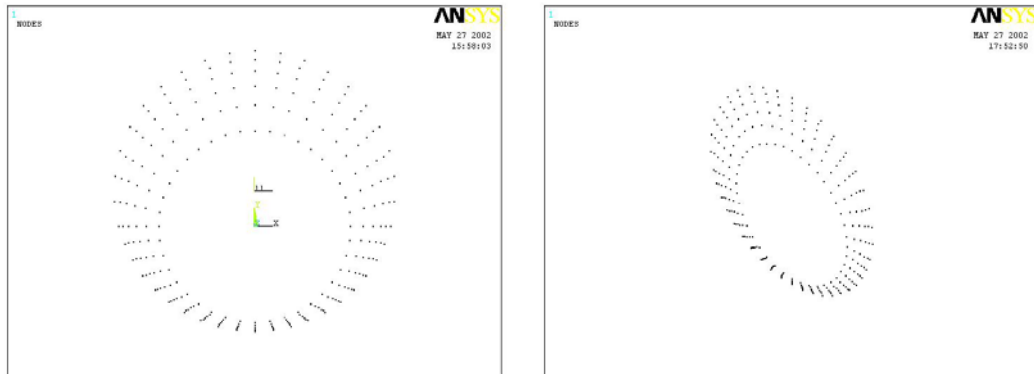


**Figura 5 Resultados do campo de velocidades totais para o fluido de Lei de Potências com rotação de 120 r.p.m.: (a) em corte longitudinal; (b) em corte na seção intermediária**

Com os resultados apresentados nas figuras acima, tem-se caracterizado o perfil de velocidades do escoamento. O próximo passo da metodologia é calcular a altura da torta de filtração para cada nó mais próximo da formação rochosa. Foi obtido o perfil de velocidades numa seção intermediária para se mostrar a seqüência de cálculos. Os nós em uma seção intermediária podem ser extraídos usando o comando abaixo na linha de comandos do ANSYS Flotran:

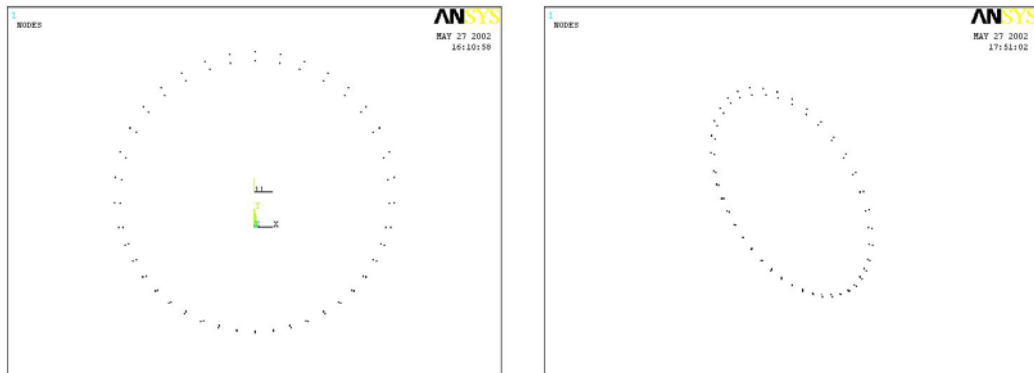
```
NSEL, S, LOC, Z, h/2-0.001, h/2+0.001
```

Os nós selecionados, para uma seção intermediária, estão representados na Figura 6.



**Figura 6 Nós da seção intermediária do modelo.**

Após selecionados esses nós, tem-se que selecionar os pares de nós mais externos, o que pode ser feito com o auxílio do *mouse* diretamente da interface gráfica do ANSYS Flotran. Os pares de nós mais externos se encontram listados na Figura 7.



**Figura 7 Pares de nós mais externos da seção intermediária do modelo.**

Dos pares de nós apresentados, tem-se os mais externos (pertencentes a formação) e os mais internos onde se tem a velocidade do fluido. Necessita-se das coordenadas dos nós externos e das velocidades dos internos. Para tal, basta listar as coordenadas e velocidades dos nós selecionados. Depois, para se montar os pares de nós, sabe-se que os pares de nós mais externos tem velocidade nula, pois essas foram condições de contorno prescritas. Partindo para o cálculo da altura da torta pelo programa de simulação de filtração cruzada, tem-se uma atualização da geometria do anular, isto é, uma nova coordenada para cada nó do modelo.

Os valores utilizados para as viscosidades foram de  $\eta_B = 71.78167 \text{ kg/m.s}$  para o fluido de *Bingham* e  $\eta_{PL} = 1.76929 \text{ kg/m.s}$  para o da Lei de Potências. Contudo, as viscosidades não alteram muito a espessura da torta para este modelo de filtração cruzada. Sendo assim o modelo não é muito sensível à viscosidade, por isso esta pode ser estimada de maneira aproximada.

As configurações atualizadas do anular, ou seja, reboco formado, para as duas análises com rotação da coluna de 120 r.p.m. se encontram esquematizadas na Figura 8, para valores de diferencial de pressão de 1000, 1400 e 1800 p.s.i.

Para o valor de diferencial de pressão fornecido de 1800 psi, obteve-se uma espessura de torta elevada, de ordem de centímetros, e se acredita que nesse caso a torta cresceu excessivamente, podendo ter contribuído para a prisão da coluna por prisão diferencial. Análises para diferenciais de pressão menores foram realizadas afim de se mostrar a forte influência do diferencial de pressão poço-formação sobre o crescimento da torta para o modelo implementado.

O valor da velocidade de rotação da coluna de perfuração é um parâmetro que altera consideravelmente a velocidade do escoamento, porém é um dado concreto e de fácil obtenção. Dada a dificuldade prática de se prever a excentricidade, aconselha-se sua variação ao se realizar os estudos e análises conforme experiência do analista.

Na Figura 9 é apresentada uma malha de elementos finitos para a nova configuração do anular, caso o sistema fosse realimentado e cálculos adicionais fossem necessários.

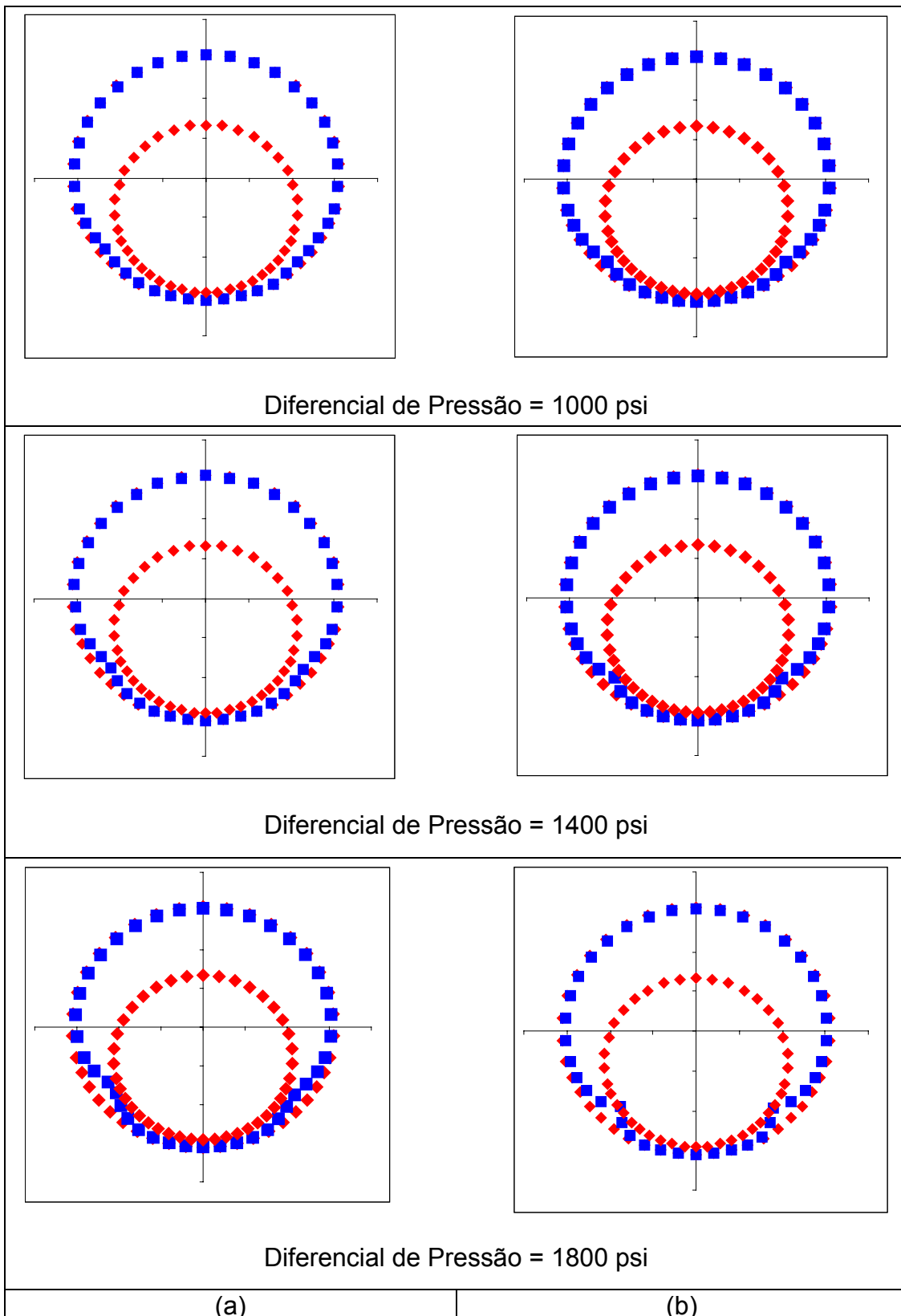
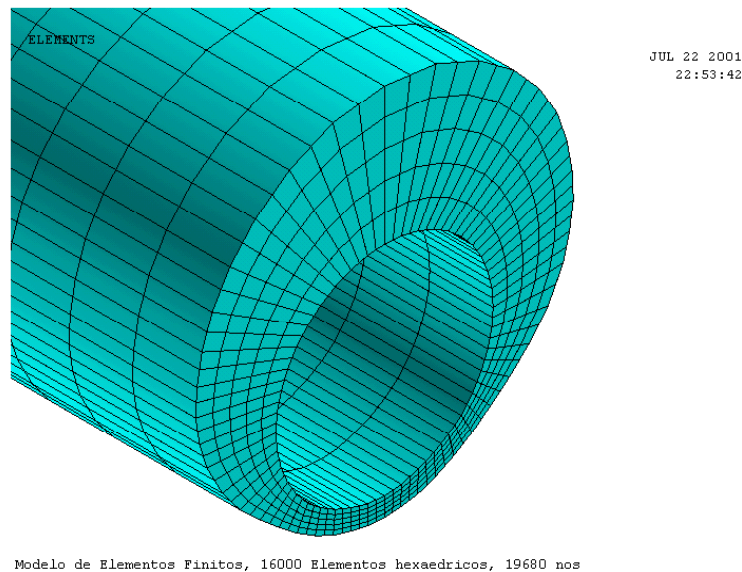


Figura 8 Configuração resultante do anular: (a) modelo de Bingham; (b) modelo de Lei de Potências.



**Figura 9** Malha com a geometria atualizada.

## **5. RESULTADOS PRELIMINARES PARA O PROBLEMA DE CONTATO**

Alturas excessivas da torta de filtração podem representar um problema no desprendimento da coluna e elevados custos com a locação da sonda devido a suspensão da operação. Torques ou forças de arrasto extremamente elevadas podem ser necessárias para o desprendimento da coluna. As análises de contato aqui desenvolvidas, em caráter preliminar, visam avaliar tais esforços necessários à liberação da coluna. Antes de se abordar o problema, houve uma série de desenvolvimentos para se aprender sobre as possibilidades de se realizar uma análise de contato no ANSYS (8,9,10).

Inicialmente foram realizadas análises testes, para se definir o tipo de elemento de contato a ser adotado bem como o tipo do comportamento desse contato. O primeiro teste foi de se analisar o contato bidimensional entre um corpo inicialmente em contato com outro, sendo forçado contra ele. A opção de uma superfície de contato contra uma linha rígida foi inicialmente analisada, ver Figura 10. Posteriormente foi analisada uma superfície flexível contra um superfície rígida de geometria simplificada, Figura 11. Após essas etapas já houve uma necessidade de se avaliar o contato dentre duas superfícies flexíveis já com a geometria do problema e cargas de torque, conforme apresenta a figura 12.

Finalmente, uma rigidez compatível com a coluna e com a torta/formação foi adotada e cargas de torque e forças verticais foram utilizadas para simular o desprendimento da coluna considerando diferentes tipos de contato, isto é, com ou sem adesão permanente, efeitos de coesão, atrito e deslizamento. Algumas dessas análises estão apresentadas na Figura 13. De posse destes resultados preliminares adotou-se o contato padrão do ANSYS com adesão como a maneira mais adequada para se tratar o problema. Sendo assim, foi possível a preparação de um modelo tridimensional

para se avaliar as forças de arrasto necessárias. Um resultado tridimensional preliminar está apresentado na Figura 14.

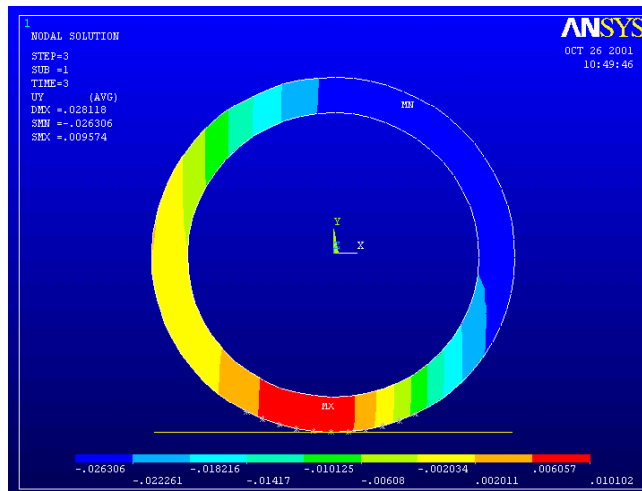


Figura 10 Modelo 2D de contato de superfície contra linha rígida.

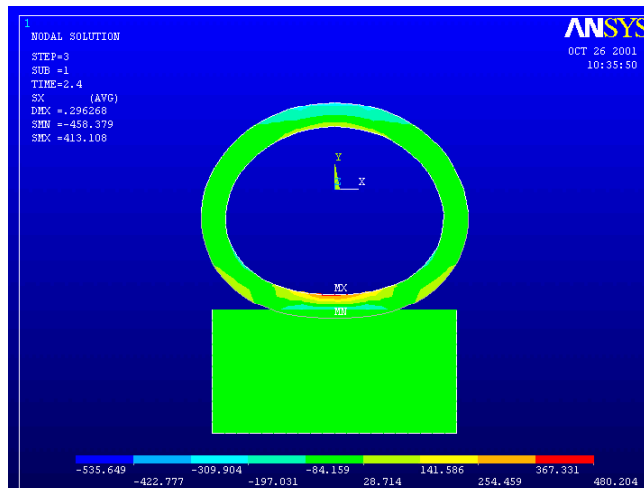


Figura 11 Modelo 2D de contato de superfície contra superfície rígida de geometria simples.

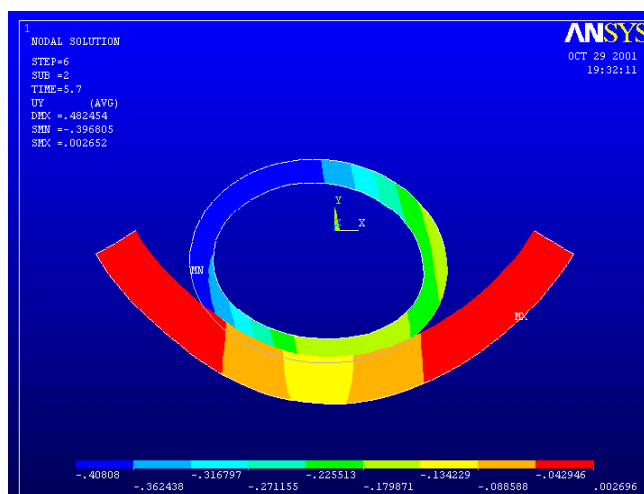


Figura 12 Modelo 2D de superfície flexível contra superfície flexível com geometria do poço.

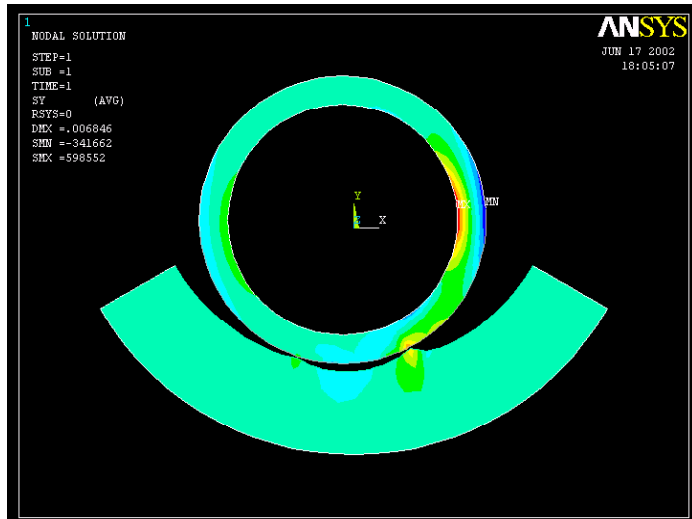
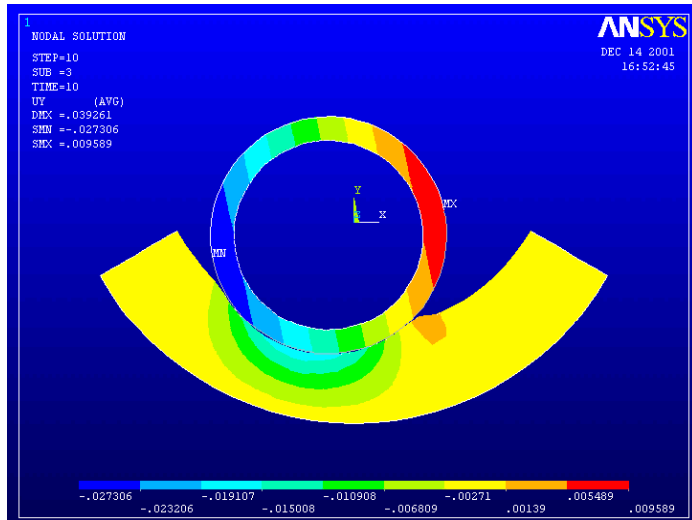


Figura 13 Resultados para o modelo 2D de contato de superfície flexível contra superfície flexível com geometria do poço para diferentes casos de adesão, atrito e escorregamento.

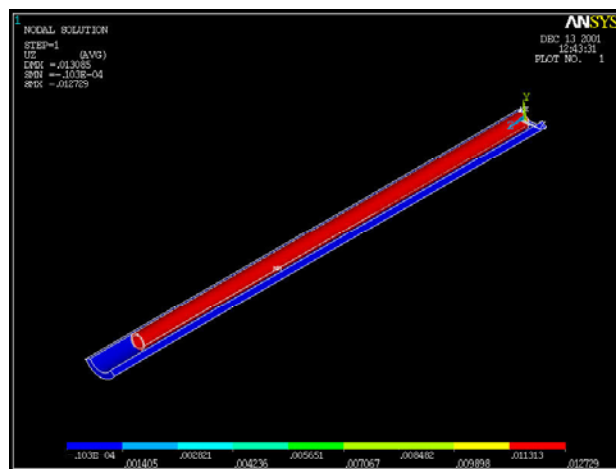


Figura 14 Resultados da simulação tridimensional.



Todos os resultados obtidos com essas análises foram meramente qualitativos. Mesmo nos últimos casos, apenas a geometria e módulos de elasticidade foram utilizados em uma faixa de valores reais. As forças de torque e arrasto bem como a rigidez normal e tangencial do contato foram estimados. Essa abordagem mostra a possibilidade de se simular tal situação, contudo a obtenção de parâmetros, principalmente para a torta de filtração são quase impraticáveis o que afasta as análises dessa natureza da realidade de campo. O programa comercial ANSYS apresentou boas condições para simulação desses fenômenos.

## 6. CONCLUSÕES

Uma metodologia computacional foi avaliada para se melhor compreender o problema de prisão diferencial. Um procedimento para se calcular o crescimento da torta de filtração foi adotada unindo o escoamento pelo anular de perfuração com um modelo de filtração cruzada. Com essas análises, pode-se avaliar a influência de diversos parâmetros na modelagem. Entre eles efeitos gravitacionais, de excêntricidade, das velocidades e do diferencial de pressão poço-formação. O programa comercial ANSYS foi adotado de maneira estratégica para se realizar de maneira rápida e facilitada as análises paramétricas através da construção de *scripts*. Algumas observações mais específicas foram feitas ao longo do texto, de como certos parâmetros podem influenciar a altura final da torta.

Por fim, a análise mecânica do contato entre a coluna e o poço utilizando o ANSYS se mostrou uma ferramenta interessante para se abordar o problema. Porém se esbarrou na impossibilidade de definição de certos parâmetros extremamente relevantes à análise de contato, tais como a rigidez normal e tangencial entre a coluna e a torta, e difíceis de serem obtidos mesmo em ensaios de laboratório.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ANP pelo apoio financeiro através do PRH-02, à FINEP e à Petrobras vinculadas ao projeto CTPETRO 793.

## REFERÊNCIAS

- (1) H. Santos, Differential stuck Pipe: Early Diagnostics and Solution, SPE/IADC 59127, 2000.
- (2) C. J. Hopkins and R. A. Leicksenring, Reducing the Risk of Stuck Pipe in The Netherlands, SPE 29422, 1995.
- (3) B. S. Aadnoy, Analisis of Stuck Pipe in Deviated Boreholes, SPE 56628, 1999.
- (4) K.A. Fisher, R.J. Wakeman, T.W. Chiu, O.F.J. Meuric, Numerical modeling of cake formation and fluid loss from non-Newtonian muds during drilling using eccentric/concentric drill strings with/without rotation, *Trans IchemE*, 78(A):707, 2000.
- (5) P. Isambourg, S. Ottesen, Down Hole Simulation Cell for Measurement of Lubricity and Differential Pressure Sticking, SPE/IADC 52816, 1999.

- (6) K. Stamatakis, Chi Tien, A Simple Model of Cross-Flow Filtration Based on Particle Adhesion, *AIChE Journal*, 39-8, pp 1292-1302, 1993.
- (7) J. Happel, Viscous flow relative to arrays of cylinders, *AIChEJ*, 5(2):174, 1959.
- (8) *ANSYS User's Manual: Procedures*, Vol. I, Swanson and Analysis Systems, Inc.
- (9) *ANSYS User's Manual: Commands*, Vol. II, Swanson and Analysis Systems, Inc.
- (10) *ANSYS User's Manual: Elements*, Vol. III, Swanson and Analysis Systems, Inc.