4
Modelagem computacional da estabilidade de poços em rochas fraturadas

Neste capitulo será realizada a modelagem computacional de estabilidade de poços utilizando o software UDEC (Universal Distinct Element Code). A análise de estabilidade consiste de duas etapas, a primeira é a consolidação inicial do maciço rochoso, e a segunda a escavação e aplicação instantânea da pressão do fluido de perfuração nas paredes do furo, considerando a parede do poço permeável e impermeável. As pressões de colapso superior e inferior são calculadas por meio de um procedimento iterativo de tentativa e erro até que nenhum elemento esteja plastificado e nenhuma fratura esteja no limite de atrito ao redor do furo. Para modelar a etapa 1 e a etapa 2, deverão ser definidos: a geometria ou padrão das fraturas no modelo, os modelos constitutivos dos blocos de rocha intacta e fraturas, as tensões *in situ*, as condições de contorno do modelo e as variáveis numéricas como a raio de arredondamento dos blocos (r_o) e o comprimento máximo de borda da malha de diferenças finitas. A figura 4.1 apresenta o procedimento geral utilizado na modelagem computacional.

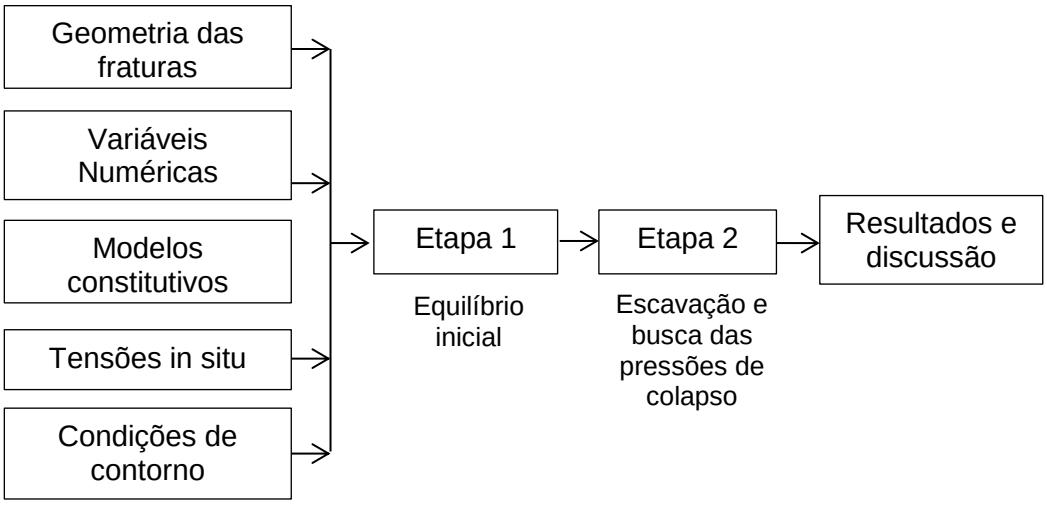

Figura 4. 1– Procedimento geral de cálculo na modelagem computacional.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112031/CA

4.1.
Etapa 1: Consolidação inicial do maciço rochoso

À continuação serão definidas passo a passo as fases requeridas para gerar a etapa 1 na modelagem computacional.

4.1.1.
Geometrias propostas

Baseado na figura 4.2 três geometrias foram propostas para a modelagem, cujas propriedades são apresentadas na tabela 4.1. Segundo o Chen *et al* 2003, os limites externos do modelo devem ser localizados de modo a se ter um domínio quadrilateral cujas dimensões correspondem a 5 vezes o diâmetro do poço (3m).

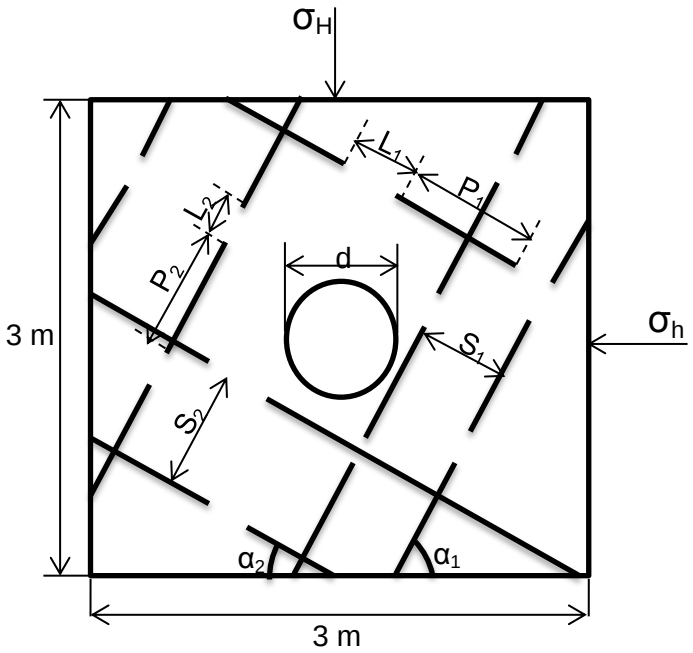

Figura 4. 2 – Geometria global para os modelos propostos.

Onde d é o diâmetro do poço, S_1 e S_2 são os espaçamentos de cada família de fraturas, P_1 e P_2 são as persistências das fraturas, L_1 e L_2 são os comprimentos onde as fraturas não persistem, α_1 e α_2 são as orientações de cada família de planos em relação à horizontal.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112031/CA

Geometria a		Geometria b		Geometria c	
d (m)	0.155	d	0.155	d	0.155
S_1 (m)	-----	S_1 (m)	0.065	S_1 (m)	0.065
S_2 (m)	-----	S_2 (m)	-----	S_2 (m)	0.065
α_1 (^{0})	-----	α_1 (^{0})	45^0	α_1 (^{0})	20^0
α_2 (^{0})	-----	α_2 (^{0})	-----	α_2 (^{0})	70^0
L_1 (m)	-----	L_1 (m)	0	L_1 (m)	0.065
L_2 (m)	-----	L_2 (m)	-----	L_2 (m)	0.065

Tabela 4. 1 – Propriedades geométricas dos modelos propostos.

As geometrias apresentadas foram escolhidas com o objetivo de avaliar a estabilidade do poço, introduzindo-se uma família de planos de fraqueza por vez, possibilitando a melhor explicação do desvio dos resultados numéricos em relação aos analíticos. A figura 4.3 apresenta os três tipos de geometrias analisadas.

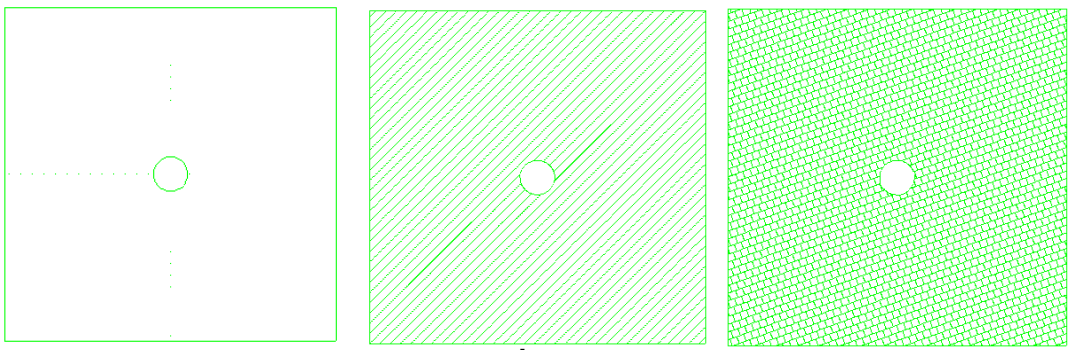

Figura 4. 3 – Geometrias analisadas, a) modelo homogêneo isotrópico, b) modelo transversalmente isotrópico, c) modelo anisotrópico.

4.1.2. Modelos constitutivos e tensões *in situ*

Para os blocos de rocha intacta foi selecionado o modelo constitutivo de Mohr-Coulomb e para as fraturas o modelo de atrito de Coulomb. Segundo Chen *et al.* (2005) as propriedades típicas ou parâmetros de entrada destes modelos constitutivos para uma rocha do tipo argila são apresentadas na tabela 4.2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112031/CA

Propriedades	Valor
Rocha intacta	
Densidade (Kg/m^3)	2278
Módulo volumétrico K (GPa)	18,87
Módulo cisalhante G (GPa)	7,72
Ângulo de atrito (^{0})	36,2
Coesão (MPa)	6,3
Ângulo de dilatação (^{0})	0
Resistência à tração (MPa)	2,07
Fratura	
Módulo volumétrico do fluido (GPa)	0,1
Densidade do fluido (Kg/m^3)	1000
Rigidez normal (Pa/m)	$1800x10^{10}$
Rigidez cisalhante (Pa/m)	$1200x10^{12}$
Fator de permeabilidade da fratura (1/Pa*Seg)	83,3
Coesão (MPa)	0
Ângulo de atrito (^{0})	32
Limite de tração (MPa)	0
Abertura residual (m)	$5x10^{-8}$
Abertura a tensão normal nula (m)	$2x10^{-6}$

Tabela 4. 2 – Propriedades da rocha intacta e fratura.

As tensões aplicadas a cada geometria (*a, b* e *c*) foram divididas em 12 casos de estudo, apresentados na tabela 4.3. As tensões aplicadas representam as condições típicas de tensão em uma argila a uma profundidade de 2000 m. (Chen *et al.,* 2005) Estes casos permitem modelar o comportamento do maciço rochoso sob ação de tensões isotrópicas e anisotrópicas, considerando ou não um valor de poropressão. No estudo foi adotado um valor de poropressão igual a 21 MPa, baseado em um valor de gradiente normal hidrostático.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112031/CA

Modelo Homogêneo Isotrópico				
Caso	**1**	**2**	**3**	**4**
σ_v (MPa)	44	44	44	44
σ_H (MPa)	40	40	60	60
σ_h (MPa)	40	40	40	40
P_p (MPa)	0	21	0	21
# de famílias de fraturas	0	0	0	0

	Modelo Transver isotrópico				Modelo anisotrópico			
Caso	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
σ_v (MPa)	44	44	44	44	44	44	44	44
σ_H (MPa)	40	40	60	60	40	40	60	60
σ_h (MPa)	40	40	40	40	40	40	40	40
P_p (MPa)	0	21	0	21	0	21	0	21
# famílias de fraturas	1	1	1	1	2	2	2	2

Tabela 4. 3 – Tensões *in situ* para os 12 casos propostos.

4.1.3. Condições de contorno e variáveis numéricas

As condições de contorno foram expressas em termos de tensões totais, aplicadas nos contatos externos do modelo, como é apesentado na figura 4.4 para os casos 10 e 12. O software UDEC trabalha com forças, realizando uma transformação matricial interna de tensões para forças, tal como foi descrito no capitulo 3 na equação 3.40.

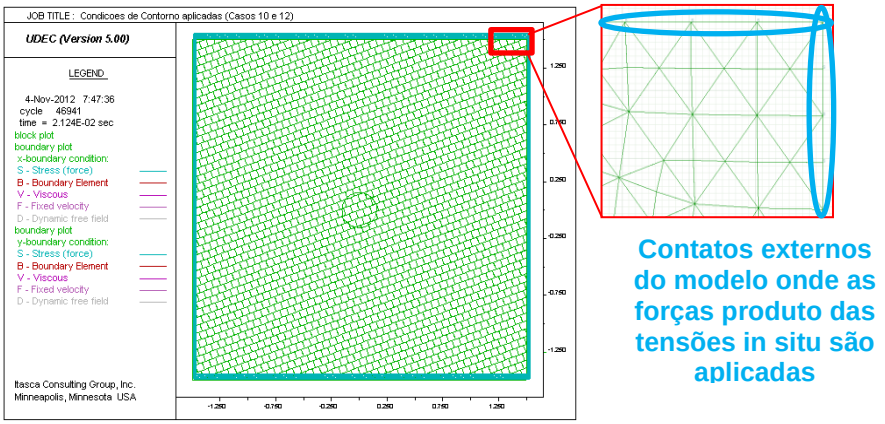

Figura 4. 4 – Condições de contorno aplicadas para os casos 10 e 12.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112031/CA

A poropressão de 21 MPa aplicada somente dentro das fraturas e nos contornos do modelo. Este valor foi mantido constante durante toda a etapa 1 (figura 4.5).

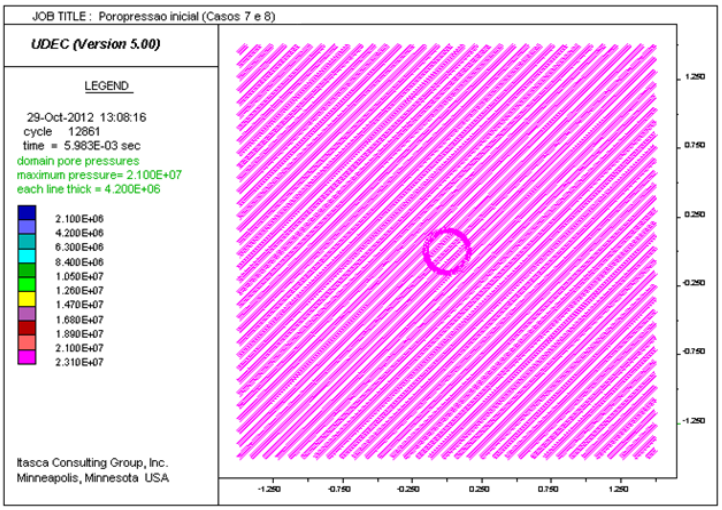

Figura 4. 5 – Poropressão atuando nas fraturas para os casos 7 e 8.

Entre as principais variáveis numéricas requeridas pelo software UDEC, está o máximo comprimento de borda de um elemento triangular, parâmetro necessário para a geração da malha de diferenças finitas. O valor adotado para este comprimento foi de 0.01m=1 cm. A figura 4.6 apresenta um detalhamento da região de borda do poço antes da escavação.

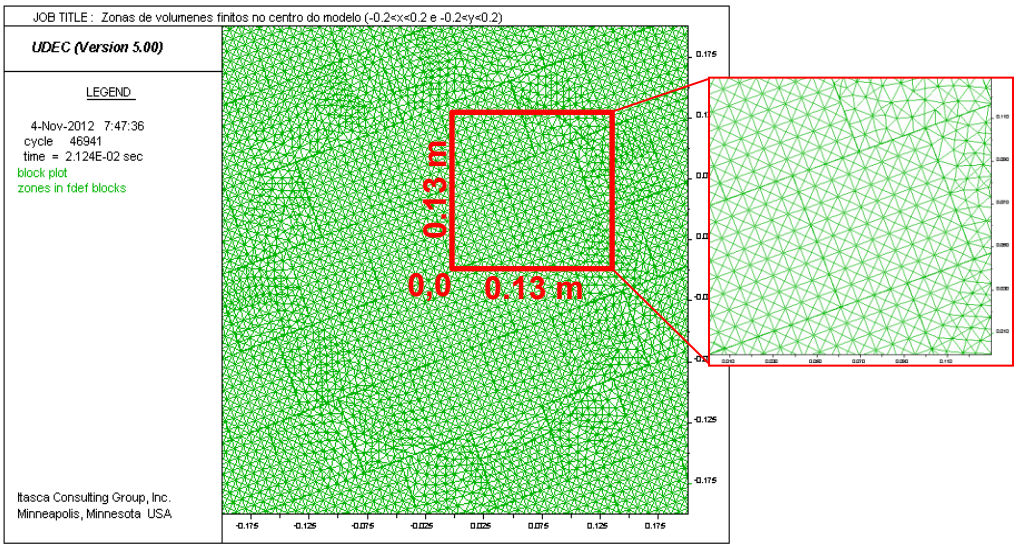

Figura 4. 6 – Malha de diferenças finitas para os casos 9, 10, 11 e 12.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112031/CA

Para evitar resistências infinitas nos cantos dos blocos, tal como foi descrito no capitulo 3, estes foram arredondados em um raio de 0.5 mm.

4.1.4.
Condição final de equilíbrio

O método de solução que usa o software UDEC é o método da relaxação dinâmica, método explícito que necessita satisfazer uma tolerância para que todo o sistema esteja em equilíbrio. Foi estabelecido um critério que consiste na razão entre o máximo resíduo do equilíbrio atual e a máxima força de desequilíbrio, sendo adotado um valor igual a $1*10^{-5}$. A figura 4.7 apresenta a história da máxima força de desequilíbrio para o caso 5.

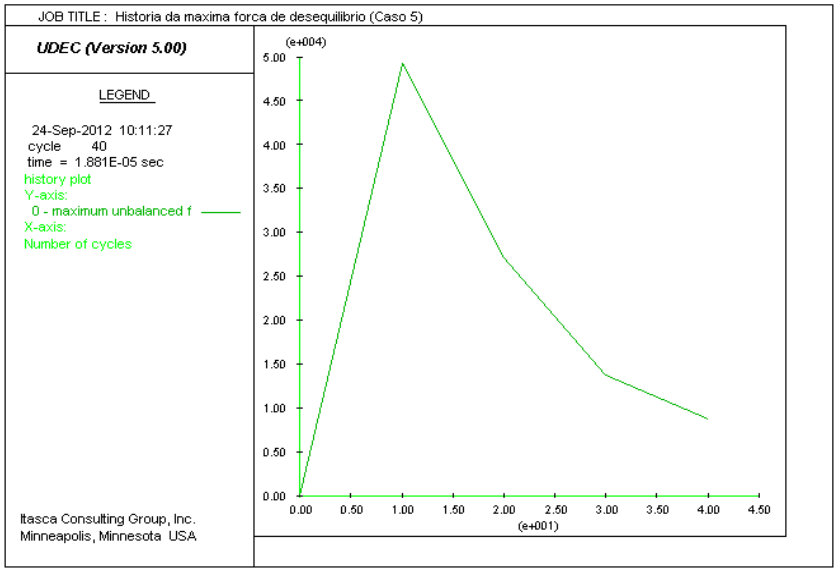

Figura 4. 7 – História do máximo resíduo do equilíbrio na etapa 1 para o caso 5.

4.2.
Etapa 2: Escavação do furo e determinação das pressões de colapso

Com a etapa 1 concluída (para cada um dos doze modelos propostos), o seguinte passo consiste em escavar o furo e aplicar a pressão do fluido nas paredes do mesmo. À continuação será explicado como se realiza a aplicação da pressão do fluido, além da busca das pressões de colapso superior e inferior.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112031/CA

4.2.1.
Escavação e aplicação da pressão do fluido em torno do furo

Ao escavar o furo uma nova condição de contorno deve ser inserida; para realizar isto, são aplicados nos contatos ao redor do poço uma sobrepressão induzida, a qual consiste na diferença entre a pressão do fluido de perfuração e a poropressão. Na figura 4.8 é apresentado este procedimento para os casos 1 até 4.

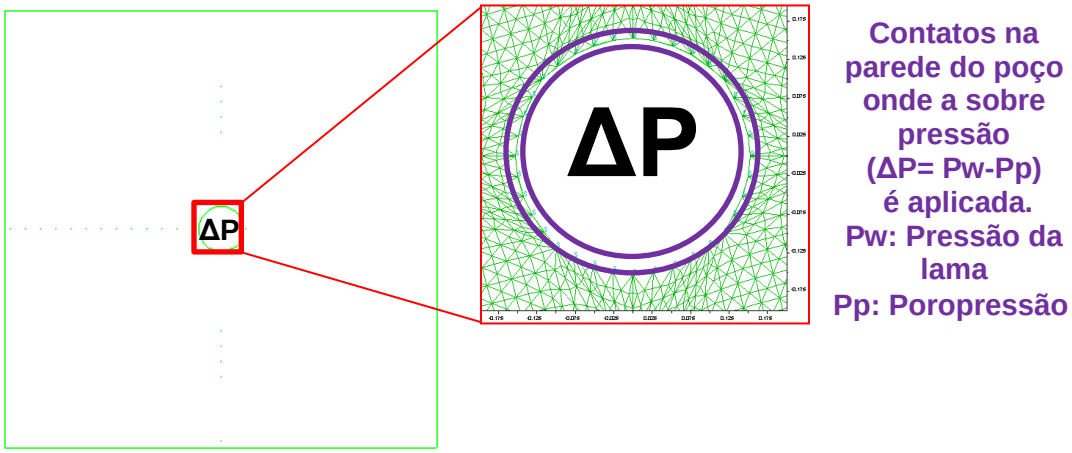

Figura 4. 8 – Aplicação da sobre pressão nos contatos ao redor do furo depois da escavação para os casos 1 até 4.

Depois que a pressão da lama é aplicada, o modelo deve atingir um novo estado de equilíbrio, para isto foi aplicado o mesmo procedimento da etapa 1 com o critério de convergência de $1*10^{-5}$. A figura 4.9 apresenta a história da máxima força de desequilíbrio para o caso 9 antes e depois da escavação.

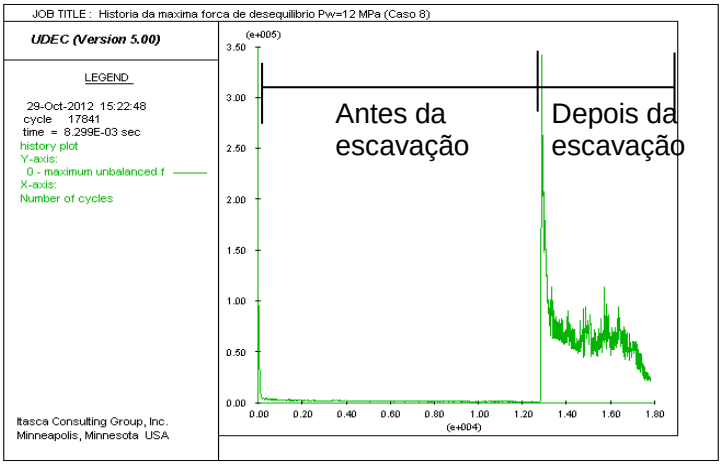

Figura 4. 9 – História da máxima força de desequilíbrio para o caso 9.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112031/CA

Na etapa 2, a poropressão na condição de parede do poço impermeável não foi mantida fixa, sendo liberada para interagir com os blocos de rocha mudando seu valor com o deslocamento do sistema (figura 4.10). Para o caso da parede do poço permeável a poropressão nas fraturas na parede do poço foi mantida com um valor fixo e igual ao valor do peso do fluido de perfuração (figura 4.11).

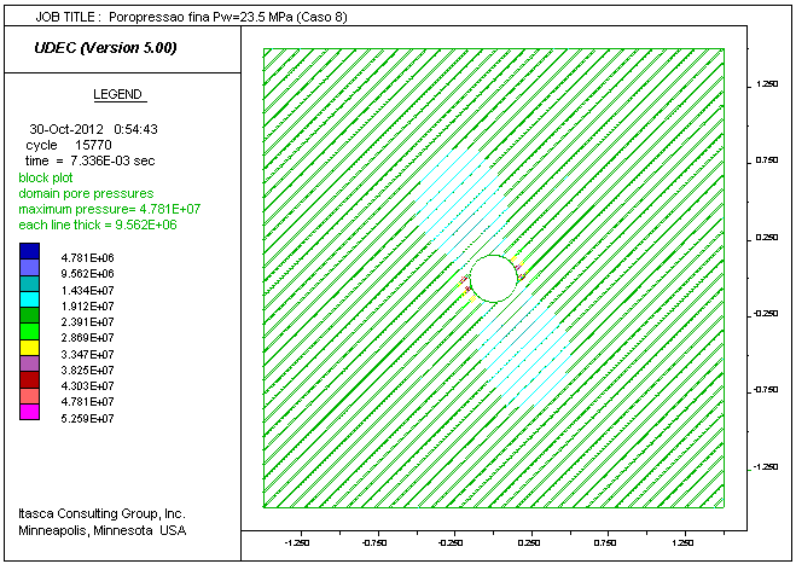

Figura 4. 10 – Poropressão no estado final de equilíbrio na parede impermeável no caso 8 e uma pressão da lama de 20 MPa.

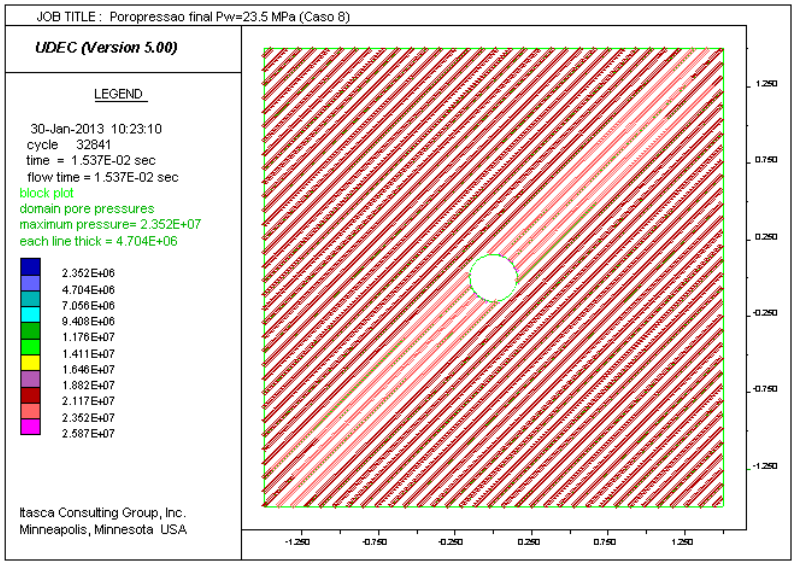

Figura 4. 11 – Poropressão no estado final de equilíbrio para o caso 8 na parede permeável a uma pressão da lama de 23.5 MPa.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112031/CA

4.2.2.
Determinação das pressões de colapso superior e inferior

O objetivo nesta etapa da modelagem é obter as pressões de colapso superior e inferior. Para realizar isto é gerado um procedimento de tentativa e erro, testando-se varias pressões até que nenhum dos elementos na face do furo esteja plastificado e nenhuma fratura esteja no limite de atrito. Foram geradas duas funções na linguagem de programação FISH do software UDEC para verificação da estabilidade do poço para cada pressão aplicada. Estas funções são apresentadas na figura 4.12.

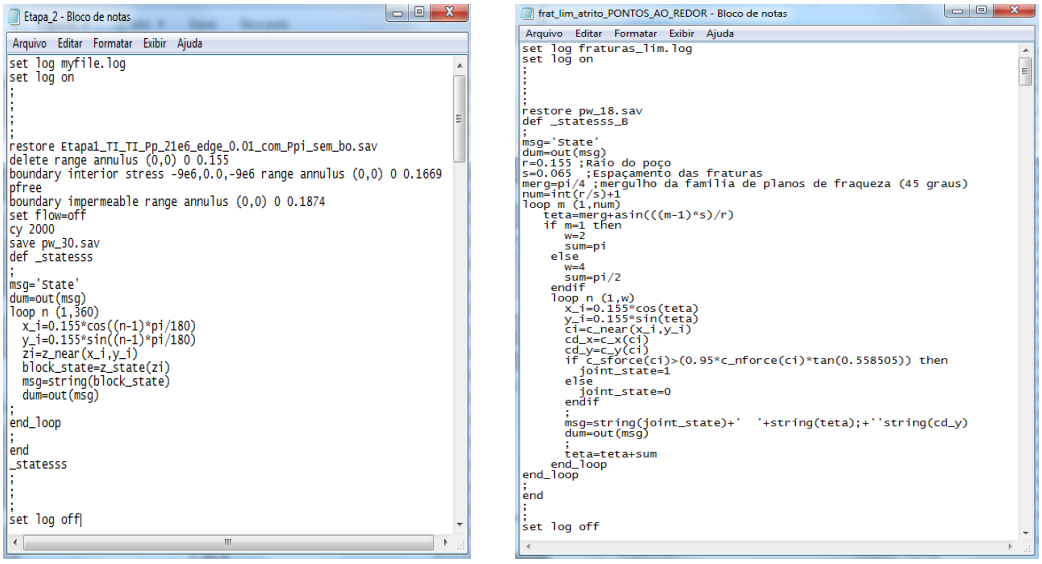

Figura 4. 12 – Funções FISH para a) obter os elementos plastificados em torno do poço e b) para obter as fraturas no limite de atrito.

4.3.
Resultados e discussão

4.3.1.
Parede do poço impermeável

Os resultados das pressões de colapso inferior (Pci) e superior (Pcs) para cada um dos modelos propostos na parede do poço impermeável são apresentados na tabela 4.4. Pode se ver que, quando são introduzidas as fraturas, a pressão de colapso superior não ocorre especificamente nos elementos situados na parede do poço (figuras 4.14b e 4.15b). Isto ocorre pois as fraturas na parede do poço são fechadas devido as altas

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112031/CA

pressões e a movimentação dos blocos (Santarrelli *et al.*, 1992), o que altera o estado de tensões e a posterior ruptura.

		Pci (MPa)	Pcs (MPa)
Geometria homogênea isotrópica	Caso 1	11.17	68.69
	Caso 2	24.0	56.55
	Caso 3	23.17	52.79
	Caso 4	35.73	40.72
Geometria transversalmente isotrópica	Caso 5	18.0	61.49
	Caso 6	29.47	49.87
	Caso 7	24.98	62.81
	Caso 8	Não há janela operacional	
Geometria anisotrópica	Caso 9	20.0	60.0
	Caso 10	26.48	61.4
	Caso 11	30.0	62.0
	Caso 12	43.49	50.48

Tabela 4. 4 – Janela operacional para os casos propostos na parede do poço impermeável.

Nas figuras 4.13 a 4.17 são apresentados os elementos plastificados e fraturas no limite de atrito para altas e baixas pressões, nos casos 4, 7 e 12. Os pontos vermelhos indicam os elementos plastificados que atingiram sua máxima resistência de pico; os pontos verdes são os elementos que estão plastificados, mas sem atingir sua máxima resistência; e os pontos rosa indicam os elementos em limite de tração.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112031/CA

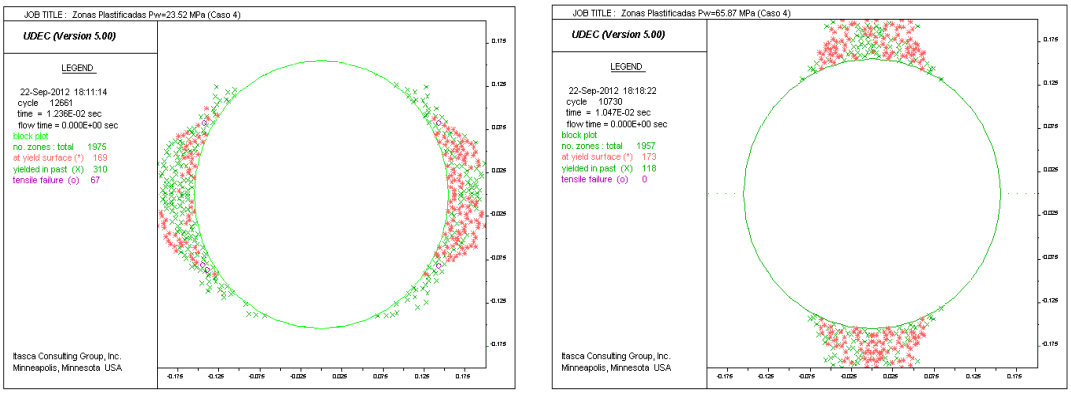

Figura 4. 13 – Elementos plastificados para o caso 4, a) baixa pressão de 23. 5 MPa e b) alta pressão de 66 MPa.

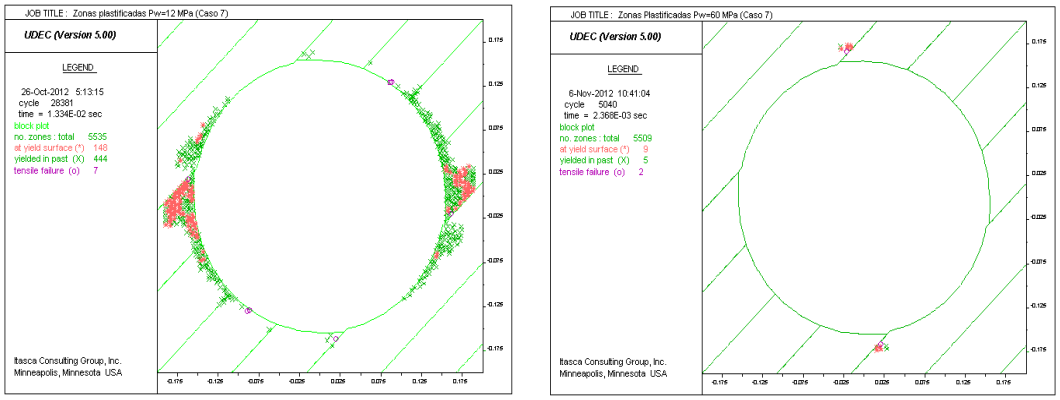

Figura 4. 14 – Elementos plastificados para o caso 7, a) pressão de 12 MPa e b) alta pressão de 60 MPa.

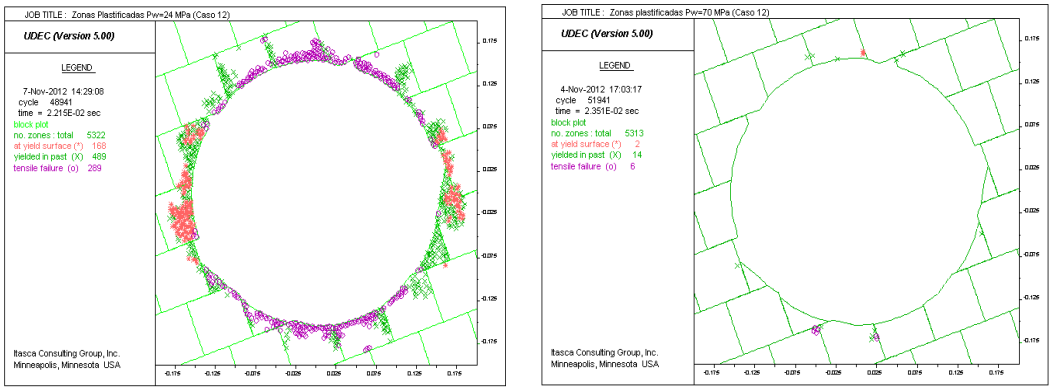

Figura 4. 15 – Elementos plastificados para o caso 12, a) pressão de 24 MPa e b) pressão de 70 MPa.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112031/CA

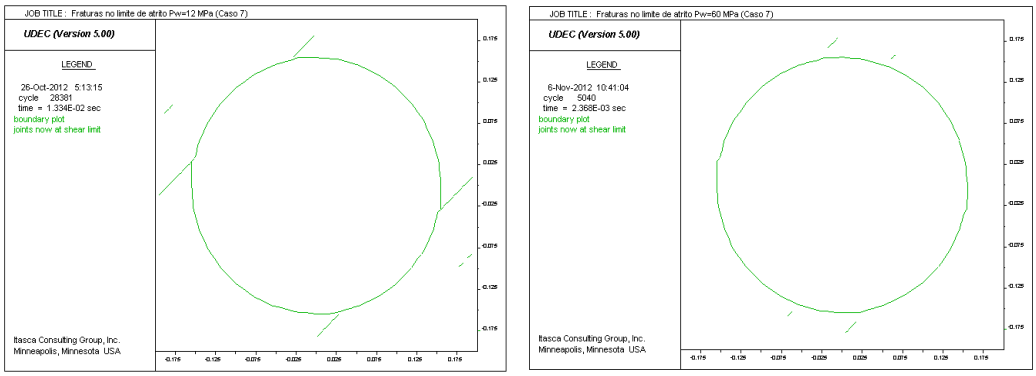

Figura 4. 16 – Fraturas no limite de atrito para o caso 7, a) pressão de 12 MPa e b) pressão de 60 MPa.

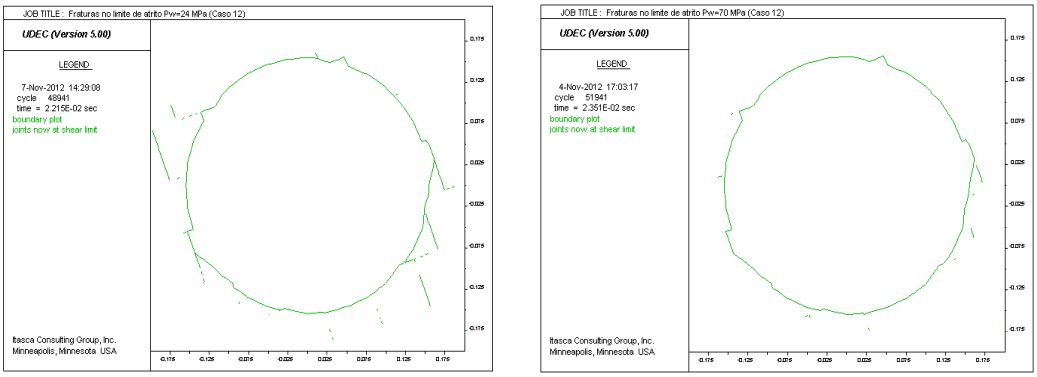

Figura 4. 17 – Fraturas no limite de atrito para o caso 12, a) pressão de 24 MPa e b) pressão de 70 MPa.

Segundo o Santarelli et al. (1992) as fraturas ao redor do poço tem o efeito de reorientação das tensões *in situ* que se alinhariam paralelamente aos planos de descontinuidades das mesmas. Este efeito é produzido quando as pressões na parede do poço são bem menores que a mínima tensão principal *in situ*, para pressões maiores este efeito desaparece. Na figura 4.18 é apresentado para o caso 7 a perfuração do poço com um peso da lama de 5 MPa, podendo-se observar como a tensão principal maior rotaciona paralelamente aos planos das fraturas; e para uma pressão da lama de 35 MPa (figura 4.19) este efeito desaparece como foi descrito por Santalrelli et al. (1992).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112031/CA

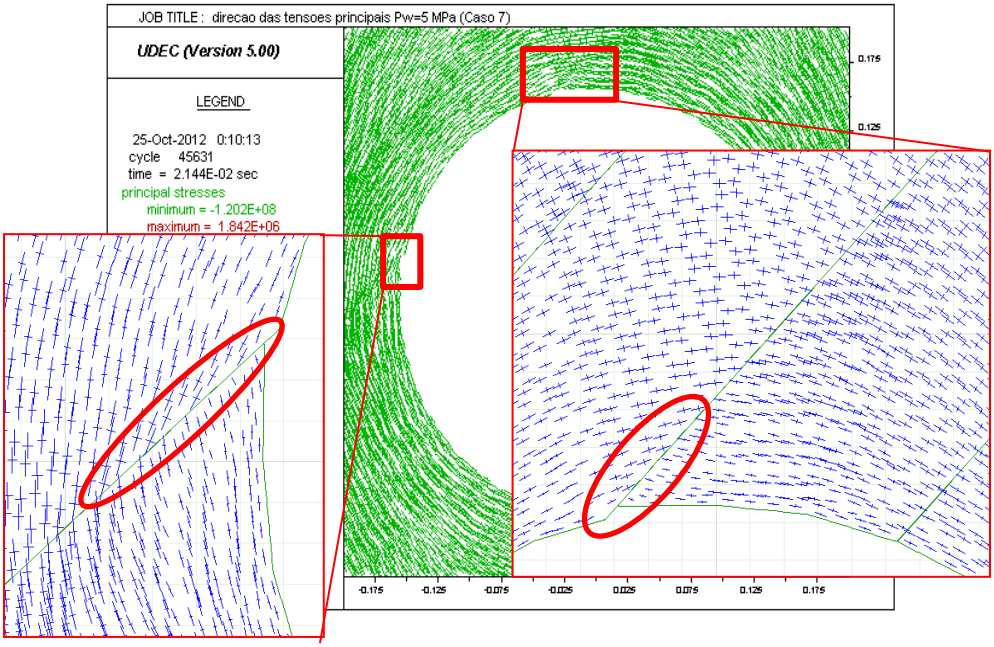

Figura 4. 18 – Direção das tensões principais no caso 7 para uma pressão da lama de 5 MPa.

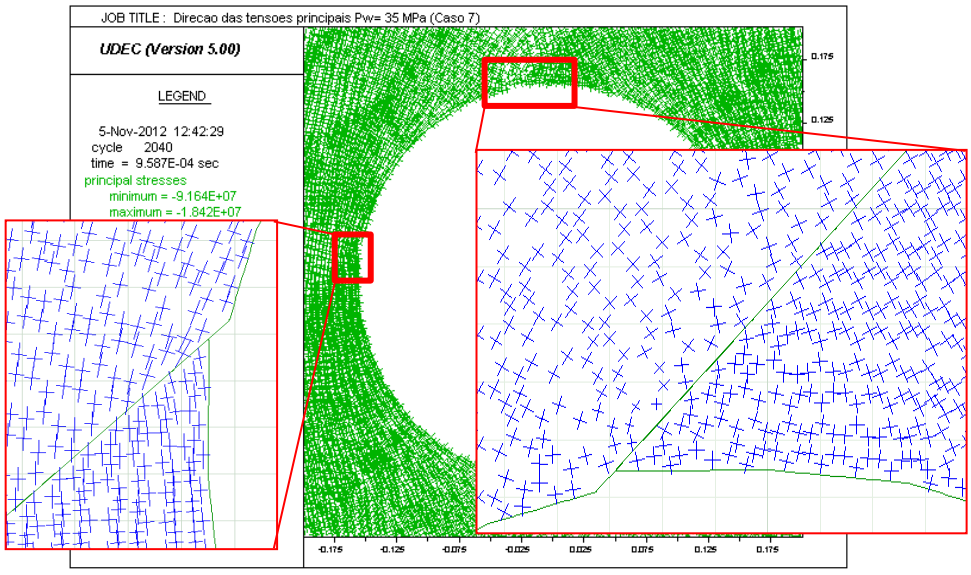

Figura 4. 19 – Direção das tensões principais no caso 7 para uma pressão da lama de 35 MPa.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112031/CA

4.3.2.
Parede do poço permeável

Quando é modelada a parede do poço permeável é permitido ter fluxo de fluidos da face do furo pelas fraturas para a formação, tendo sido utilizado o acoplamento hidromecânico implementado no UDEC. As considerações adotadas na escavação foram: manutenção da poropressão fixa e igual ao peso da lama nos contatos das fraturas localizados na face do furo, e aplicação do excesso de poropressão nos contatos da rocha intacta. Os resultados da modelagem da janela operacional, tendo em contas as considerações anteriores, são apresentados na tabela 4.5. Posto que o fluxo de fluidos é permitido nas fraturas, a tabela só apresenta os resultados para os modelos que apresentam fraturas ou seja os casos 5 até 12.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112031/CA

		Pci (MPa)	Pcs (MPa)
Geometria transversalmente isotrópica	Caso 5	41.16	50.57
	Caso 6	Não há janela	
	Caso 7	Não há janela	
	Caso 8	Não há janela	
Geometria anisotrópica	Caso 9	42.39	47.75
	Caso 10	Não há janela	
	Caso 11	Não há janela	
	Caso 12	Não há janela	

Tabela 4. 5 – Janela operacional para os casos propostos na parede do poço permeável.

Nas figuras 4.20 até figura 4.23 pode se observar o comportamento do fluxo de fluidos nas fraturas quando a pressão do fluido é acrescentada, este efeito tem como consequência a perda do fluido de perfuração produto da falta de um bom reboco na parede do poço. Note-se que no modelo transversalmente isotrópico (caso 8) o fluxo de fluido ocorre até os limites exteriores, mas em um menor valor comparado ao caso anisotrópico (caso 12) visto que o número de fraturas conectadas à parede de do poço é menor.

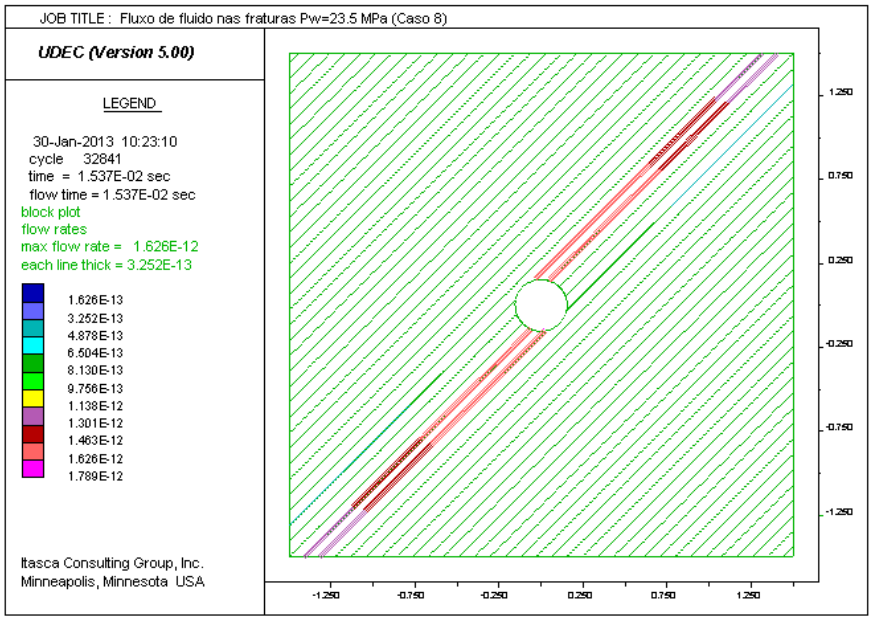

Figura 4. 20 – Fluxo de fluidos nas fraturas para o caso 8 com um peso de lama nas paredes do poço de 23.5 MPa.

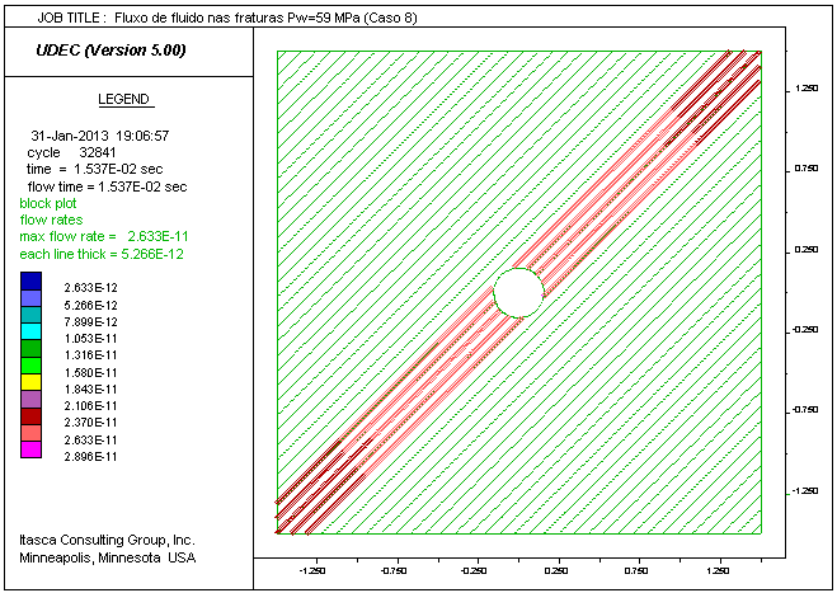

Figura 4. 21 – Fluxo de fluidos nas fraturas para o caso 8 com um peso de lama nas paredes do poço de 59 MPa.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112031/CA

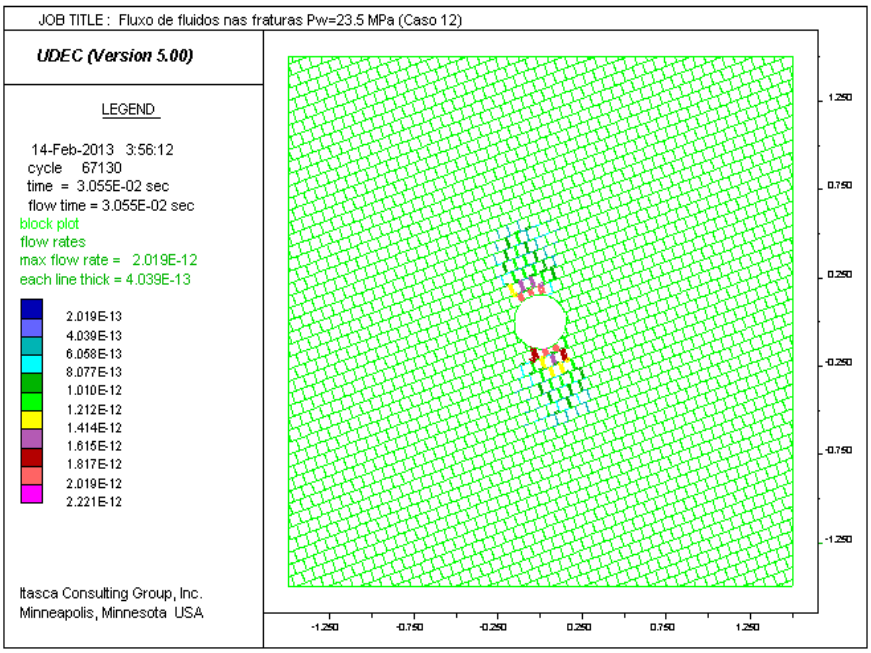

Figura 4. 22 – Fluxo de fluidos nas fraturas para o caso 12 com um peso de lama nas paredes do poço de 23.5 MPa.

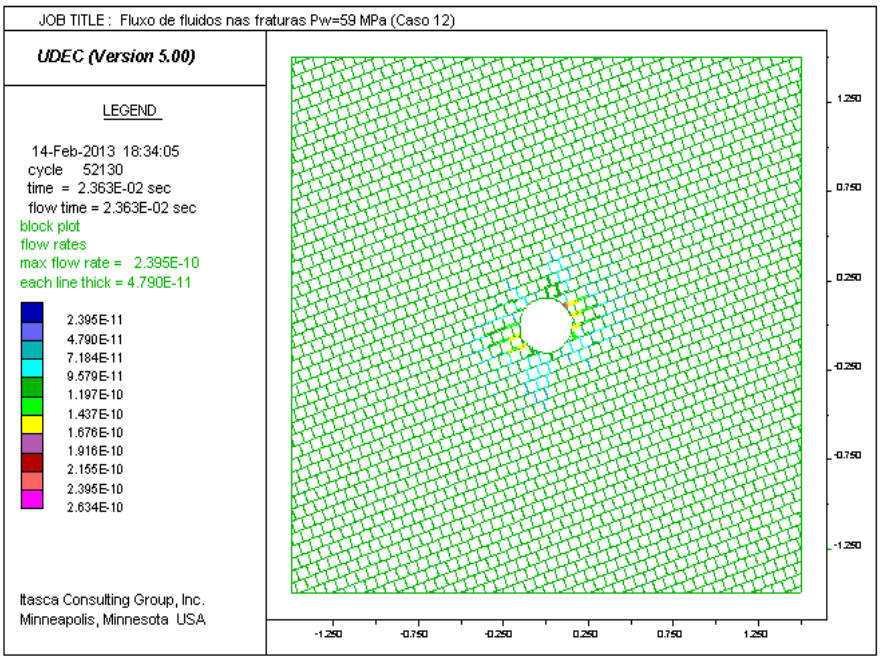

Figura 4. 23 – Fluxo de fluidos nas fraturas para o caso 12 com um peso de lama nas paredes do poço de 59 MPa.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112031/CA

4.3.3.
Efeito da orientação das famílias de fraturas na estabilidade de poços

Com o objetivo de verificar o comportamento da estabilidade de poços, segundo as orientações das fraturas interceptando a parede do poço, foi realizada uma sensibilidade de orientação dos planos de fratura a ângulos de 20^0, 45^0 e 70^0, verificando o comportamento da rocha intacta e das fraturas a um determinado peso da lama. Segundo Santarelli et al. (1992), as piores condições de estabilidade se encontram quando as famílias de fraturas possuem uma orientação entre 45^0 e 90^0 em relação à tensão horizontal mínima. Esta condição, além de favorecer a instabilidade das fraturas, também tem um efeito na plastificação da rocha intacta, pois as tensões atuantes na parede do poço têm uma dependência das fraturas tal como foi apresentado anteriormente. As figuras 4.24 até 4.27 apresentam o comportamento de estabilidade da rocha intacta e as fraturas para o caso 8, variando a inclinação dos planos das fraturas para as pressões de 23.5 MPa e 59 MPa.

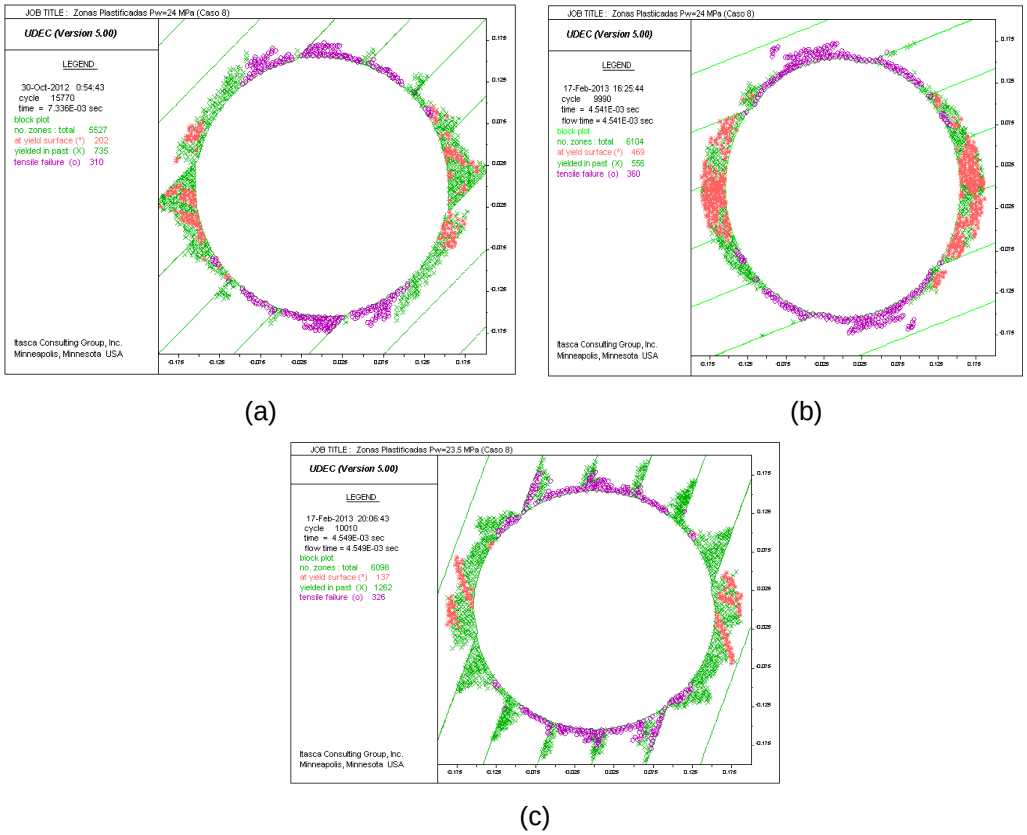

Figura 4. 24 – Zonas plastificadas a peso da lama de 23.5 MPa e para um mergulho de fraturas de a) 45^0, b) 20^0 e c) 70^0.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112031/CA

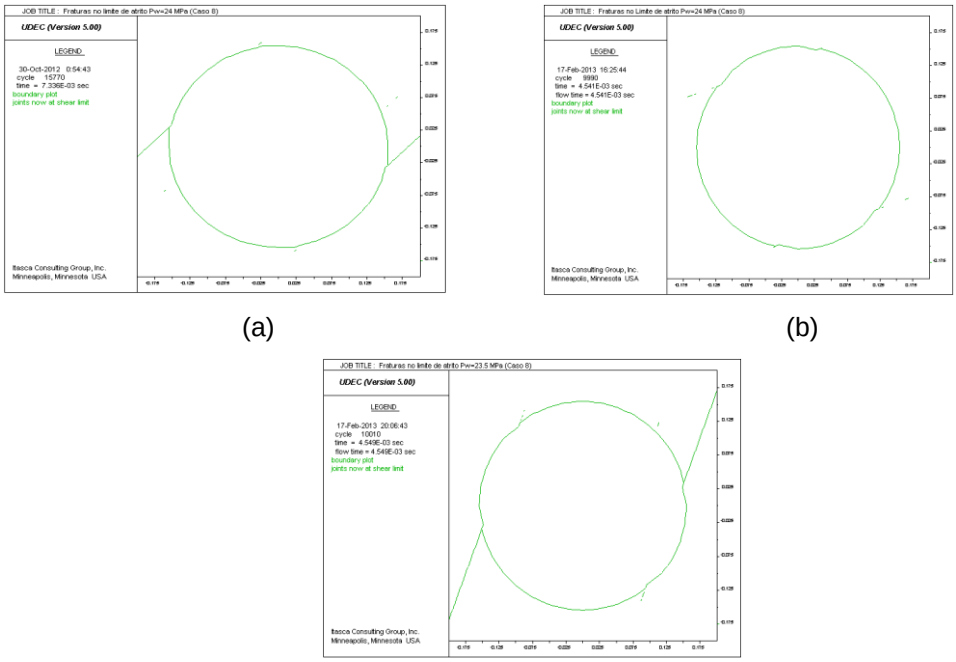

Figura 4. 25 – Fraturas no limite de atrito para um peso da lama de 23.52 MPa e para um mergulho de fraturas de a) 45^0, b) 20^0 e c) 70^0.

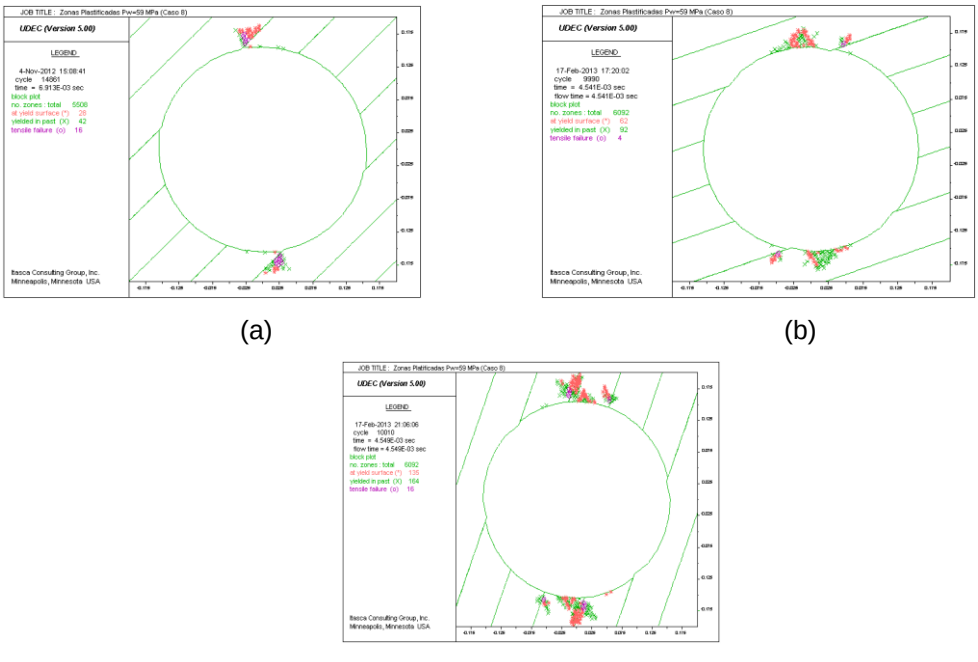

Figura 4. 26 – Zonas plastificadas a peso da lama de 59 MPa e para um mergulho de fraturas de a) 45^0, b) 20^0 e c) 70^0.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112031/CA

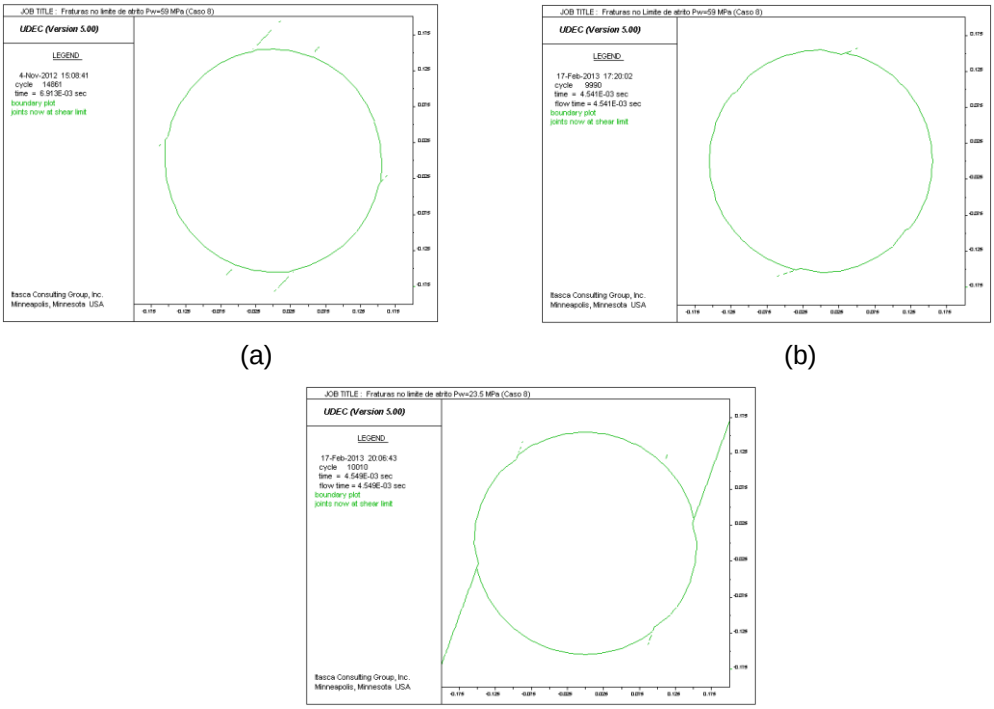

Figura 4. 27 – Fraturas no limite de atrito para um peso da lama de 59 MPa e para um mergulho de fraturas de a) 45^0, b) 20^0 e c) 70^0.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1112031/CA