

5 Validação e comparação dos resultados analíticos e numéricos

Geralmente os modelos geomecânicos de estabilidade de poços são desenvolvidos analiticamente e sob uma série de considerações baseadas na teoria de elasticidade. Nestes casos a rocha costuma ser modelada como um meio contínuo, assumindo que as tensões nela não são afetadas por diversas estruturas no subsolo como planos de fraqueza e falhas, devido à complexidade matemática que traz. Como consequência, a teoria desenvolvida não modela de maneira correta o problema em estudo. O método dos elementos discretos é adequado para modelar este tipo de problemas. Este capítulo foi desenvolvido para verificar quais seriam as principais diferenças entre os resultados numéricos e analíticos e assim identificar e entender melhor a mecânica da instabilidade de poços devido a presença de fraturas.

5.1. Janela operacional analítica *versus* numérica

Nas tabelas 5.1 e 5.2 são apresentados os resultados de janela operacional para o modelo analítico de Jaeger e os modelos numéricos estudados. Os parâmetros físicos e mecânicos, além das geometrias usadas para gerar os modelos, foram as descritos no capítulo 4 na tabela 4.2.

		Modelo analítico		Modelo numérico	
		Pci (MPa)	Pcs (MPa)	Pci (MPa)	Pcs (MPa)
Geometria homogênea isotrópica	Caso 1	11.29	68.69	11.17	68.69
	Caso 2	23.76	56.29	24.0	56.55
	Caso 3	23.57	52.72	23.17	52.79
	Caso 4	35.97	40.39	35.73	40.72
Geometria transversalmente isotrópica	Caso 5	18.84	68.69	18.0	61.49
	Caso 6	30.0	56.22	29.47	49.87
	Caso 7	31.78	52.79	24.98	62.81
	Caso 8	Não há janela		Não há janela	
Geometria anisotrópica	Caso 9	18.84	68.69	20.0	60.0
	Caso 10	30.0	56.22	26.48	61.4
	Caso 11	32.58	52.79	30.0	62.0
	Caso 12	Não há janela		43.49	50.48

Tabela 5. 1 – Comparação da Janela operacional analítica *versus* numérica para os casos propostos na parede do poço impermeável.

		Modelo analítico		Modelo numérico	
		Pci (MPa)	Pcs (MPa)	Pci (MPa)	Pcs (MPa)
Geometria transversalmente isotrópica	Caso 5	37.71	51.59	41.16	50.57
	Caso 6	29.12	46.15	Não há janela	
	Caso 7	Não há janela		Não há janela	
	Caso 8	Não há janela		Não há janela	
Geometria anisotrópica	Caso 9	39.5	48.5	42.39	47.75
	Caso 10	31.2	43.7	Não há janela	
	Caso 11	Não há janela		Não há janela	
	Caso 12	Não há janela		Não há janela	

Tabela 5. 2 – Comparação da Janela operacional analítica *versus* numérica para os casos propostos na parede do poço permeável.

Nas figuras 5.1 até 5.3 são superpostas as zonas plastificadas para o modelo analítico fornecido pelo software de estabilidade de poço SEST (GTEP; Petrobras, 2012) e os resultados numéricos do UDEC. Pode se observar que nestes gráficos o comportamento das zonas plastificadas se ajustam muito bem na análise da geometria

homogênea isotrópica. No entanto, cada vez que uma família de fraturas é introduzida, este resultado vai mudando, o que leva a concluir que a diferença nos resultados se deve única e exclusivamente a três razões:

- Rotação e movimentação dos blocos e fraturas,
- Geração e comportamento da poropressão,
- Discretização numérica ou malha de diferenças finitas.

Para evitar o erro numérico de aproximação foi gerada uma malha de diferenças finitas de tal forma que os resultados analíticos e numéricos para o modelo homogêneo isotrópico (casos 1, 2, 3 e 4) fossem praticamente os mesmos. Nestes casos o meio analisado é contínuo, o que resultaria simplesmente em aproximar as equações diferenciais analíticas numericamente. Foi calibrada uma malha com um máximo comprimento de bordas das zonas de diferenças finitas de 0.01m. Desta forma, só ficariam os dois primeiros mecanismos como principais geradores de instabilidade, e devido ao fato de que os modelos constitutivos utilizados nos modelos analíticos e numéricos serem os mesmos, pode se concluir que os principais efeitos dos dois mecanismos estariam na mudança das tensões principais em torno do furo, o que alteraria a condição de falha do material.

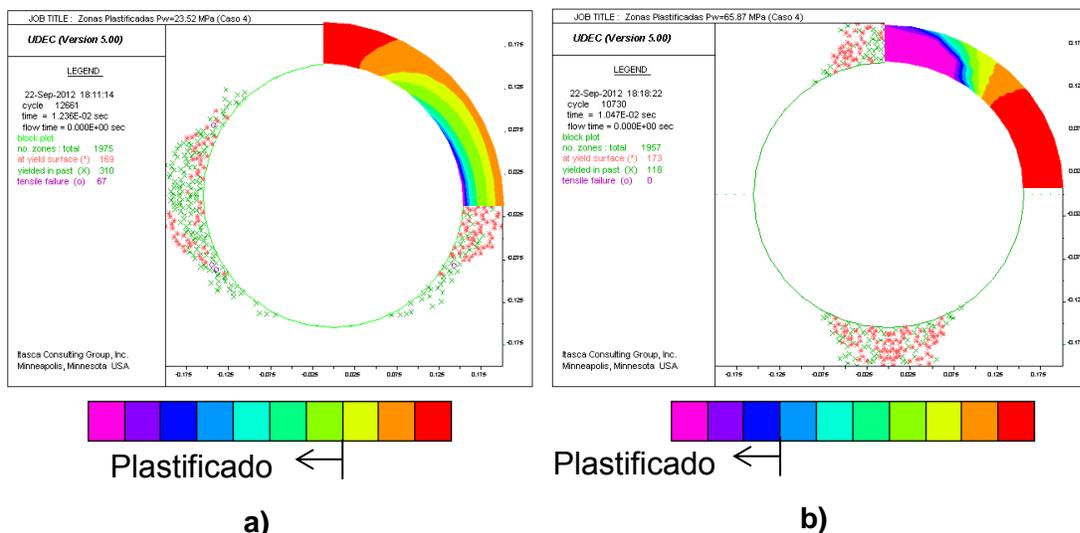


Figura 5. 1 – Comparação dos elementos plastificados utilizando o UDEC e o SEST para o caso 4 e uma pressão de a) 23.5 MPa e b) 63.61 MPa.

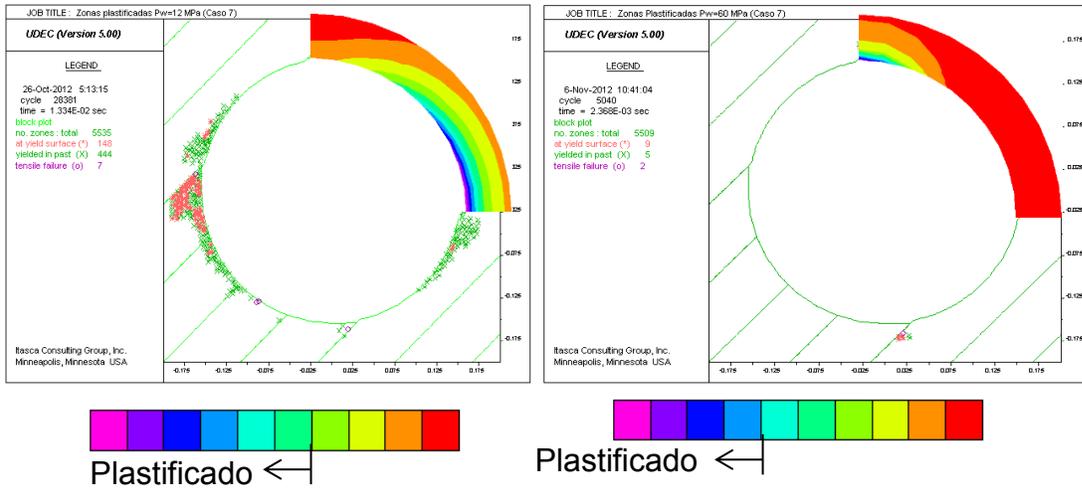


Figura 5. 2 – Comparação dos elementos plasticados utilizando o UDEC e o SEST para o caso 7 e uma pressão de a) 11.76 MPa e b) 59 MPa.

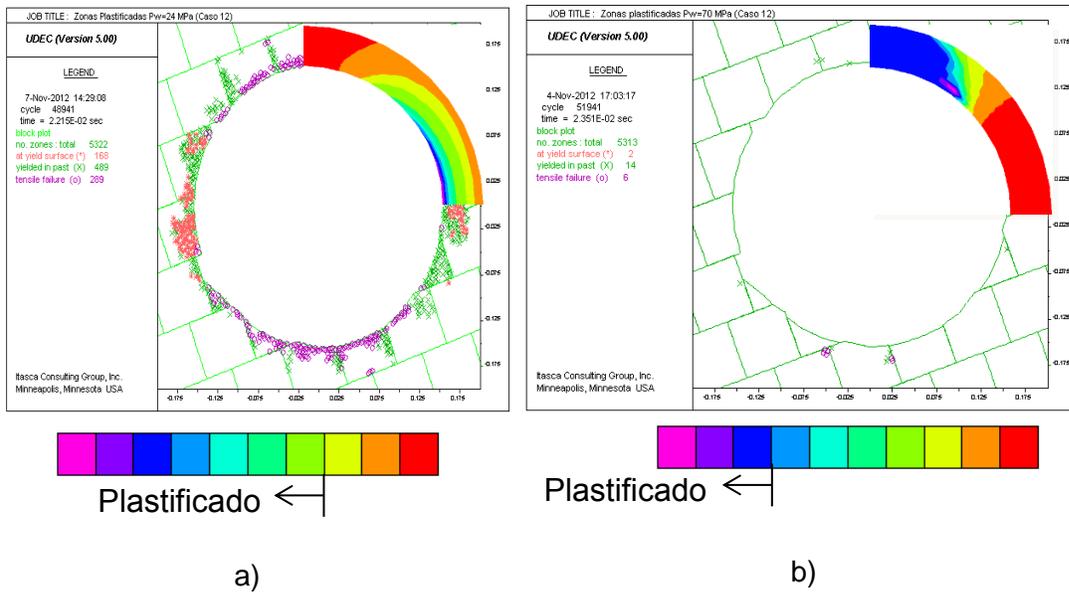


Figura 5. 3 – Comparação dos elementos plasticados utilizando o UDEC e o SEST para o caso 12 e uma pressão de a) 23.5 MPa e b) 70.57 MPa.

Na continuidade será analisada, comparada e discutida a distribuição de tensões em torno e distante da face do poço para os 12 modelos propostos.

5.2. Distribuição de tensões em torno e longe da face do poço

A solução analítica proposta para calcular a distribuição de tensões ao redor do poço foi obtida por Kirsch (1898), cujas equações estão descritas no apêndice A. As tensões principais em torno de um poço vertical para baixas pressões seriam a tensão tangencial $\sigma'_1 = \sigma'_\theta$ a tensão radial $\sigma'_3 = \sigma'_r$ e a tensão vertical $\sigma'_2 = \sigma'_z$, e estariam aplicadas conforme apresentado na figura 5.4. Considerando o efeito do plano de fraqueza estas tensões podem rotacionar ao redor do poço tal como foi descrito por Santarelli et al. (1992).

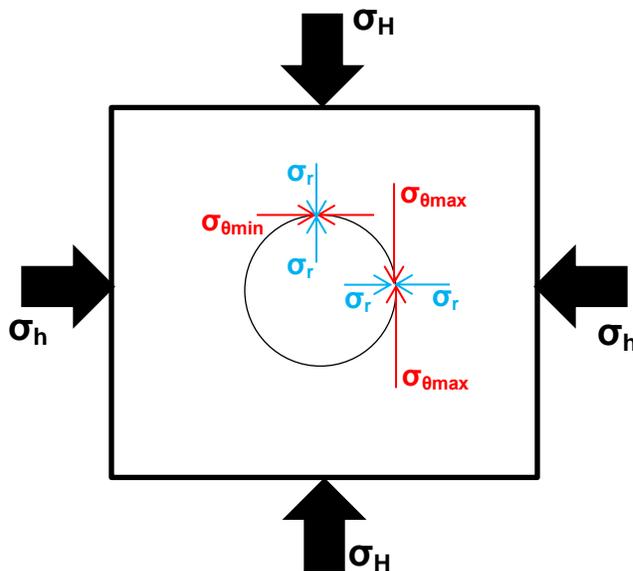


Figura 5. 4 – Tensões principais analíticas atuando ao redor de um poço vertical para baixas pressões de fluido de perfuração.

Nas figuras 5.5 até 5.8 pode se verificar o comportamento das tensões analíticas propostas por Kirsch e as tensões obtidas do modelo numérico, ao redor e distante da parede do poço, para o caso 4. Estas tensões são similares, pois o único erro que as diferenciam é o erro da aproximação numérica por diferenças finitas. Já nas figuras 5.9 até 5.11 pode se verificar a mesma comparação de tensões para o caso 12. Note-se que quando o sistema de fraturas é introduzido, as diferenças entre as tensões aumentam em função da anisotropia produzida pelas fraturas.

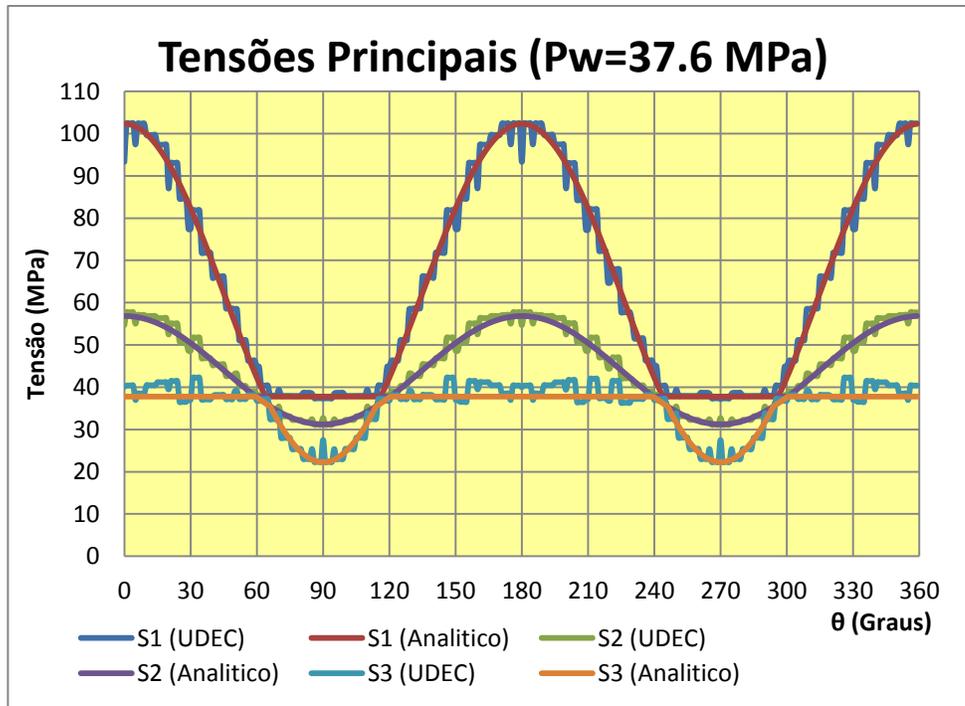


Figura 5. 5 – Tensões principais analíticas e numéricas atuando ao redor do poço para o caso 4 e uma pressão de 37.6 MPa.

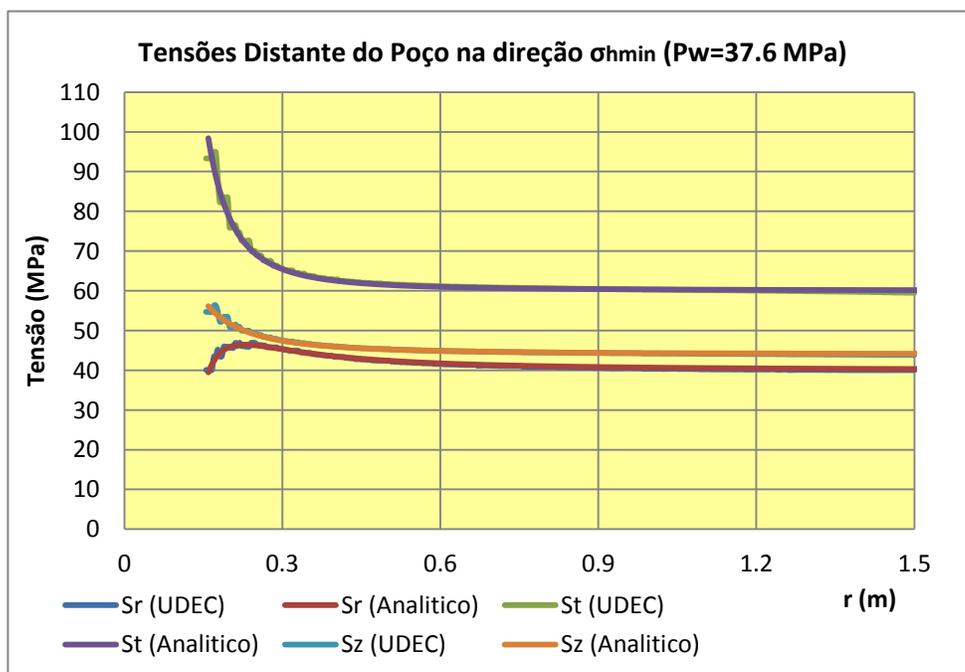


Figura 5. 6 – Tensões analíticas e numéricas atuando distante da parede do poço na direção da tensão horizontal mínima para o caso 4 e uma pressão de 37.6 MPa.

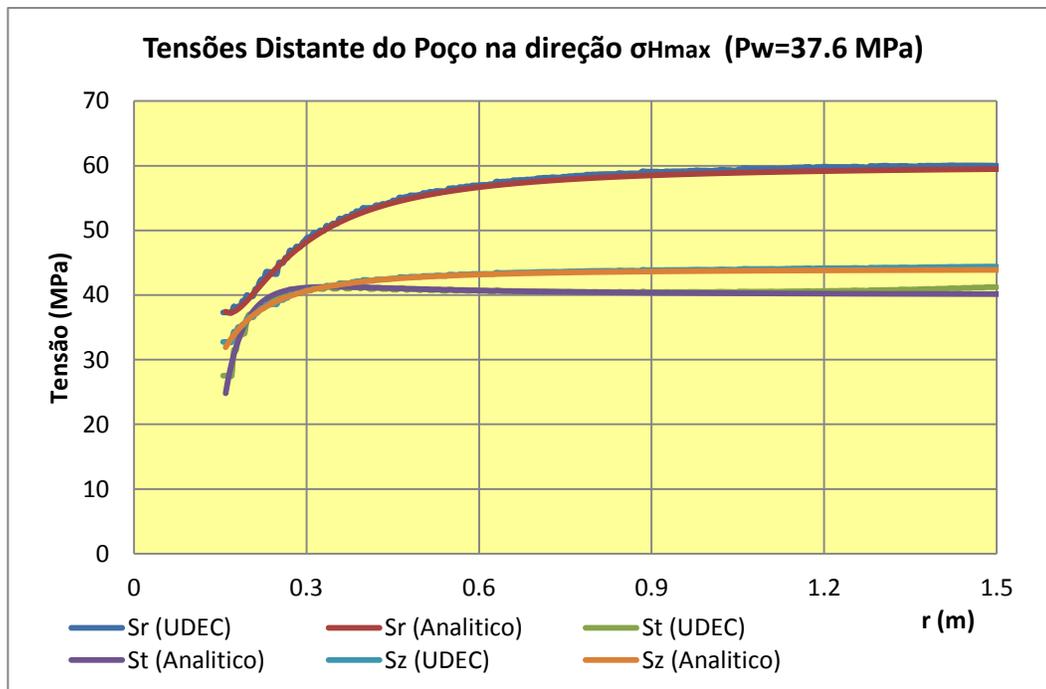


Figura 5. 7 – Tensões analíticas e numéricas atuando distante da parede do poço na direção da tensão horizontal máxima para o caso 4 e uma pressão de 37.6 MPa.

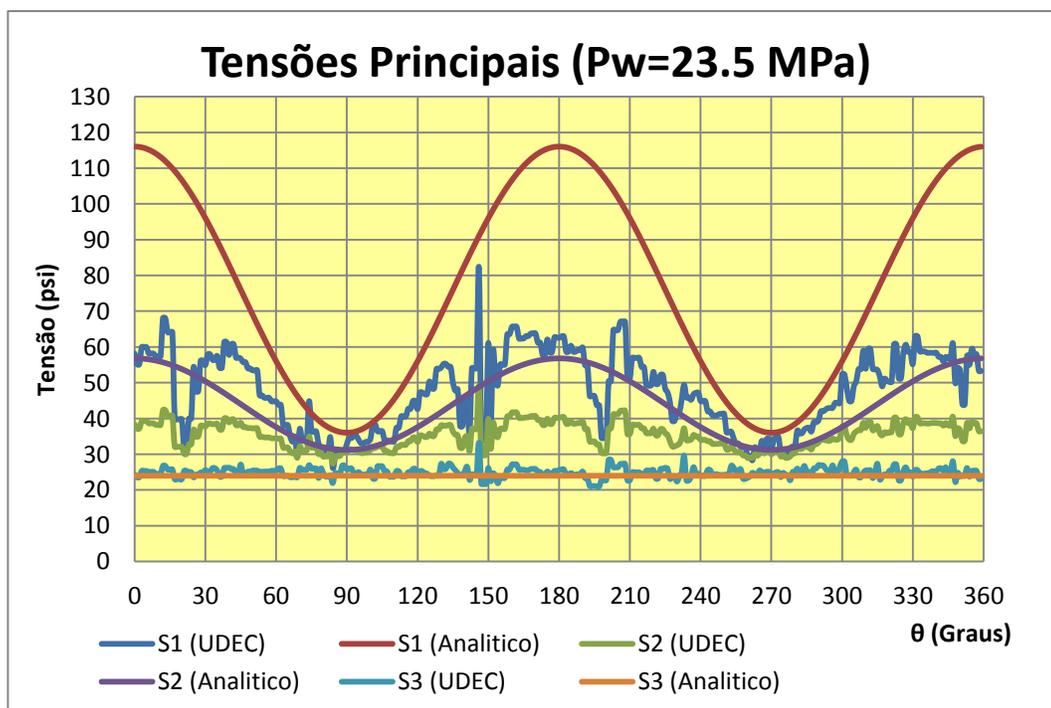


Figura 5. 8 – Tensões principais analíticas e numéricas atuando ao redor do poço para o caso 12 e uma pressão de 23.5 MPa.

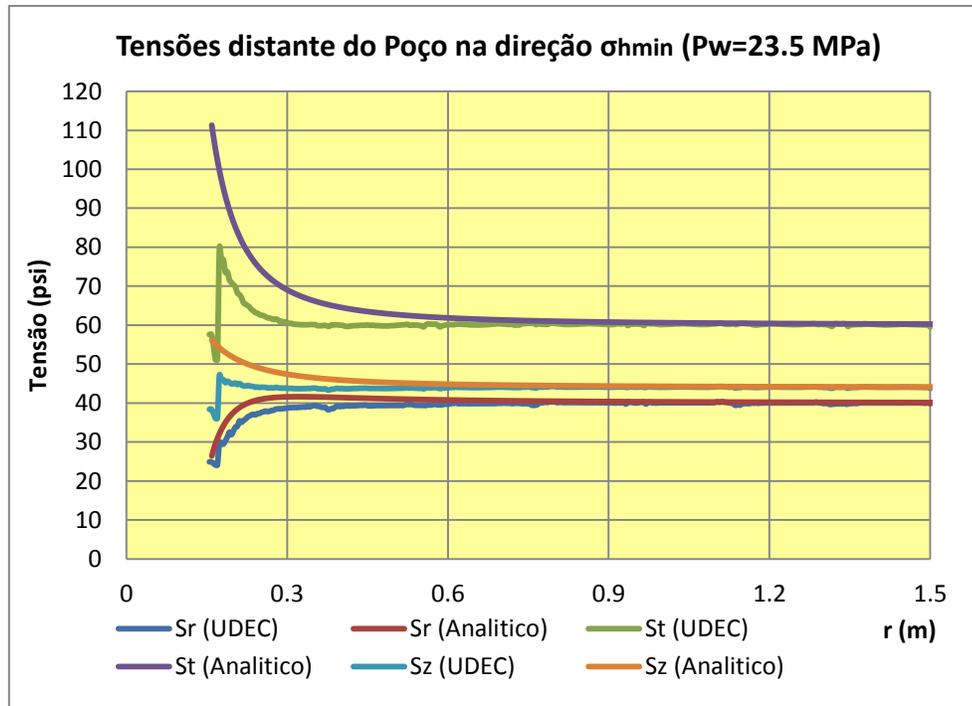


Figura 5. 9 – Tensões analíticas e numéricas atuando distante da parede do poço na direção da tensão horizontal mínima para o caso 12 e uma pressão de 23.5 MPa.

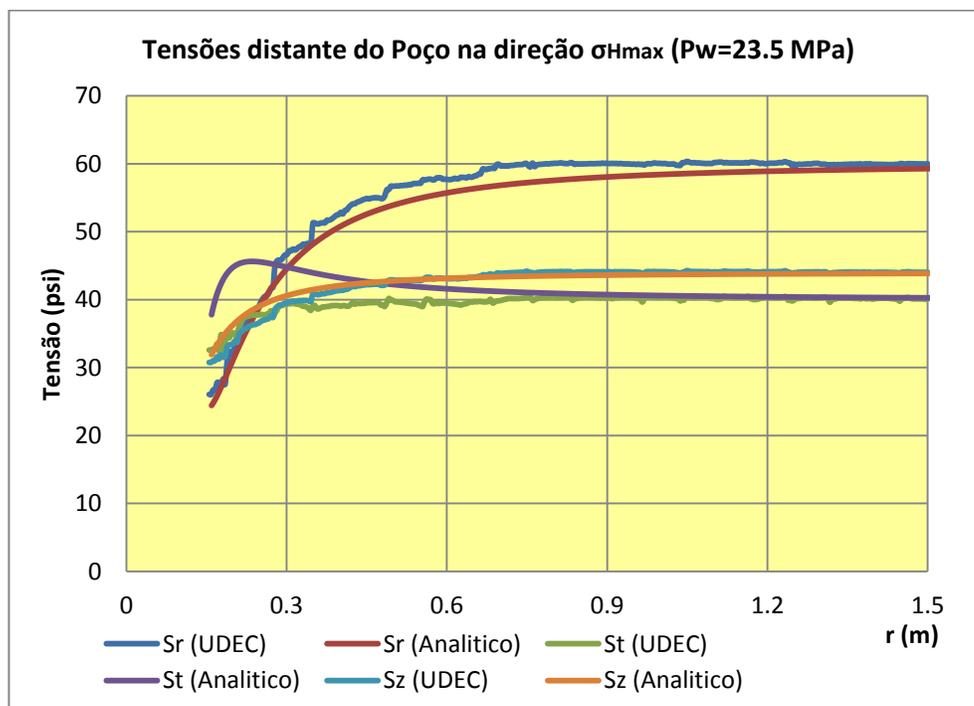


Figura 5. 10 – Tensões analíticas e numéricas atuando distante da parede do poço na direção da tensão horizontal máxima para o caso 12 e uma pressão de 23.5 MPa.

5.3. Distribuição de poropressão na modelagem analítica Vs Numérica

A distribuição da poropressão é afetada igualmente às tensões *in situ* pelos deslocamentos dos blocos de rocha próximos à parede do poço. As consequências deste efeito é que a poropressão seja gerada e que o valor mude dependendo do valor dos deslocamentos dos blocos e pressão dentro das fraturas. As figuras 5.11 mostram a distribuição de poropressão para o caso 8 na parede de poço impermeável para uma pressão na parede do poço de 23.5 MPa.

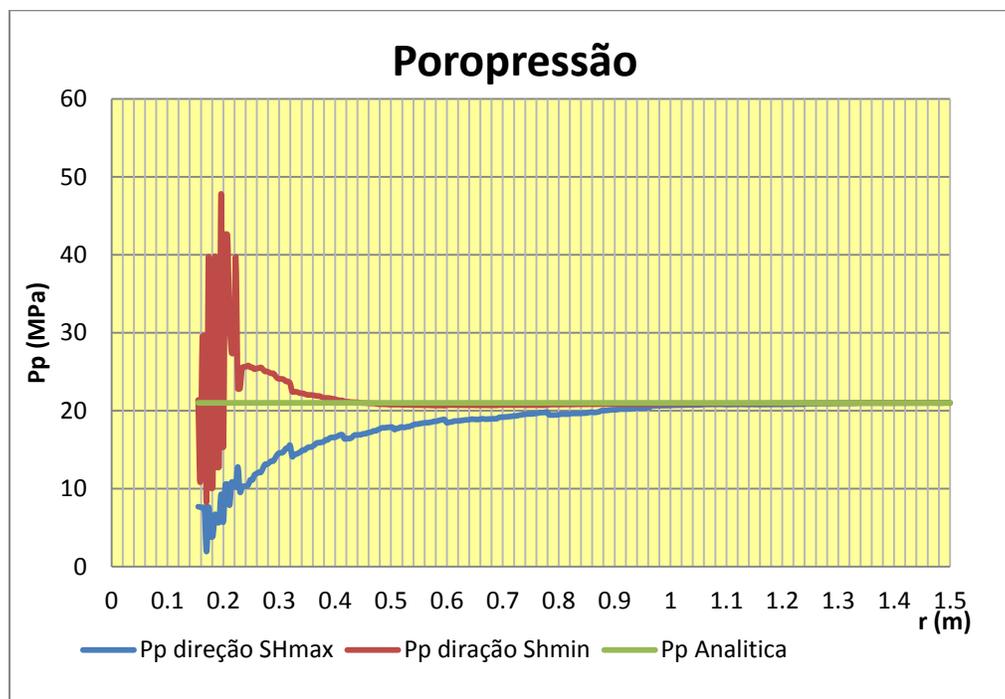


Figura 5. 11 – Distribuição da poropressão longe da parede do poço impermeável, para o modelo analítico e numérico.