

9

Análise e interpretação dos resultados

Para a interpretação dos resultados do gradiente de fratura obtido pelo método da tensão mínima apresentados na tabela (9.1) e para os casos determinístico, tabela (9.2), utilizou-se o critério do erro relativo, ou seja, o quanto cada resposta proveniente dos modelos propostos se distancia do valor real da pressão de quebra obtida in-situ. Para tal calculou-se a diferença entre o valor obtido pelo modelo proposto e o valor real (pressão de quebra), dividindo o resultado pelo valor real. Dessa forma pode-se avaliar em termos de porcentagem o erro de cada modelo. É importante notar que erros com valores positivos apontam que o modelo proposto está superestimado o real valor de quebra e valores negativos quando a resposta do erro estiver subestimando o real valor do gradiente de fratura.

Para os casos determinísticos obtidos através do cálculo da “Tensão tangencial” as respostas estão apresentadas de duas formas, a primeira separadas pelos modelos propostos figuras (9.3) a (9.6) onde é apresentado para cada poço o erro relativo dos três limites de gradiente de fratura calculado (limite inferior, valor médio, limite superior). Posteriormente é apresentado o mesmo resultado, porém plotado por poço, ou seja, todos os modelos propostos avaliados para um mesmo poço e nesse caso considerando para o cálculo do erro apenas o valor médio do gradiente de fratura, figuras (9.7) a (9.10).

9.1. Método das tensões mínimas

Tabela 9.1: Erro associado ao cálculo do gradiente de fratura para o método da tensão mínima

Erro associado ao método da Tensão mínima		
Poço	Erro Método de Hubbert&Willis	Erro Método de Eaton
A	-20,3%	-27,8%
B	-24,7%	-30,4%
C	-15,0%	-16,6%
D	-18,8%	-29,3%

Erro associado ao Método de Hubbert&Willis

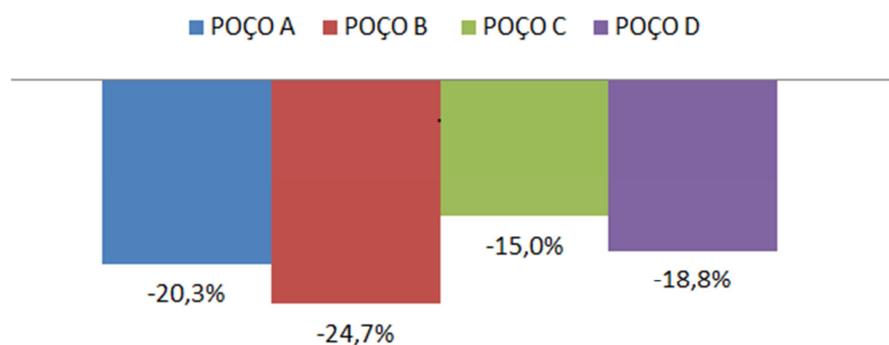


Figura 9-1: Erro associado ao cálculo do gradiente de fratura para o método da tensão mínima (Hubbert&Willis)

Erro associado ao Método de Eaton

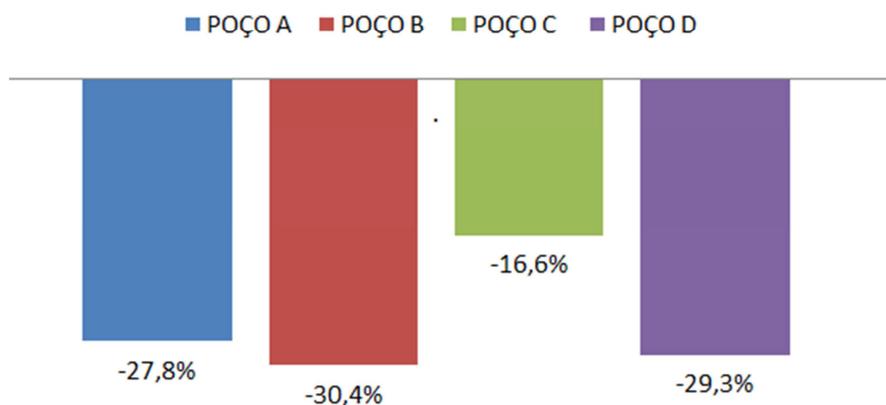


Figura 9-2: Erro associado ao cálculo do gradiente de fratura para o método da tensão mínima (método de Eaton)

Os resultados apresentados pelo “erro relativo” entre o valor do gradiente de fratura calculado pelo método da tensão mínima (modelo de Hubbert&Willis e Eaton), e o valor real medido “in-situ”, não deixam dúvidas em relação ao comportamento dos dois modelos. São modelos que subestimam o valor real do gradiente de fratura, para todos os poços analisados os resultados apresentaram valores menores do que os obtidos em campo, chegando a uma diferença de até 30,4% do valor real. Esse tipo de modelo reduz muito a janela operacional, podendo inviabilizar um projeto, ou encarece-lo desnecessariamente. Deve-se lançar mão dessa metodologia de análise quando da certeza da existência de uma região fraturada, onde o método da “Tensão tangencial” não se aplica ou na ausência de informações básica para a modelagem do método da “Tensão tangencial” ou quando se deseja ter apenas uma estimativa inicial.

9.2. Método “Tensão tangencial” – Determinístico :

Tabela 9.2: Tabela comparativa dos valores do gradiente de fratura dos modelos propostos e da pressão de quebra medida in-situ

Modelo	Poço	Pressão de quebra (in-situ) (lb/gal)	Limite inferior (lb/gal)	valor médio (lb/gal)	Limite superior (lb/gal)	Erro Limite inferior	Erro Valor médio	Erro Limite superior
Modelo Elás	A	13,8	14,4	15,3	16,2	4,3%	10,9%	17,4%
	B	15	15,6	16,4	17,2	4,0%	9,3%	14,7%
	C	14	13,7	14,5	15,3	-2,1%	3,6%	9,3%
	D	15,1	19,8	20,7	21,5	31,1%	37,1%	42,4%
Modelo poroelástico de Detournay	A	13,8	13,5	14,6	15,7	-2,2%	5,8%	13,8%
	B	15	12,9	13,8	14,7	-14,0%	-8,0%	-2,0%
	C	14	11,8	12,9	14	-15,7%	-7,9%	0,0%
	D	15,1	14,6	15,5	16,4	-3,3%	2,6%	8,6%
Modelo "sleeve fracturing"	A	13,8	13,6	15	15,9	-1,4%	8,7%	15,2%
	B	15	13,2	14,6	16,3	-12,0%	-2,7%	8,7%
	C	14	12,8	13,8	14,2	-8,6%	-1,4%	1,4%
	D	15,1	17,2	19	20,7	13,9%	25,8%	37,1%
Modelo elástico com influência térmica	A	13,8	X	15,2	X		10,1%	
	B	15	X	16,3	X		8,7%	
	C	14	X	14,3	X		2,1%	
	D	15,1	X	20,5	X		35,8%	

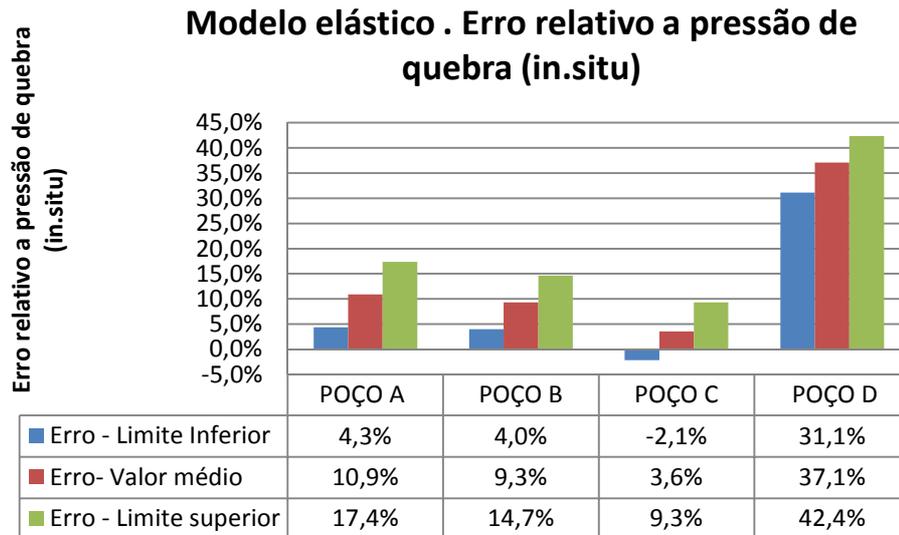


Figura 9-3: Erro associado ao cálculo do gradiente de fratura para o método da “Tensão tangencial” modelo elástico não penetrante

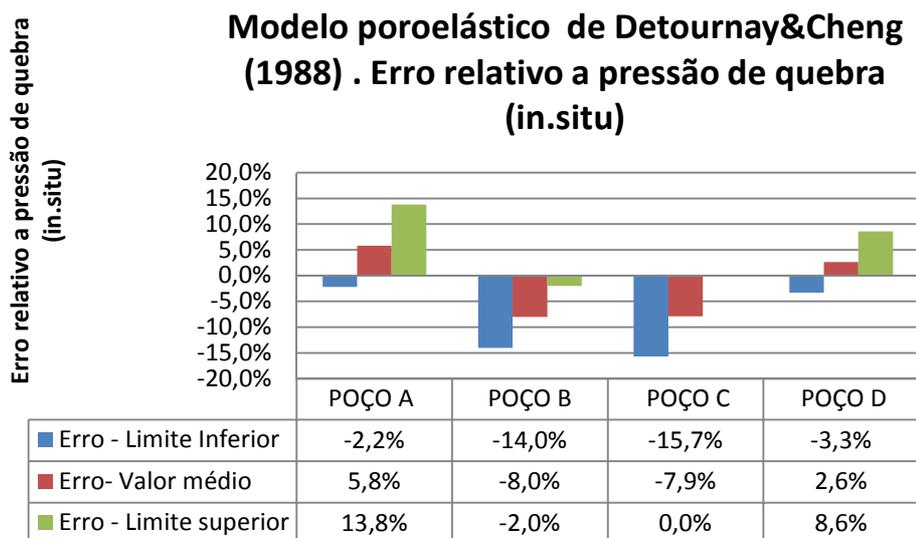


Figura 9-4: Erro associado ao cálculo do gradiente de fratura para o método da “Tensão tangencial” modelo poroelástico de Detournay&Cheng (1988)

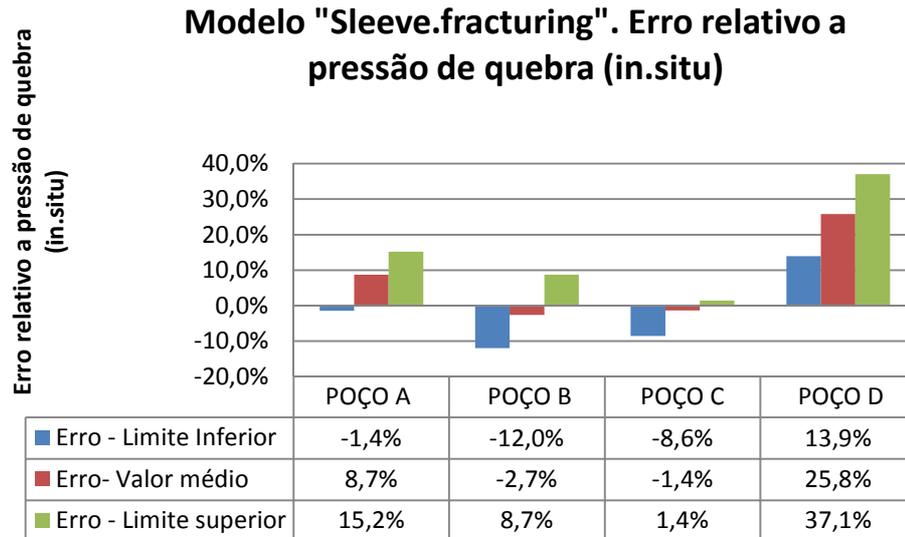


Figura 9-5: Erro associado ao cálculo do gradiente de fratura para o método da “Tensão tangencial” modelo “Sleeve-fracturing”

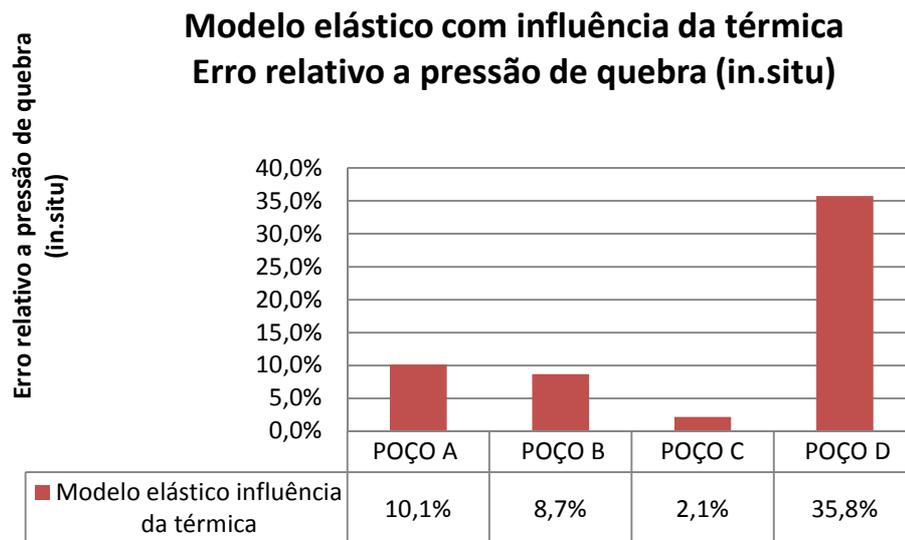


Figura 9-6: Erro associado ao cálculo do gradiente de fratura para o método da “Tensão tangencial” modelo elástico não penetrante com influência térmica

Poço A - Erro relativo a pressão de quebra medida (in-situ)

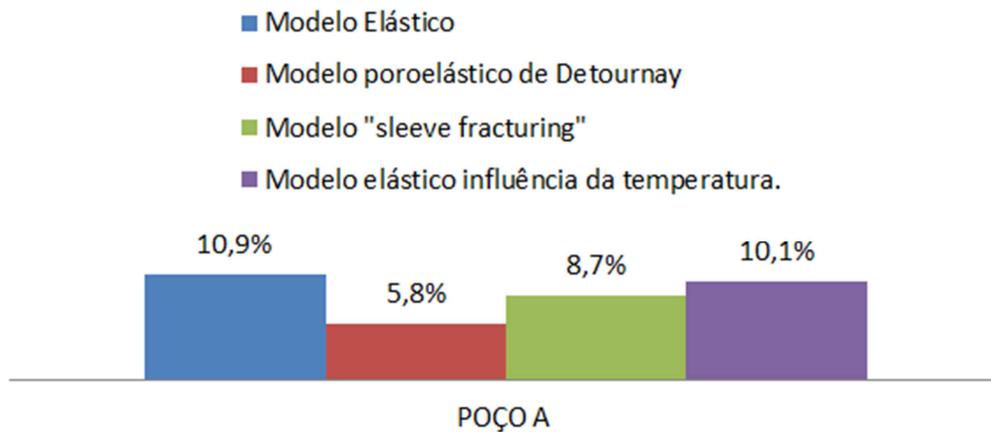


Figura 9-7: Resposta do erro associado ao gradiente de fratura (pressão de quebra) para os quatro modelos propostos do poço A

Poço B - Erro relativo a pressão de quebra medida (in-situ)

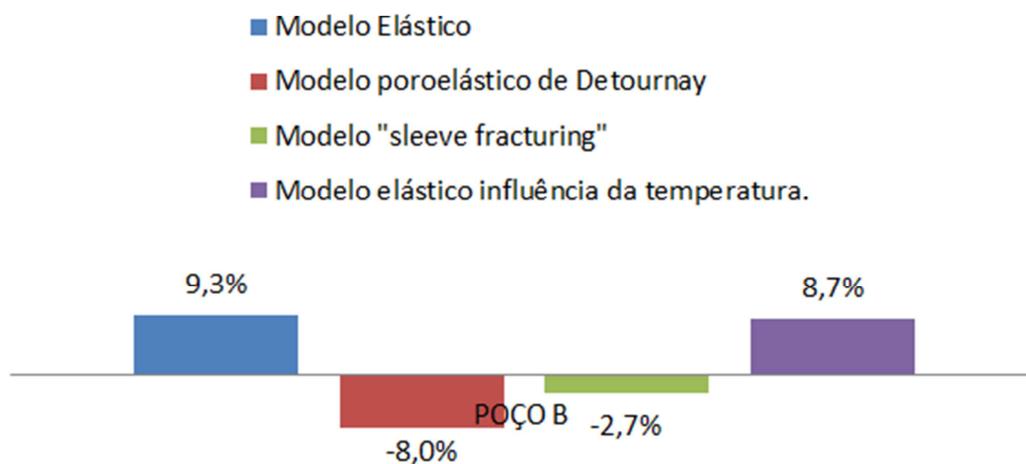


Figura 9-8: Resposta do erro associado ao gradiente de fratura (pressão de quebra) para os quatro modelos propostos do poço B

Poço C . Erro relativo a pressão de quebra medida (in.situ)

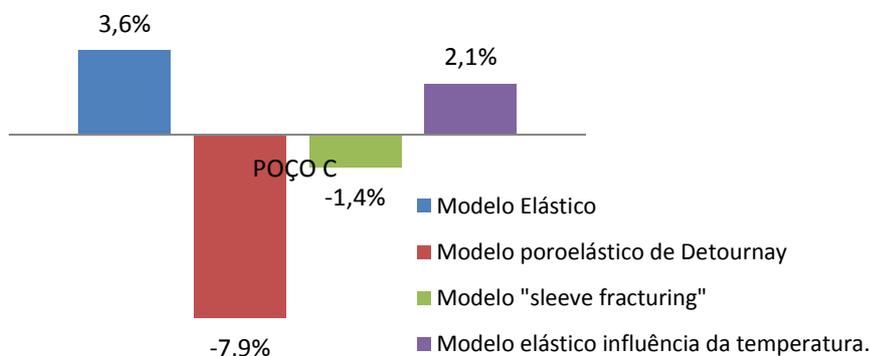


Figura 9-9: Resposta do erro associado ao gradiente de fratura (pressão de quebra) para os quatro modelos propostos do poço C

Poço D - Erro relativo a pressão de quebra medida (in-situ)

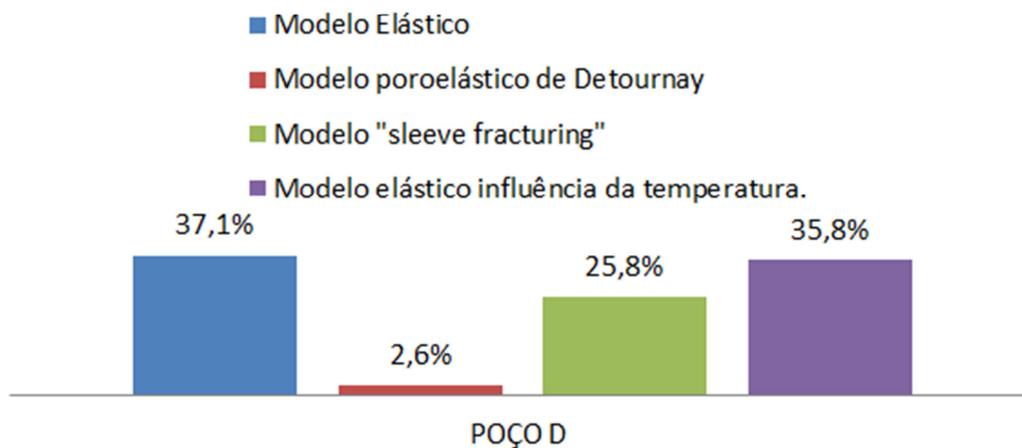


Figura 9-10: Resposta do erro associado ao gradiente de fratura (pressão de quebra) para os quatro modelos propostos do poço D

Os resultados apresentados acima para o modelo “Tensão tangencial” com abordagem determinística apresentam algumas características importantes. A primeira é a influência do estado de tensão na resposta do modelo. Observa-se que, para um mesmo poço e modelo proposto, ocorre uma grande diferença na

resposta do gradiente de fratura, ao se variar o valor da tensão horizontal máxima (limite inferior, valor médio e limite superior).

Nota-se também que o modelo puramente elástico, mesmo influenciado por essa flutuação (variação da tensão horizontal máxima), teve na sua grande maioria valores de resultado de gradiente de fratura, superestimando o valor obtido in-situ, demonstrando que, deixar de considerar outros efeitos na construção do modelo de gradiente de fratura, pode torna-lo muito simplificado, levando a resultados não realísticos. Observa-se também que a inclusão no modelo elástico da influência apenas do efeito térmico (devido ao resfriamento da parede do poço pelo fluido de perfuração), para os poços analisados, não resultou em grandes melhorias para a resposta do modelo. É importante notar que para o cenário estudado a diferença entre a temperatura da formação e do fluido não era muito expressiva, a depender dessa diferença a inclusão desse efeito pode tornar-se de extrema importância. Os modelos poroelástico de Detournay&Cheng (1988) e o modelo poroelástico não penetrante *sleeve-fracturing* se alternaram como melhor estimativa para o gradiente de fratura, o que pode ser visto nas análises apresentadas separadas por poço.

Porém o estudo puramente determinístico, onde fica evidente a sua fragilidade em virtude do alto grau de sensibilidade da resposta do modelo, aos parâmetros de entrada, restringe qualquer tentativa no intuito de se apontar um modelo de gradiente de fratura mais representativo, sugerindo uma análise mais detalhada, através de um estudo probabilístico como o realizado pelo método de Monte Carlo.

9.3. Método “Tensão tangencial” - Monte Carlo

Como critério de análise para o grau de “representatividade” dos modelos propostos para estimativa do gradiente de fratura usando o método de Monte Carlo, determinou-se o grau de precisão dos valores de gradiente de fratura obtido em cada modelo proposto em relação ao valor de pressão de quebra real obtido in-situ, com uma tolerância de 0,5 lb/gal, conforme apresentado pela tabela (9.3).

Esse valor foi obtido através do cálculo da probabilidade de ocorrência desse intervalo (valor de pressão de quebra obtido in-situ + 0,5 lb/gal) no conjunto das cinco mil respostas, de gradiente de fratura, geradas por cada modelo e em cada poço. Para isso calculou-se a área abaixo da curva de distribuição normal, de cada poço e modelo, respeitando como limite superior o valor medido “in-situ” de pressão de quebra acrescentado de 0,5 lb/gal e o limite inferior decrescido de 0,5lb/gal.

Tabela 9.3: Valor de pressão de quebra com limite de tolerância

Poço	Pressão de quebra medido in situ (lb/gal)	Tolerância Limite inferior	Tolerância Limite superior
A	13,8	13,3	14,3
B	15	14.5	15.5
C	14	13.5	14.5
D	14.8	15.3	15.8

Tabela 9.4: Tabela com grau de “representatividade” do real valor do gradiente de fratura (obtido in-situ) para os modelos propostos através das análises de Monte Carlo

POÇO	Representatividade do Modelo elástico	Representatividade do Modelo poroelástico - Detournay	Representatividade do Modelo "Sleeve fracturing"	Representatividade do Modelo Elástico com influência térmica
A	14,4%	27,1%	15,3%	14,8%
B	14,9%	19,7%	17,6%	15,2%
C	18,1%	21,5%	18,7%	18,9%
D	1,2%	30,5%	4,6%	1,8%

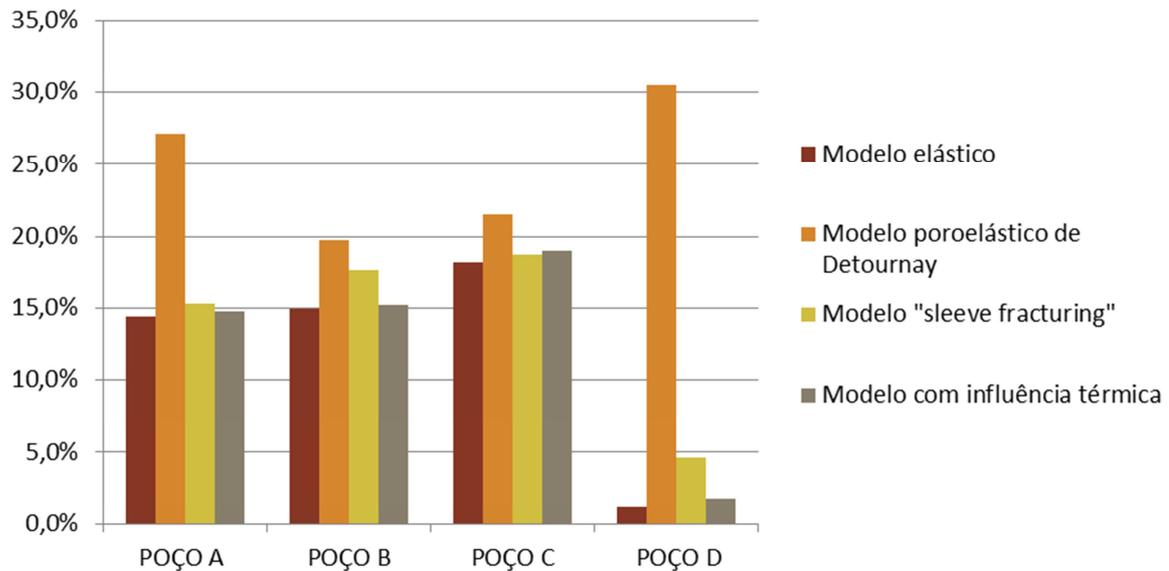


Figura 9-11: Gráfico com grau de “representatividade” do real valor do gradiente de fratura (obtido in-situ) para os modelos propostos através das análises de Monte Carlo

Com o uso das respostas obtidas através da simulação de Monte Carlo, pode-se observar que o modelo poroelástico de Detournay&Cheng (1988) foi o que melhor representou o real valor de gradiente de fratura para todos os poços analisados. A resposta do modelo poroelástico não penetrante - *sleeve fracturing* que se alterna como a melhor alternativa para representar o gradiente de fratura real, na simulação determinística, aparece como a segunda melhor opção seguida dos modelos elástico com influência térmica e o puramente elástico.

Com a curva de função de distribuição de probabilidade gerada para cada poço e modelo proposto, figuras (8.17) a (8.44) foi possível calcular se a resposta de um determinado modelo tem tendência de subestimar ou superestimar o real valor de gradiente de fratura obtido in-situ. Para isso determinou-se a probabilidade de tal modelo apresentar respostas com valores abaixo ou acima da pressão de quebra obtida in-situ, através do cálculo da área abaixo da curva de função de probabilidade. As tabelas (9.5) e (9.6) apresentam essa tendência separada por poço e modelo. Essa mesma análise foi apresentada também separada só por modelo, através das figuras (9.2) a (9.15).

Tabela 9.5: porcentagem de respostas que subestima o real valor de pressão de quebra medido in-situ para os modelos propostos nos diferentes poços analisados

Resposta da simulação de Monte Carlo subestimando o valor da pressão de quebra (in-situ) para cada modelo				
POÇO	Modelo elástico	Modelo poroelástico Detournay	Model "Sleeve fracturing"	Modelo Elástico com influência da temperatura
A	24%	31%	28%	27%
B	26%	83%	57%	28%
C	42%	79%	57%	47%
D	1%	40%	6%	2%

Tabela 9.6: porcentagem de respostas que superestima o real valor de pressão de quebra medido in-situ para os modelos propostos nos diferentes poços analisados

Resposta da simulação de Monte Carlo superestimando o valor da pressão de quebra (in-situ) para cada modelo				
POÇO	Modelo elástico	Modelo poroelástico Detournay	Modelo "Sleeve fracturing"	Modelo Elástico com influência da temperatura
A	76%	69%	72%	74%
B	75%	17%	43%	72%
C	59%	21%	43%	53%
D	99%	60%	94%	98%

Modelo Poroelástico de Detournay&Cheng (1988)

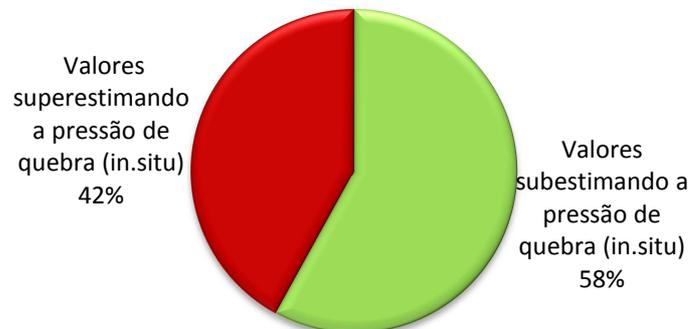


Figura 9-12: porcentagem dos valores que subestimaram ou superestimaram o real valor de quebra medido in-situ para o modelo poroelástico de Detournay&Cheng (1988)

Modelo elástico não penetrante

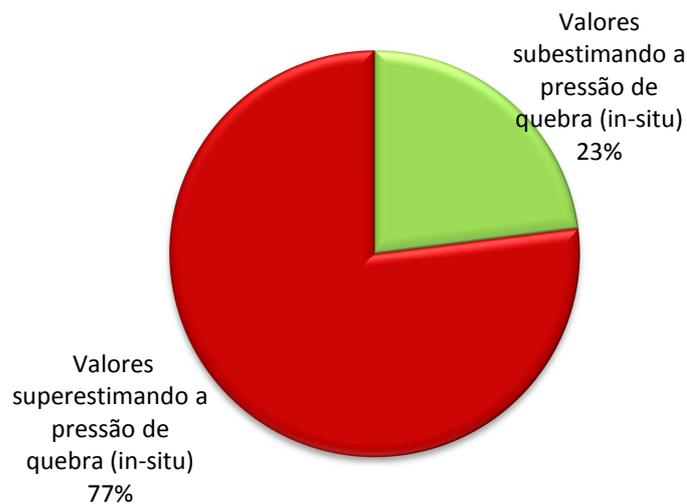


Figura 9-13: porcentagem dos valores que subestimaram ou superestimaram o real valor de quebra medido in-situ para o modelo elástico não penetrante

Modelo "Sleeve fracturing"

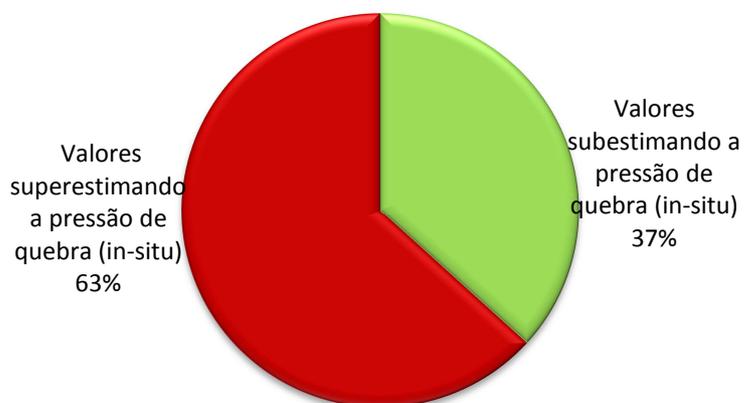


Figura 9-14: porcentagem dos valores que subestimaram ou superestimaram o real valor de quebra medido in-situ para o modelo "Sleeve-fracturing"

Modelo Elástico com influência térmica

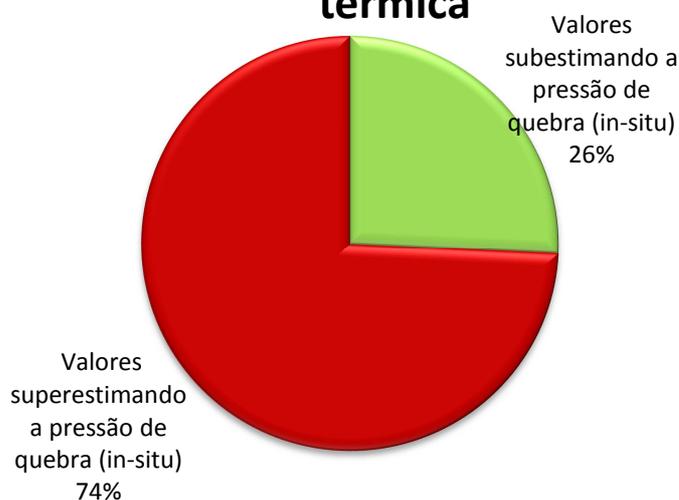


Figura 9-15: porcentagem dos valores que subestimaram ou superestimaram o real valor de quebra medido in-situ para o modelo elástico não penetrante com influência térmica

A resposta apresentada pelas figuras (9.12) a (9.15) servem como complemento aos resultados apresentados na tabela (9.4). Em resumo temos que o

modelo mais representativo do gradiente de fratura nesse estudo é o poroelástico de Detournay&Cheng (1988) com uma tendência a subestimar os valores, seguido do modelo poroelástico não penetrante - *sleeve-fracturing*, modelos elástico com influência térmica e o puramente elástico, todos esses com tendência a superestimar os valores de gradiente de fratura. Nos modelos elásticos com e sem a influência térmica a probabilidade de superestimar passa dos 70% (setenta por cento).

Modelos que superestimam o real valor do gradiente de fratura, provavelmente conduzem a um resultado de janela operacional aparentemente favorável, mascarando a necessidade de possíveis assentamentos de revestimentos, levando a uma situação potencialmente perigosa, em relação a segurança do poço, possibilitando eventos não desejados, tais como perda de fluido por faturamento hidráulico da formação. No caso de modelos que subestimem esse valor, a atenção deve estar associada ao encarecimento do projeto do poço, dada a uma possível previsão não realista da necessidade de um maior número de revestimento, porém não está sujeito a riscos inerentes a segurança da operação.