

7

Resultados e discussão

Serão apresentados a seguir os resultados dos ensaios experimentais, das simulações numéricas e, na seqüência, um trabalho comparativo entre estes dois tópicos.

7.1.

Ensaio experimentais

Com o objetivo de validar o modelo matemático desenvolvido, foi realizada uma bateria de testes, em um simulador físico, com cerca de 61 metros (200 pés) de extensão. As demais dimensões, capacidades e características dos equipamentos utilizados já foram relatadas no item 5.2 desta Dissertação.

No simulador, foram instaladas telas de *gravel-pack* em seções subdivididas de 10 tubos-base, cada um com cerca de 20 pés (6,1 metros) de comprimento. Foram instalados 4 transdutores de pressão para monitoramento em tempo real e obtenção dos registros de pressão durante os testes. Os transdutores foram instalados nas posições ilustradas na Figura 7.1. O primeiro transdutor (T1) foi instalado no início do simulador junto da cabeça de injeção, podendo ser visto também na Figura 5.6. O segundo transdutor (T2) foi instalado no meio do terceiro tubo-base a uma distância de 15,24 metros (50 pés) do início do simulador. Já o terceiro transdutor (T3), foi instalado ao final do 5º tubo-base, distante 30,48 metros (100 pés) do início do simulador físico. E finalmente, o quarto transdutor (T4), foi instalado no final do simulador, a uma distancia de 61 metros (200 pés) do seu início.

Podemos ver também, na Figura 7.1, esquematicamente, como o fluxo será desviado do anular poço-tela para o anular tela-*washpipe*, bem como será o retorno por dentro do *washpipe*. O Quadro 7.1 mostra a distribuição não-uniforme de furos feitos no tubo-base obtida do modelo

de Fernandes [45]. Cada furo foi feito com um diâmetro de $\frac{1}{4}$ de polegada concentrados no centro de cada tubo-base.

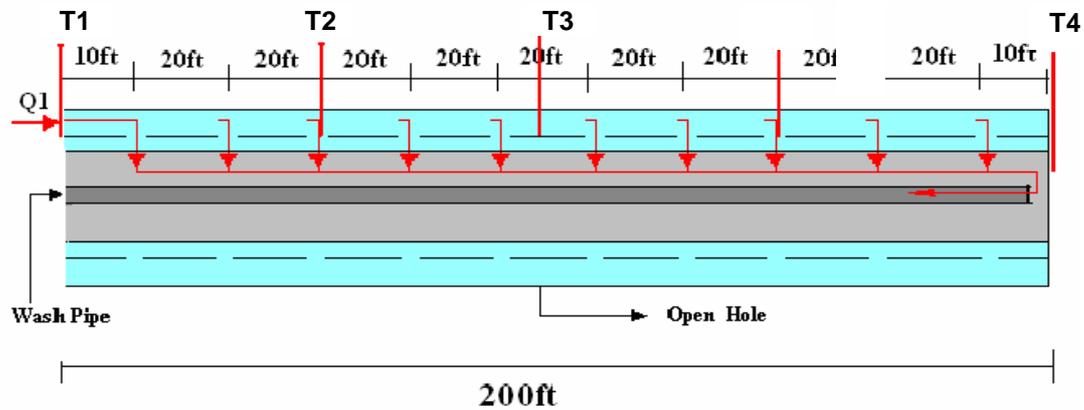


Figura 7.1 - Esquema do simulador físico com o posicionamento dos transdutores

Quadro 7.1 - Distribuição de furos nos tubos-base

Tube-base nº	Número de furos	Área equivalente aberta ao fluxo (m ²)
1	4	1,27E-04
2	5	1,58E-04
3	6	1,90E-04
4	7	2,22E-04
5	10	3,17E-04
6	13	4,12E-04
7	20	6,33E-04
8	35	1,11E-03
9	89	2,82E-03
10	194	6,14E-03

Foram utilizados tipos de material sólido (propante) mais representativos daqueles utilizados em campo. A granulometria de tais propantes utilizados foi a mais adequada para ser usado como agente de sustentação, conforme a distribuição granulométrica dos reservatórios Brasileiros. O Quadro 7.2 mostra a matriz de testes, bem como as máximas pressões esperadas ao fim do empacotamento.

Quadro 7.2 - Matriz de teste

Teste	Vazão (bpm)	Tipo de sólido	Granulometria (mesh)	Conc. (ppa)	Máxima pressão esperada (psi)
2A	3	Areia	20/40	1	180
2B	5 --> 3	Areia	20/40	1	457
2C	3	Propante Leve	16/40	1	180
2D	5 --> 3	Propante Leve	16/40	1	180

É importante notar que, tanto o teste 2B quanto o teste 2D, foram projetados para serem iniciados com uma vazão de 5 bpm e após a formação da onda beta previu-se a diminuição da vazão de bombeio para 3 bpm.

Nas Figuras 7.2, 7.3, 7.4 e 7.5, a seguir, são apresentados os gráficos dos quatro testes realizados, onde são plotados, no eixo vertical à esquerda, os registros de pressão para o transdutor (T1) em psi, bem como a taxa de adição de sólidos (*Sand Rate*) em lb/min. No eixo vertical, à direita, são plotados os demais registros de pressão, dos transdutores T2, T3 e T4, bem como a vazão de bombeio em bpm's e a concentração de sólidos em ppa (ver quadro de siglas).

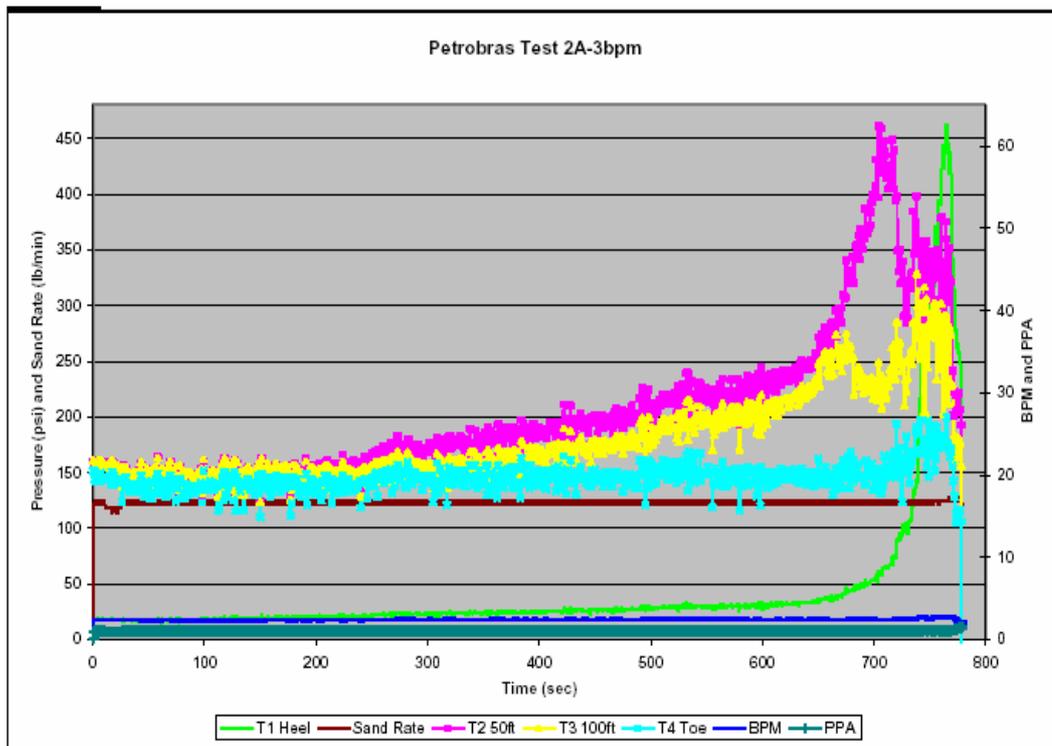


Figura 7.2 - Registro do teste 2A

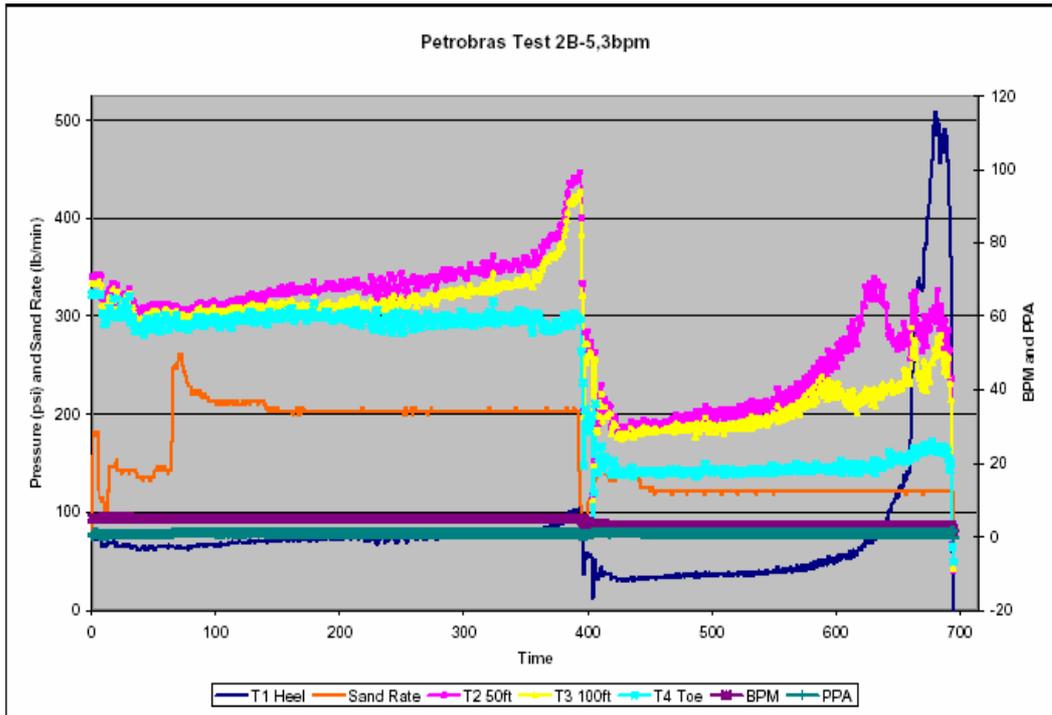


Figura 7.3 - Registro do teste 2B

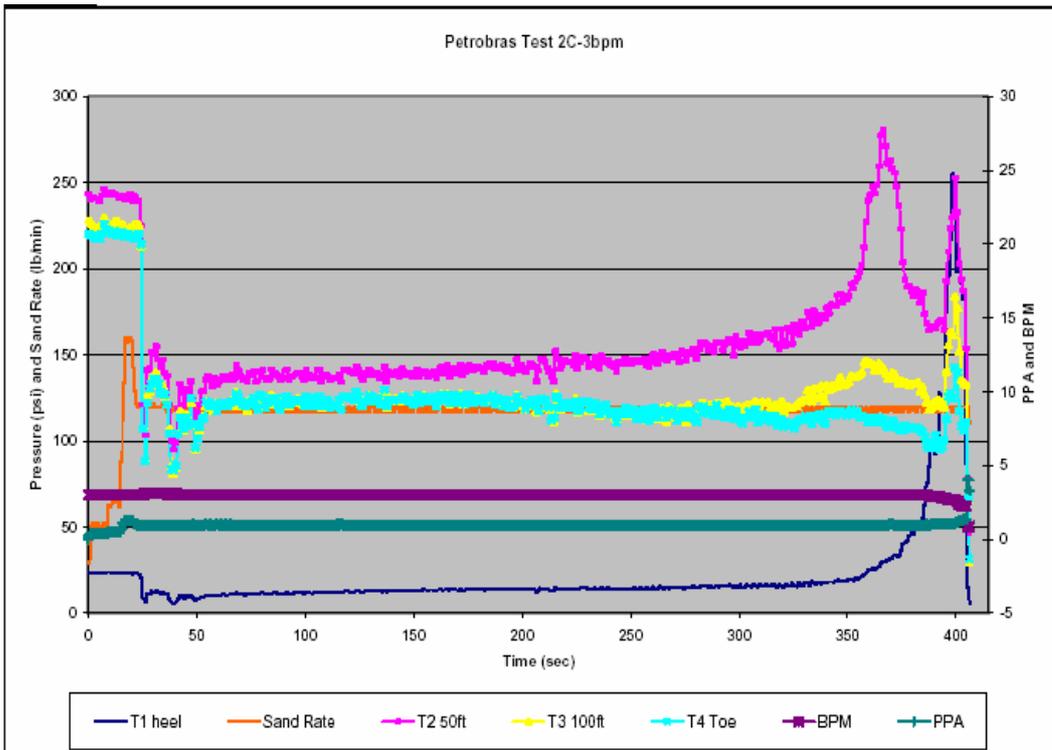


Figura 7.4 - Registro do teste 2C

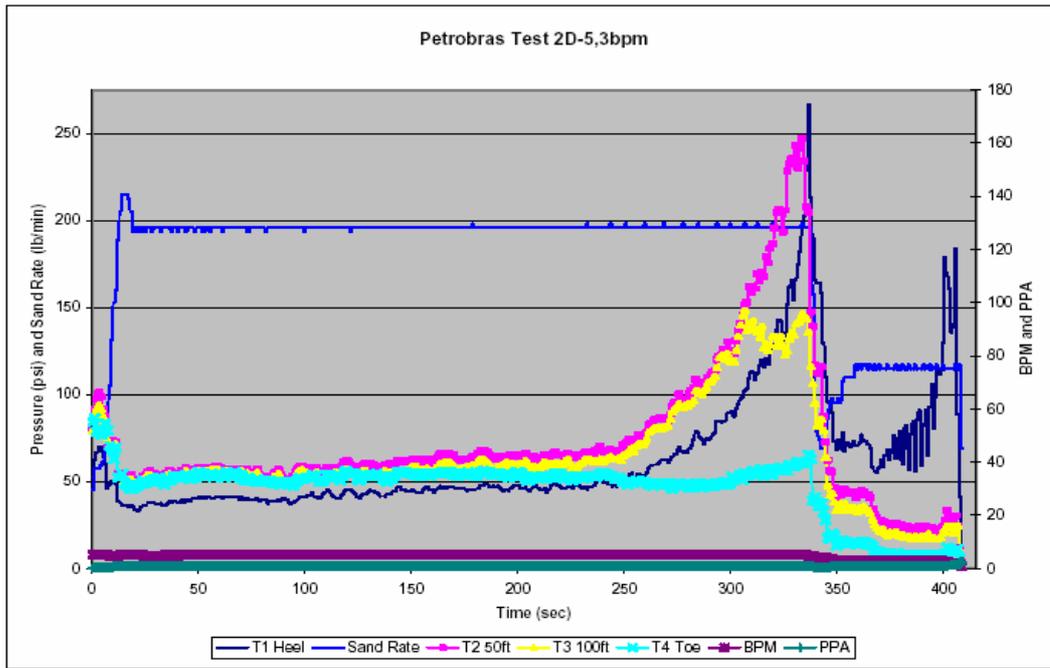


Figura 7.5 - Registro do teste 2D

Portanto, nos gráficos anteriores, a curva azul mostra o registro de pressão feito pelo transdutor T1, a rosa pelo transdutor T2, a amarela pelo T3 e a azul clara pelo T4. É importante notar que, os dados do transdutor T1 são plotados numa escala diferente, e portanto, atingem, como é de se esperar, os maiores valores. Notar também que ao fim da operação, o chamado “screen out”, que denota o total empacotamento, pode ser observado em todos os teste como um pico de pressão acentuado onde, após o mesmo, o bombeio é cessado e as pressões conseqüentemente, vão a valores nulos. Outro comportamento observado nos gráficos que merece destaque refere-se a quando a onda beta passa pelos transdutores. Quando isto ocorre, não há mais escoamento no ponto e, conseqüentemente, não há mais registro de pressão. Isto fica evidenciado de modo bem claro em todos os gráficos apresentados, onde se pode notar um repentino decréscimo de pressão quando a onda beta plugeia o registrador.

As Figuras 7.6 a 7.9 mostram as fotos feitas ao fim de cada teste. Plugues presos ao corpo principal do simulador eram removidos, dando acesso ao anular poço-tela. A visualização do leito de *gravel* formado mostra qualitativamente o grau de empacotamento alcançado.



Figura 7.6 - Imagens da qualidade do empacotamento capturadas ao fim do teste 2A

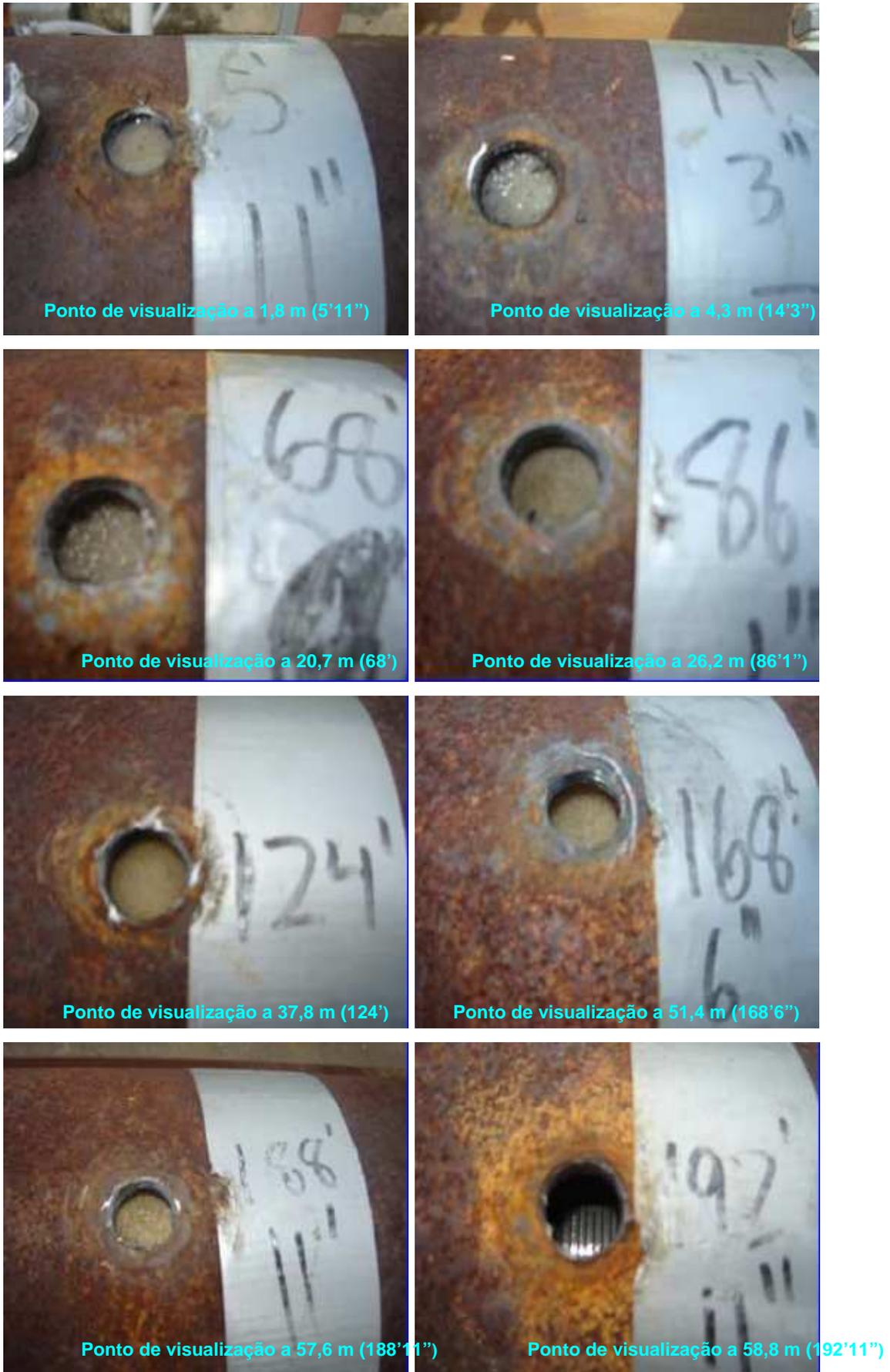


Figura 7.7 - Imagens da qualidade do empacotamento capturadas ao fim do teste 2B



Figura 7.8 - Qualidade do empacotamento referente ao teste 2C

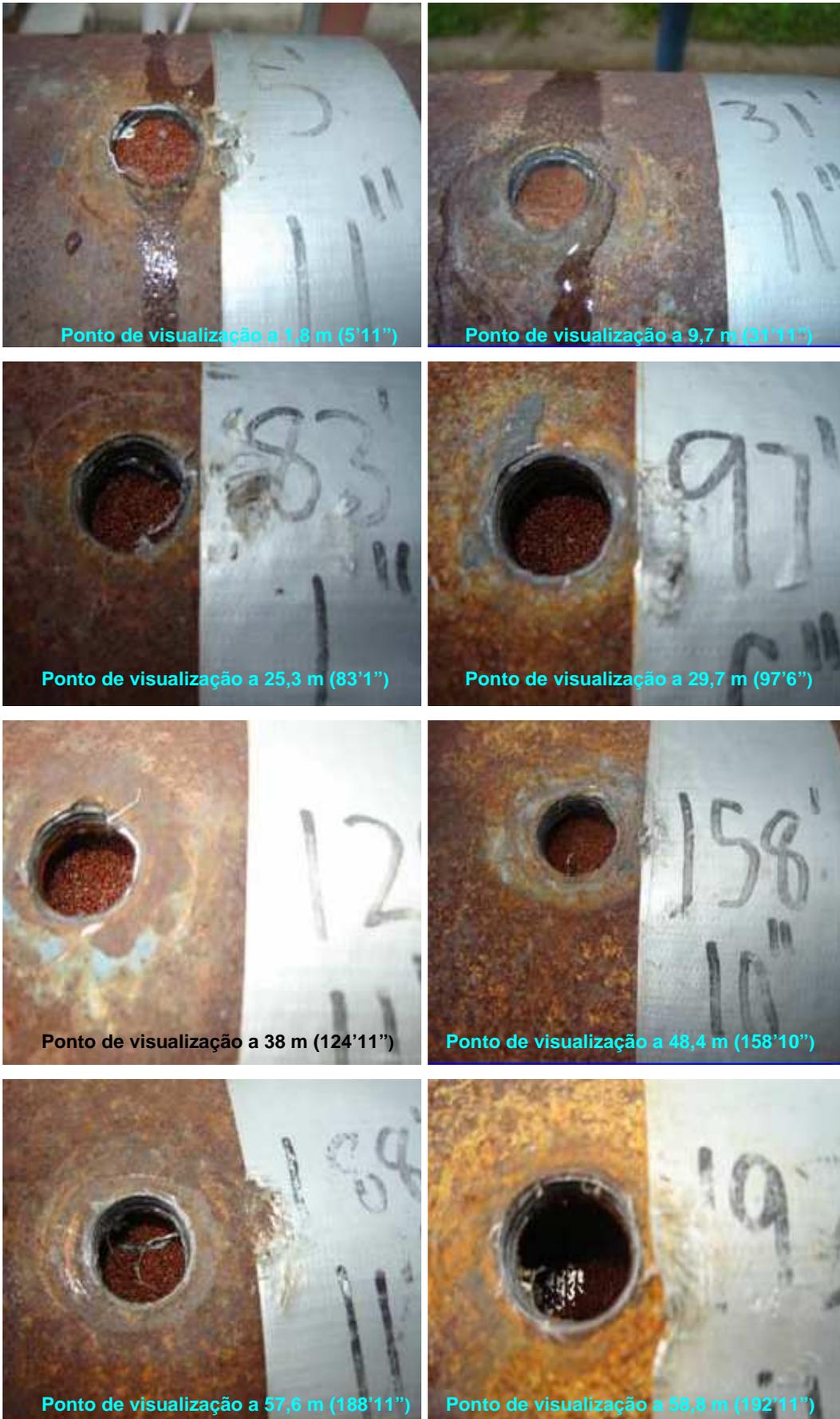


Figura 7.9 - Qualidade do empacotamento referente ao teste 2D

Após cada teste, todo o material sólido contido no simulador, mangueiras e no infusor de *gravel* foi bombeado para fora do simulador físico, sendo coletado em uma caixa cujas paredes eram revestidas por uma tela, apropriada para ser permeável à água e reter o material sólido. A mesma caixa continha, presa às suas paredes, régua para medição do volume de sólidos coletado. A Figura 7.10 mostra uma visão geral da referida caixa coletora, enquanto que as Figuras 7.11 a 7.14 mostram o volume coletado em cada um dos quatro testes enquanto que o Quadro 7.3 resume os resultados para os volumes coletados.



Figura 7.10 - Caixa coletora de sólidos



Figura 7.11 - Volume coletado no teste 2A



Figura 7.12 - Volume coletado no teste 2B



Figura 7.13 - Volume coletado no teste 2C



Figura 7.14 - Volume coletado no teste 2D

Quadro 7.3 - Volume e massa coletados após os testes

Volume teórico do simulador --> 0,48m ³ --> (17 pés ³)			
Massa teórica 824,6kg de areia (1818lb) ;554,3kg de Prop. Leve (1222lb)			
Teste	Altura na caixa coletora	Volume coletado	Massa coletada
2A	0,3175m (12,5 pol)	0,4485m ³ (15,84 pés ³)	768,49kg (1694,24 lbs)
2B	0,3683m (14,5 pol)	0,5204m ³ (18,38 pés ³)	891,45kg (1965,31 lbs)
2C	0,2540m (10,0 pol)	0,3588m ³ (12,67 pés ³)	365,77kg (806,38 lbs)
2D	0,3937m (15,5 pol)	0,5564m ³ (19,65 pés ³)	566,94kg (1249,89 lbs)

Os volumes e massas coletadas acima dos valores teóricos são devidos ao excesso de sólidos acumulados nas mangueiras e no infusor de *gravel*.

Em todos os testes realizados foi observado um empacotamento incompleto de sólidos (Figuras 7.6 a 7.9), provavelmente devido ao modo de como os furos foram feitos nos tubos-base. Tais furos foram feitos sempre concentrados na região central de cada tubo-base. Desta forma, acredita-se que foram criadas zonas de intensa convergência de fluxo para dentro do anular tela-*washpipe*, fato que pode ter acarretado alturas de onda alfa extremamente elevadas, levando ao embuchamento prematuro nestas regiões. Foi observado um melhor empacotamento nos testes 2B e 2D, onde o teste era iniciado com vazões de 5 bpm's posteriormente reduzida para 3 bpm's. A maior vazão inicial, nestes dois testes, contribuiu para a formação de ondas alfa mais baixas que nos testes de 3 bpm's, contribuindo assim para a diminuição do risco de embuchamento prematuro em regiões onde isto ocorreu para as vazões de 3 bpm's. Nestes dois testes o embuchamento prematuro foi observado somente no último tubo base, aproximadamente a 58 metros do início do simulador, onde haviam 194 perfurações.

7.2. Simulação numérica

Os testes no simulador físico foram repetidos, computacionalmente, de modo a validar o presente modelo. Todos os dados de entrada, tais como, extensão do simulador, diâmetros do simulador, telas e *washpipes*, bem como, tipo de sólidos alimentados, granulometria, concentração e vazão de bombeio, foram inseridos no simulador computacional. A extensão total do simulador físico foi dividida em 10 porções, onde cada uma delas representa um dos dez tubos-base presentes. A densidade de furos de cada tubo-base foi alimentada através de um vetor no qual havia 10 posições e, em cada posição, foi alimentada a quantidade de furos do tubo-base em questão. Desta forma, foi possível

calcular quanto da vazão inicial (de entrada) se divide e escoar por cada um dos dois anulares presentes.

O cálculo da divisão de vazões foi feito, de forma discreta, em cada tubo base, para toda a etapa de propagação da onda alfa e para cada vez que a onda beta cobria um dos tubos-base, eliminando assim, do cálculo, os furos do tubo-base coberto. O Quadro 7.4 apresenta a divisão de vazões, baseada nas simulações numéricas, para a etapa antes da formação da onda beta enquanto que a Figura 7.15 mostra graficamente o balanço de vazões para esta mesma etapa. Os Quadros 7.5 a 7.13 apresentam o balanço de vazões para cada uma das etapas, aqui descritas, quando a onda beta passa do décimo até o primeiro tubo-base, com uma vazão de entrada de 3 bpm's.

Quadro 7.4 - Divisão das vazões antes da onda beta para uma vazão de entrada de 3 bpm's

Tubo-base n ^o	N ^o de furos	Q _{poço-tela} (bpm)	Acum.	%	Q _{tela-washpipe} (bpm)	Acum.	%	Altura rel. da onda alfa	
1	4	2,9991	***	99,97	0,0009	0,1883	0,03	0,3969	
2	5	2,9980	***	99,96	0,0011	0,1894	0,04	0,3971	
3	6	2,9965	***	99,95	0,0015	0,1910	0,05	0,3975	
4	7	2,9944	***	99,93	0,0021	0,1930	0,07	0,3980	
5	10	2,9909	***	99,88	0,0035	0,1965	0,12	0,3988	
6	13	2,9849	***	99,79	0,0060	0,2025	0,21	0,4003	
7	20	2,9717	***	99,53	0,0132	0,2157	0,47	0,4035	
8	35	2,9310	***	98,55	0,0407	0,2565	1,45	0,4135	
9	89	2,6807	***	91,10	0,2503	0,5068	8,90	0,4741	
10	194	0,1874	***	11,35	2,4932	3,0000	88,65	0,8200	
			Total	100,00				Total	100,00

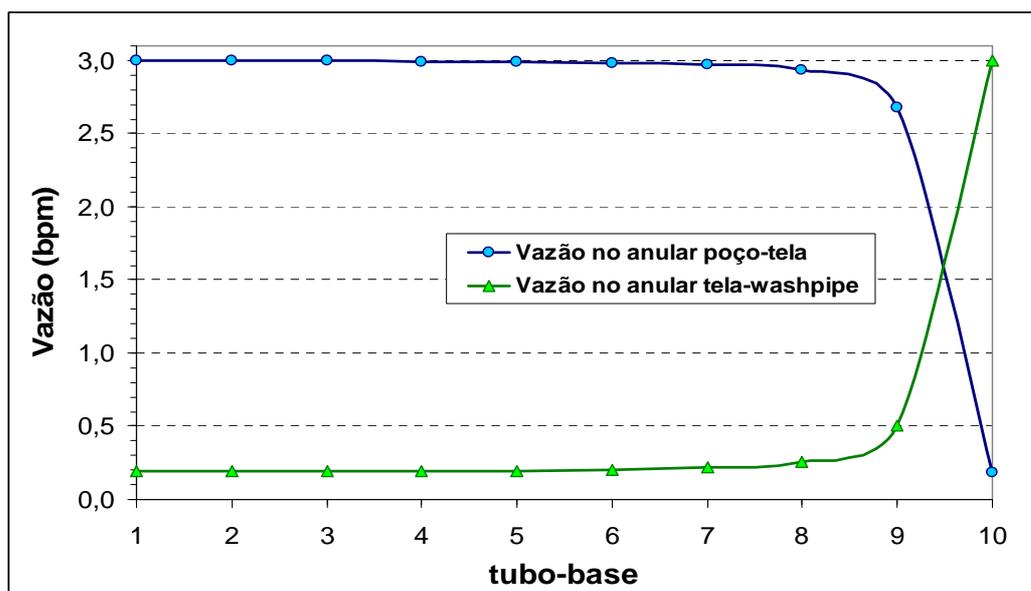


Figura 7.15 - Balanço das vazões ao longo do simulador físico

É importante notar aqui, que o balanço de massa fecha para as simulações numéricas onde, ao fim do simulador, a vazão no anular tela-*washpipe* alcança o mesmo valor da vazão de entrada (3 bpm's). Notar também que no último tubo-base há um decréscimo acentuado na vazão que escoa pelo anular poço-tela, devido à grande concentração de furos. Portanto fica comprovado, através do modelo computacional, o que já havia sido observado nos testes com o simulador físico, ou seja, a intensa convergência do fluxo para dentro das telas gerando conseqüentemente o embuchamento prematuro no último tubo-base.

Quadro 7.5 - Divisão das vazões quando a onda beta passa pelo décimo tubo-base

Tubo-base nº	Nº de furos	Q _{poço-tela} (bpm)	%	Q _{tela-washpipe} (bpm)	Acum.	%
1	4	2,9830	99,40	0,0170	0,20	0,60
2	5	2,9609	99,22	0,0391	0,23	0,78
3	6	2,9330	99,01	0,0670	0,25	0,99
4	7	2,8979	98,75	0,1021	0,29	1,25
5	10	2,8430	98,05	0,1570	0,34	1,95
6	13	2,7595	97,03	0,2405	0,43	2,97
7	20	2,5992	94,30	0,4008	0,59	5,70
8	35	2,1907	85,48	0,8093	1,00	14,52
9	89	0,1874	28,77	2,8126	3,00	71,23

Quadro 7.6 - Divisão das vazões quando a onda beta passa pelo nono tubo-base

Tubo-base nº	Nº de furos	Q _{poço-tela} (bpm)	%	Q _{tela-washpipe} (bpm)	Acum.	%
1	4	2,9299	97,51	0,0701	0,26	2,49
2	5	2,8400	96,80	0,1600	0,35	3,20
3	6	2,7278	96,01	0,2722	0,46	3,99
4	7	2,5898	95,09	0,4102	0,60	4,91
5	10	2,3791	92,51	0,6209	0,81	7,49
6	13	2,0714	89,06	0,9286	1,12	10,94
7	20	1,5108	80,07	1,4892	1,68	19,93
8	35	0,1874	52,95	2,8126	3,00	47,05

Quadro 7.7 - Divisão das vazões quando a onda beta passa pelo oitavo tubo-base

Tubo-base nº	Nº de furos	Q _{poço-tela} (bpm)	%	Q _{tela-washpipe} (bpm)	Acum.	%
1	4	2,8624	95,11	0,1376	0,33	4,89
2	5	2,6864	93,75	0,3136	0,50	6,25
3	6	2,4682	92,24	0,5318	0,72	7,76
4	7	2,2019	90,53	0,7981	0,99	9,47
5	10	1,7991	85,68	1,2009	1,39	14,32
6	13	1,2200	79,41	1,7800	1,97	20,59
7	20	0,1874	63,29	2,8126	3,00	36,71

Quadro 7.8 - Divisão das vazões quando a onda beta passa pelo sétimo tubo-base

Tubo-base nº	Nº de furos	Q _{poço-tela} (bpm)	%	Q _{tela-washpipe} (bpm)	Acum.	%
1	4	2,7792	92,15	0,2208	0,41	7,85
2	5	2,4978	89,99	0,5022	0,69	10,01
3	6	2,1498	87,63	0,8502	1,04	12,37
4	7	1,7272	84,98	1,2728	1,46	15,02
5	10	1,0918	77,41	1,9082	2,10	22,59
6	13	0,1874	67,84	2,8126	3,00	32,16

Quadro 7.9 - Divisão das vazões quando a onda beta passa pelo sexto tubo-base

Tubo-base nº	Nº de furos	Q _{poço-tela} (bpm)	%	Q _{tela-washpipe} (bpm)	Acum.	%
1	4	2,6723	88,35	0,3277	0,52	11,65
2	5	2,2552	85,17	0,7448	0,93	14,83
3	6	1,7410	81,72	1,2590	1,45	18,28
4	7	1,1188	77,88	1,8812	2,07	22,12
5	10	0,1874	66,89	2,8126	3,00	33,11

Quadro 7.10 - Divisão das vazões quando a onda beta passa pelo quinto tubo-base

Tubo-base nº	Nº de furos	Q _{poço-tela} (bpm)	%	Q _{tela-washpipe} (bpm)	Acum.	%
1	4	2,5080	82,51	0,4920	0,68	17,49
2	5	1,8830	77,78	1,1170	1,30	22,22
3	6	1,1144	72,67	1,8856	2,07	27,33
4	7	0,1874	67,04	2,8126	3,00	32,96

Quadro 7.11 - Divisão das vazões quando a onda beta passa pelo quarto tubo-base

Tubo-base nº	Nº de furos	Q _{poço-tela} (bpm)	%	Q _{tela-washpipe} (bpm)	Acum.	%
1	4	2,2647	73,86	0,7353	0,92	26,14
2	5	1,3319	66,84	1,6681	1,86	33,16
3	6	0,1874	59,31	2,8126	3,00	40,69

Quadro 7.12 - Divisão das vazões quando a onda beta passa pelo terceiro tubo-base

Tubo-base nº	Nº de furos	Q _{poço-tela} (bpm)	%	Q _{tela-washpipe} (bpm)	Acum.	%
1	4	1,7589	55,87	1,2411	1,43	44,13
2	5	0,1874	44,13	2,8126	3,00	55,87

Quadro 7.13 - Divisão das vazões quando a onda beta passa pelo segundo tubo-base

Tubo-base nº	Nº de furos	Q _{poço-tela} (bpm)	%	Q _{tela-washpipe} (bpm)	Acum.	%
1	4	0,1874	0,00	2,8126	3,00	100,00

A Figura 7.16 mostra a evolução das vazões acumuladas no anular *tela-washpipe* a medida que a onda beta avança, reduzindo a quantidade de tubos-base expostos ao escoamento.

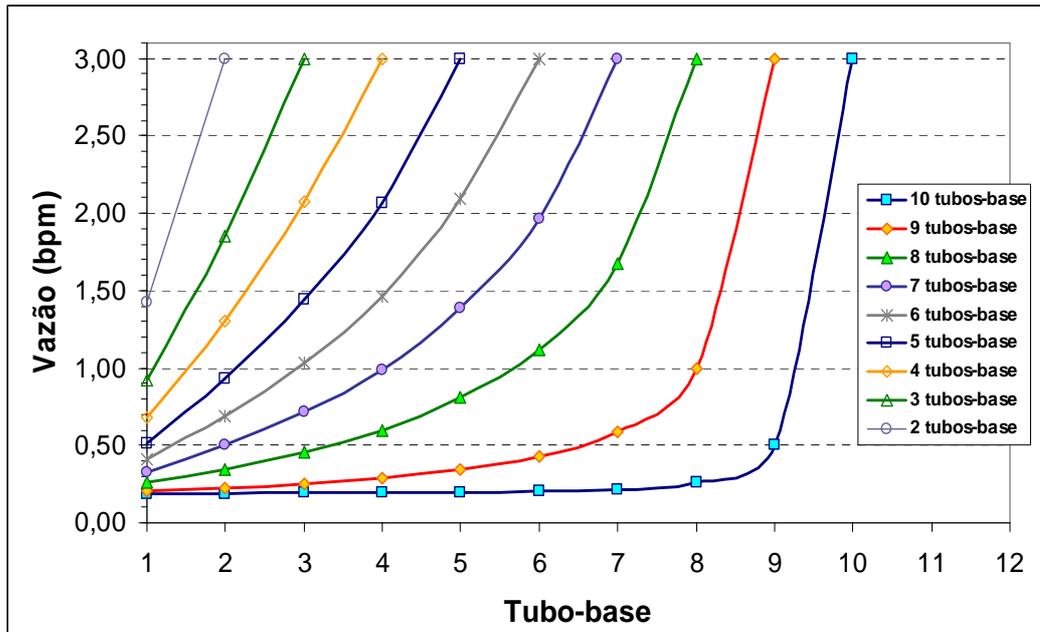


Figura 7.16 - Evolução das vazões no anular tela-washpipe

É importante notar, tanto nos quadros apresentados quanto na Figura 7.16, que quanto menor for a diferença entre a quantidade de furos de um tubo-base comparado ao tubo-base adjacente, menor será a diferença observada na distribuição de vazões. Teremos então vazões distribuídas de uma forma mais homogênea, chegando até a relação de 55,87% contra 44,13% da divisão de vazões quando temos somente os últimos dois tubos-base amostra, cada um com 4 e 5 furos respectivamente. Isto implica que a grande quantidade de furos necessários ao fim do poço para a equalização do fluxo no reservatório pode se tornar, efetivamente, um problema para o deslocamento seguro do *Gravel-pack*.

7.3.

Estudo comparativo entre os ensaios experimentais e as simulações numéricas

A seguir será apresentado um estudo comparativo feito entre os resultados da simulação física e os dados obtidos através das simulações computacionais para a matriz de testes já mencionada.

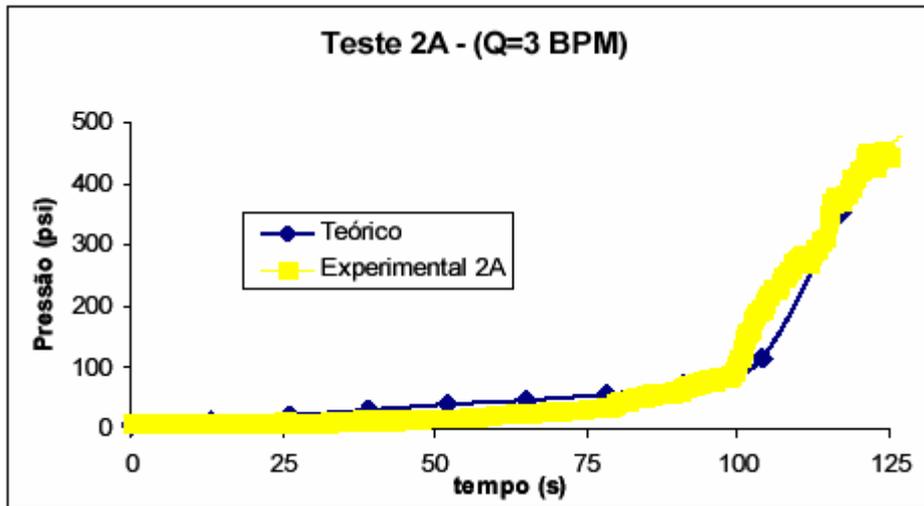


Figura 7.17 - Resultado comparativo para o teste 2A

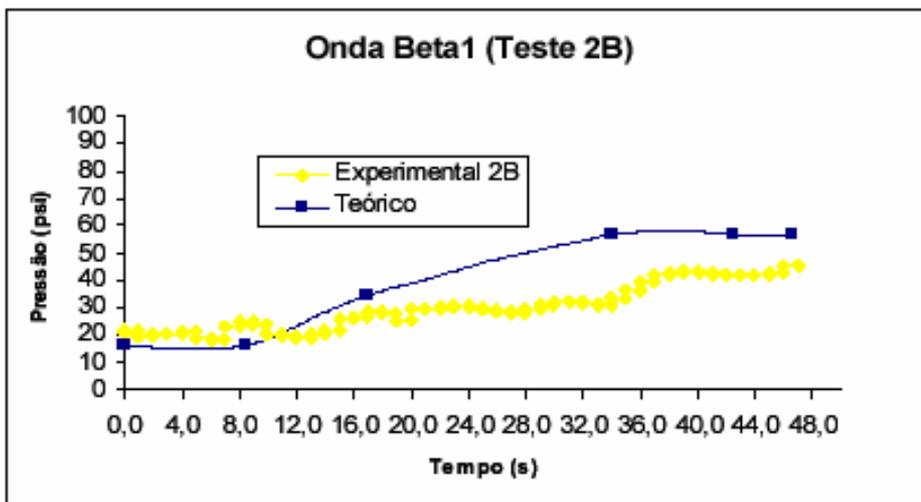


Figura 7.18 - Resultado comparativo para o teste 2B na vazão de 5 bpm

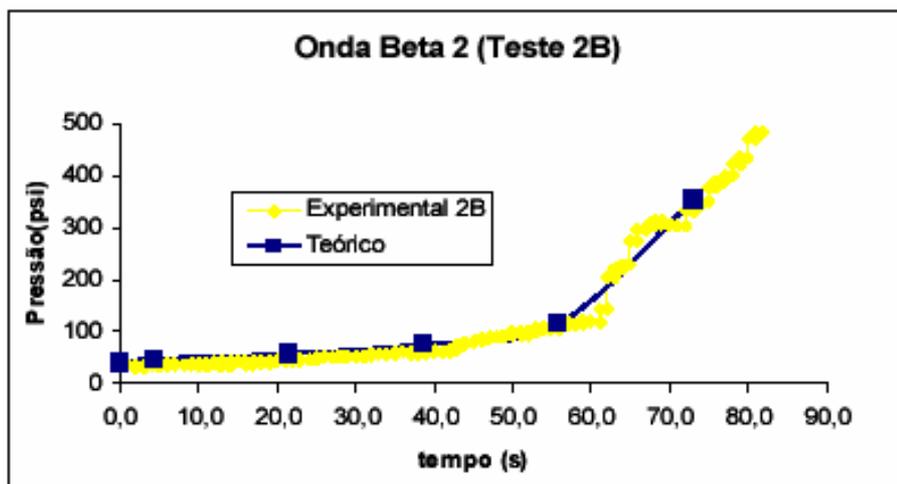


Figura 7.19 - Resultado comparativo para o teste 2B na vazão de 3 bpm

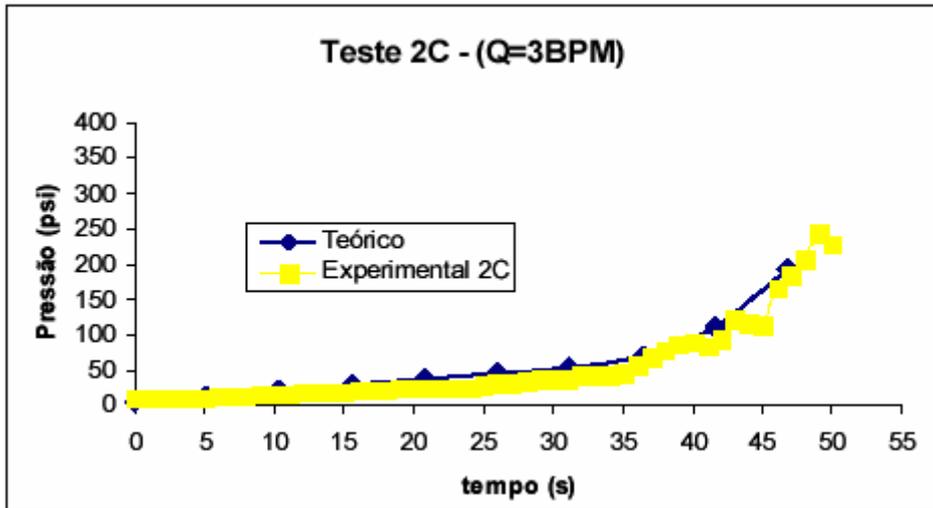


Figura 7.20 - Resultado comparativo para o teste 2C

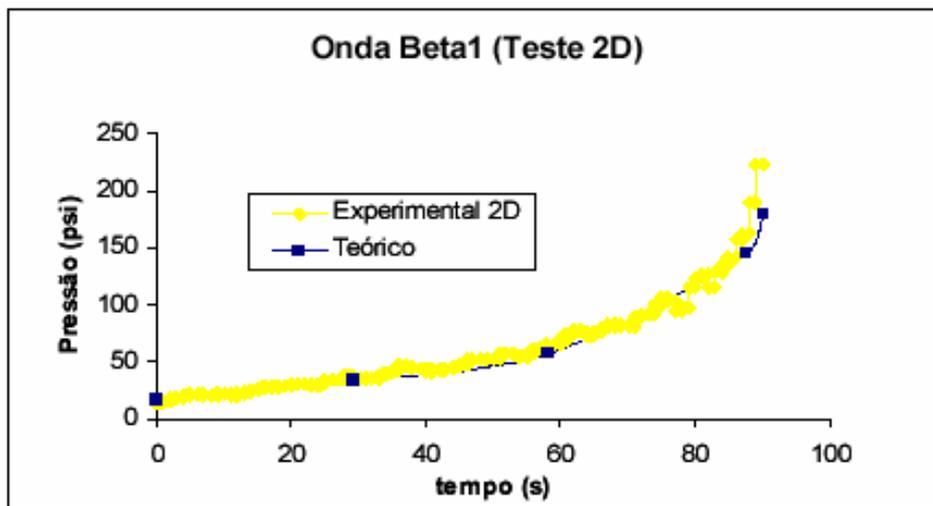


Figura 7.21 - Resultado comparativo para o teste 2D na vazon de 5 bpm

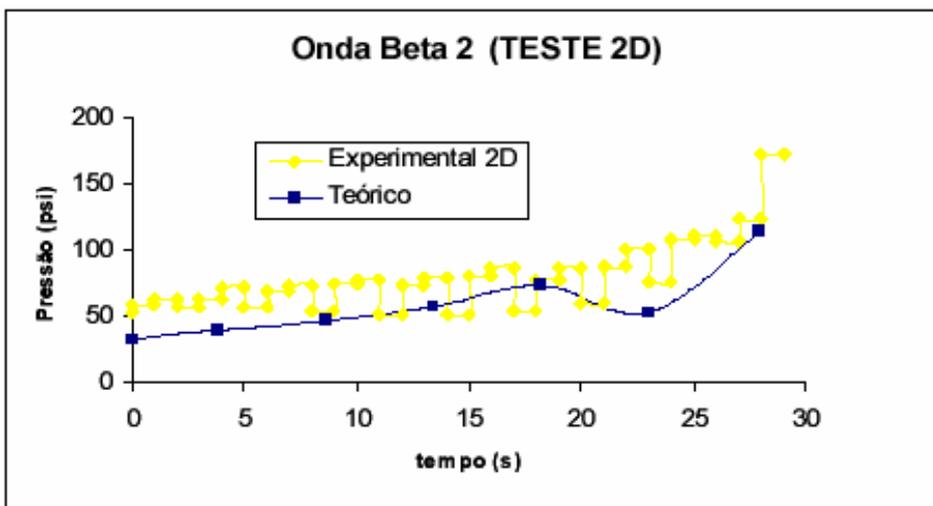


Figura 7.22 - Resultado comparativo para o teste 2D na vazon de 3 bpm

As Figuras 7.17 a 7.22 mostram um razoável ajuste entre os experimentos e o modelo computacional desenvolvido. Alguns desvios observados podem ser atribuídos à variação de vazões que sempre ocorrem durante um teste real. Durante tais testes é muito difícil manter a vazão em valores exatos, pequenas variações nestes valores levam a grandes variações nas pressões registradas, principalmente quando temos simulações físicas de escala reduzida. Os efeitos de atenuação observados em uma operação real de campo, onde se tem grandes extensões de Risers, revestimentos e etc, não são observados quando se tem uma unidade de bombeio conectada diretamente ao que pretendemos representar como sendo o poço aberto.