

CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos tanto nas determinações experimentais quanto nas simulações numéricas. Primeiramente é apresentado o estudo reológico das soluções de GX preparadas, depois uma breve discussão sobre o regime de escoamento estudado, os principais efeitos das variáveis investigadas sobre a queda de pressão em anulares parcialmente obstruídos, e então os resultados da injeção de partículas. Na sequência é apresentada a verificação numérica seguida do estudo numérico da influência de diversas variáveis sobre o escoamento em anulares, e a simulação de linhas de corrente.

4.1. Estudo Reológico

4.1.1. Estudo do Tempo de Hidratação da Goma Xantana (GX)

A hidratação de um polímero não é instantânea ao adicioná-lo na água, certo intervalo de tempo é gasto para que o mesmo atinja sua completa hidratação, o que interfere diretamente nas suas propriedades reológicas. Desta forma, foi realizado um estudo a fim de se avaliar o tempo necessário para a completa hidratação da GX. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3, para concentrações de 0,1%, 0,3% e 0,5% de GX em água, durante um intervalo de 72 horas.

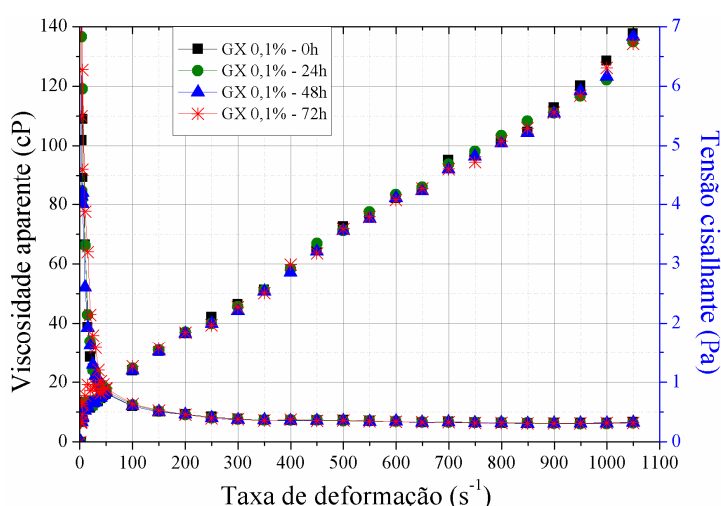


Figura 4.1 – Reograma e curva de viscosidade para solução de 0,1% de GX em água em função do tempo de hidratação.

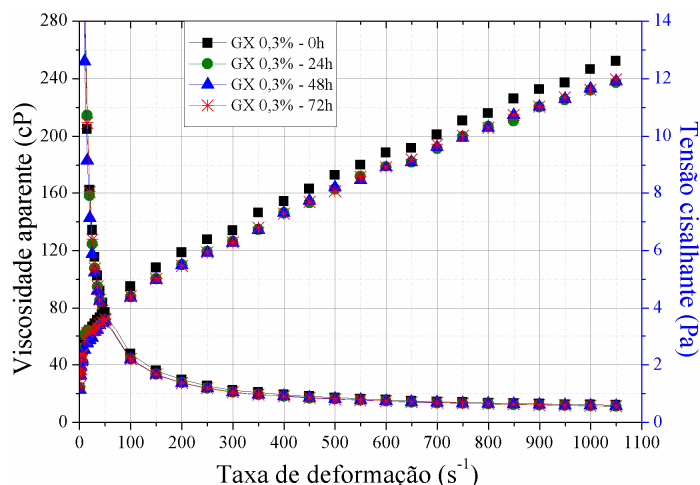


Figura 4.2 – Reograma e curva de viscosidade para solução de 0,3% de GX em água em função do tempo de hidratação.

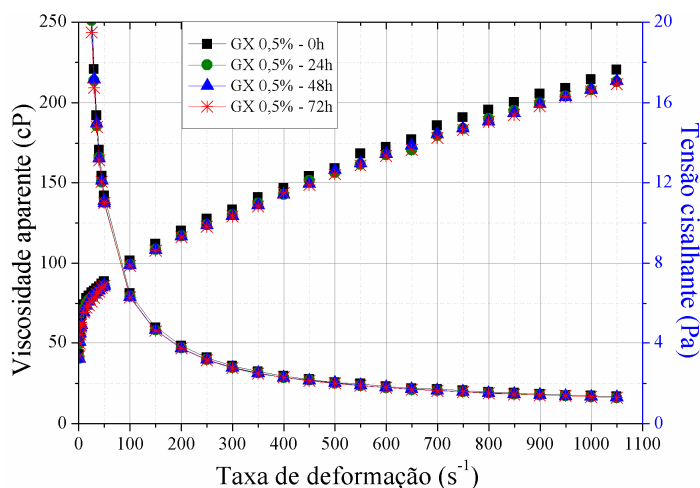


Figura 4.3 – Reograma e curva de viscosidade para solução de 0,5% de GX em água em função do tempo de hidratação.

Pode ser observado na Figura 4.1 que o comportamento reológico da solução de 0,1% de GX em água não sofreu modificações significativas desde o seu preparo até o final das 72 horas. Isto pode ser explicado pela baixa concentração de goma utilizada nesta solução. Já nas Figuras 4.2 e 4.3 pode-se observar uma ligeira redução na tensão cisalhante ou na viscosidade aparente do fluido após 24 horas de seu preparo. Atribui-se os valores mais altos de viscosidades e tensões adquiridos pelo fluido nas primeiras 24 horas ao fato da goma ainda não estar hidratada. Observou-se a incorporação de bolhas de ar ao fluido, ocasionadas durante o seu preparo, este fato também pode interferir na reologia nas primeiras 24 horas. Assim, estabeleceu-se 24 horas como o tempo ideal para garantir a completa hidratação da Goma Xantana.

4.1.2. Estudo Reológico de Fluidos de Perfuração

Buscou-se neste trabalho encontrar um fluido que em temperatura ambiente representasse bem as características reológicas de um fluido de perfuração típico. Para isto, primeiro caracterizou-se o comportamento reológico de fluidos de perfuração típicos: o fluido BR-MUL (base óleo e base olefina) e o fluido BR-Carb (base água). A Figura 4.4 apresenta os resultados obtidos para o reograma e curva de viscosidades a temperatura de 25°C dos fluidos BR-MUL (base óleo), BR-MUL olefina (base olefina) e BR-Carb.

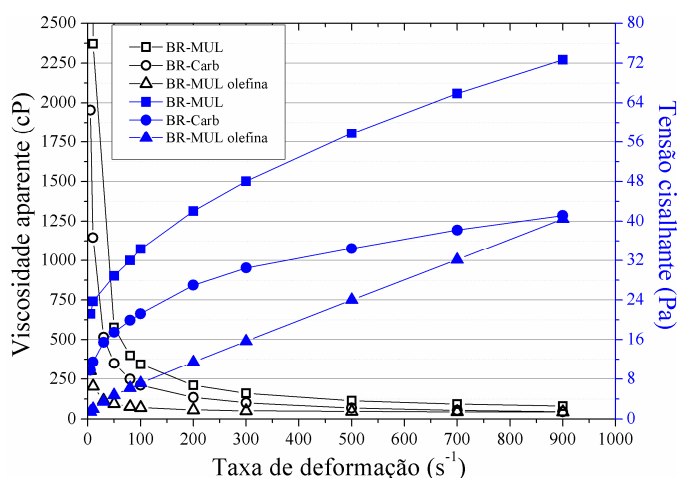


Figura 4.4 – Reograma e curva de viscosidade para os fluidos de perfuração estudados.

Uma comparação das curvas de viscosidades aparentes dos fluidos preparados com concentrações de 0,1% a 0,5% de GX com os fluidos de perfuração analisados pode ser feita na Figura 4.5.

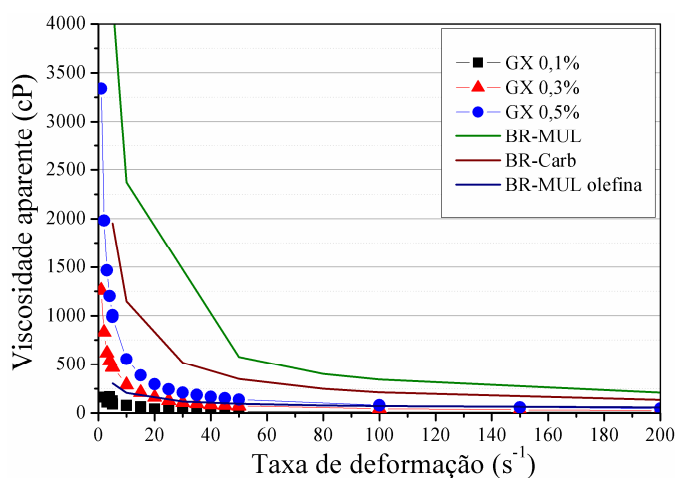


Figura 4.5 – Curvas de viscosidade para os fluidos de perfuração e as soluções com diferentes concentrações de GX preparadas.

Pode ser observado na Figura 4.5 que as soluções de GX são capazes de fornecer características de pseudoplasticidade semelhantes as dos fluidos de perfuração, porém, não fornecem os altos valores de viscosidade aparente observados nesses fluidos. A única exceção para esta observação ocorre com o fluido BR-MUL olefina que tem características de viscosidades próximas as das soluções de GX estudadas. Nota-se também na Figura 4.5 que os fluidos de perfuração BR-MUL e BR-Carb são mais bem representados por soluções de GX com concentrações mais altas, porém em nenhuma das concentrações de goma utilizadas conseguiu-se chegar aos mesmos níveis de viscosidades aparentes desses fluidos. Para que os fluidos preparados se aproximem ainda mais do comportamento de um fluido de perfuração devem-se adicionar outros componentes a formulação. Um componente que contribui para a viscosidade da solução e formação de gel é o amido (HPA Lordrill).

4.1.3. Estudo Reológico da Goma Xantana (GX)

Neste tópico será apresentado um estudo reológico detalhado das soluções de Goma Xantana utilizadas nos experimentos. Nas Figuras 4.6 e 4.7 encontram-se respectivamente, as curvas de tensão cisalhante e viscosidade aparente em função da taxa de deformação, para os fluidos preparados com Goma Xantana nas concentrações de 0,1%, 0,3% e 0,5% em solução aquosa a temperatura de 25°C.

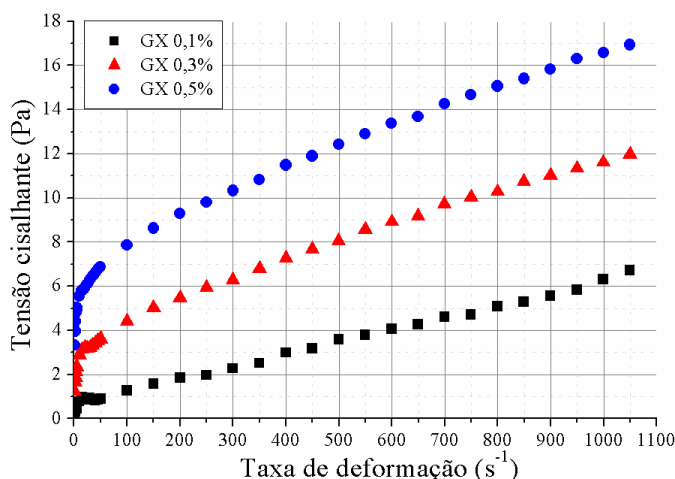


Figura 4.6 – Reograma de soluções de GX a concentrações de 0,1%, 0,3% e 0,5%.

Os fluidos preparados apresentaram um comportamento não-Newtoniano, como pode ser observado nas Figuras 4.6 e 4.7 para todas as soluções estudadas. Observa-se na Figura 4.6, que o aumento da concentração de Goma Xantana provoca um aumento das tensões

cisalhantes para uma mesma taxa de deformação, em todas as soluções preparadas. A Figura 4.6 também evidencia o limite de escoamento para as soluções de GX, mostrando que o aumento da concentração de GX no meio oferece ao fluido um acréscimo no limite de escoamento inicial. Assim, devido à presença do valor de limite de escoamento, o modelo que melhor descreverá o comportamento dos fluidos estudados deve ser o modelo de Herschel-Bulkley.

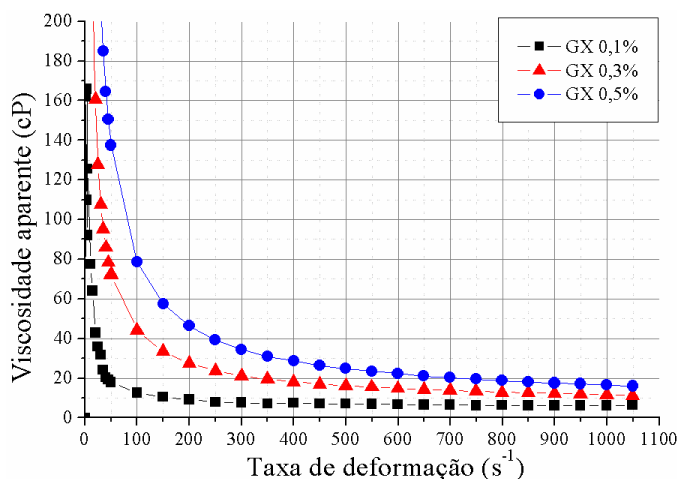


Figura 4.7 – Viscosidade para soluções de GX a concentrações de 0,1%, 0,3% e 0,5%.

A Figura 4.7 mostra a viscosidade em função da taxa de deformação para soluções de GX a três diferentes concentrações. Nesta figura pode-se observar que a altas taxas de deformação as viscosidades tendem a um valor praticamente constante. Esse comportamento assintótico é atingido primeiro (ou a menores taxas de deformação) para as soluções com menores concentrações de Goma Xantana. Pode-se notar também na Figura 4.7 que a viscosidade do fluido aumenta com o acréscimo da concentração de GX no meio e diminui com o aumento da taxa de deformação o que caracteriza este polímero como agente modificador reológico com características pseudoplásticas. Em baixas taxas de deformação o fluido se comporta como um sólido, com a viscosidade tendendo a valores extremamente altos. Essas características explicam o fato da GX ser um aditivo bastante utilizado em formulações de fluidos de perfuração.

As curvas de fluxo de ida e volta podem ser utilizadas para caracterizar a tixotropia pela histerese. Na Figura 4.8, observa-se que as soluções com diferentes concentrações de GX estudadas praticamente não apresentaram caráter tixotrópico, ou de outra forma, não ocorria formação de gel.

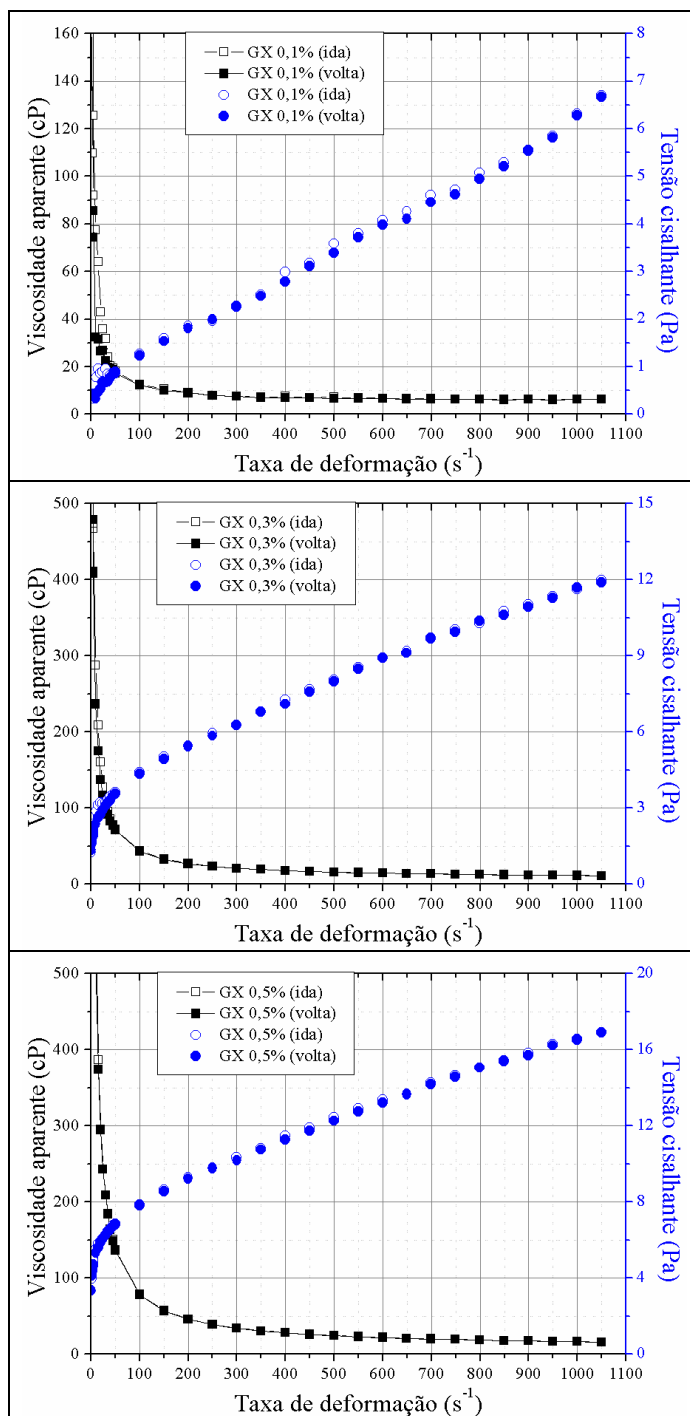


Figura 4.8 – Reologia e viscosidade (ida e volta) para verificar efeito de histerese.

O modelo de Herschel-Bulkley descreveu melhor os fluidos que os modelos de Bingham e Ostwald de Waale para todas as concentrações de GX estudadas, apresentando coeficientes de correlação linear (R^2) com valores superiores a 0,9939 para todo intervalo de taxa de deformação investigado (1–1050 s⁻¹), Tabela 4.1. O índice de comportamento (n) obtido pelo modelo Herschel-Bulkley para todos os fluidos estudados situou-se entre 0 e 1, indicando o comportamento pseudoplástico, $0 < n < 1$.

Tabela 4.1 – Ajustes dos fluidos preparados aos modelos modelos reológicos.

	Modelo Bingham			Modelo <i>Power-Law</i>			Modelo Herchel-Bulkley			
	$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$			$\tau = \mu \dot{\gamma}^n$			$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$			
GX (%)	τ_0 (Pa)	μ (Pa.s)	R ²	μ (Pa.s ⁿ)	n	R ²	τ_0 (Pa)	K (Pa.s ⁿ)	n	R ²
0,1	0,5986	0,0057	0,9934	0,0531	0,6830	0,9781	0,5420	0,0087	0,9370	0,9939
0,3	2,8767	0,0094	0,9692	0,9196	0,3588	0,9774	1,8815	0,1566	0,5964	0,9950
0,5	5,7790	0,0118	0,9562	2,6559	0,2554	0,9711	4,0290	0,3483	0,5162	0,9952
BR-MUL	26,772	0,0558	0,9591	9,8082	0,2873	0,9665	18,623	1,1703	0,5641	0,9995
BR-Carb	15,680	0,0328	0,8822	5,7772	0,2885	0,9986	1,8263	4,6781	0,3135	0,9989
BR-MUL ol	2,3712	0,0428	0,9982	0,1744	0,7976	0,9967	1,6107	0,0819	0,9049	0,9995

4.1.4. Influência da Temperatura na Reologia dos Fluidos Preparados com GX

Foram feitos testes buscando avaliar a influência da temperatura na reologia das soluções preparadas. As Figuras 4.9 e 4.10 mostram respectivamente as curvas de reologia e viscosidade em função da temperatura, para os fluidos preparados com 0,1%, 0,3% e 0,5% de GX. Pode ser observado nestas figuras que para uma mesma taxa de deformação, as viscosidades e as tensões cisalhantes tendem a diminuir com o incremento da temperatura.

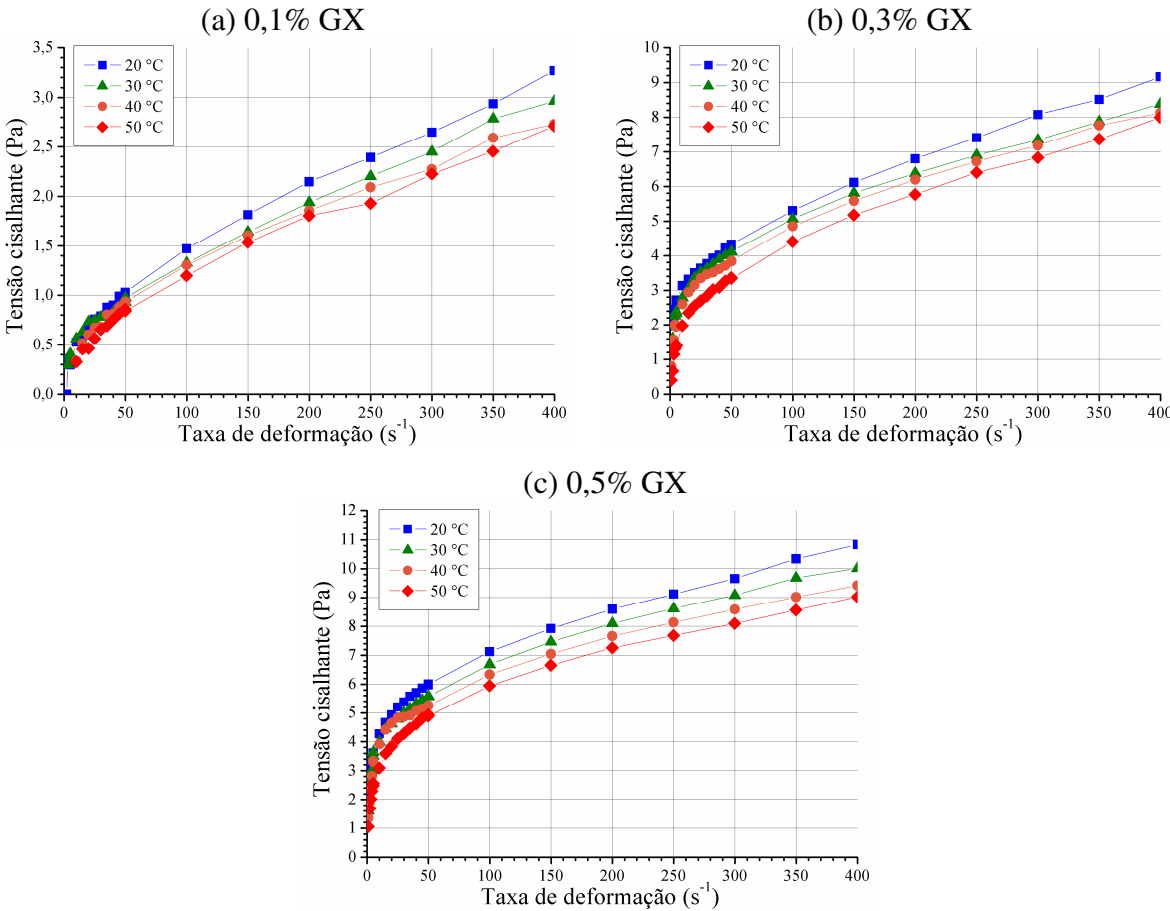


Figura 4.9 – Reograma de soluções de GX para várias temperaturas.

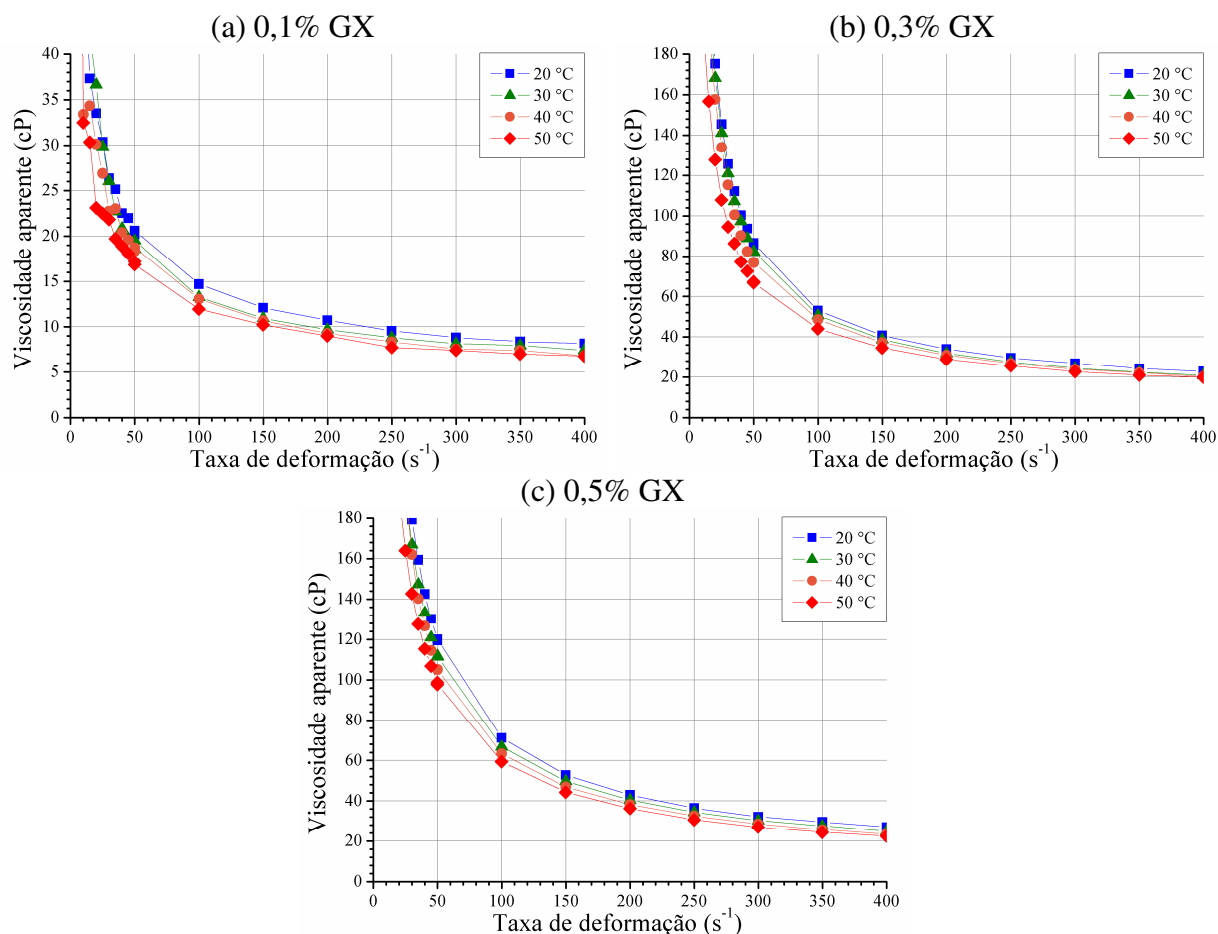


Figura 4.10 – Viscosidade das soluções de GX para várias temperaturas.

O índice de comportamento, n , mostra que as características pseudoplásticas da GX são conservadas quando ela é exposta a temperaturas entre 20 e 50°C ($0 < n < 1$), Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Ajuste do modelo reológico aos fluidos preparados em função da temperatura.

		Modelo de Herchel-Bulkley $\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$			
GX (%)	T (°C)	τ_0 (Pa)	K (Pa.s ⁿ)	n	R^2
0,1	20	0,3446	0,0293	0,7738	0,9982
	30	0,4643	0,0154	0,8523	0,9960
	40	0,5271	0,0100	0,9059	0,9955
	50	0,5332	0,0073	0,9499	0,9947
0,3	20	2,0631	0,1801	0,6204	0,9976
	30	1,7774	0,2140	0,5795	0,9965
	40	1,1282	0,3452	0,5097	0,9967
	50	0,5833	0,3551	0,5119	0,9980
0,5	20	2,4953	0,5081	0,4718	0,9960
	30	1,8001	0,6890	0,4220	0,9955
	40	1,4753	0,7443	0,4034	0,9935
	50	1,0226	0,8086	0,3882	0,9955

4.2. Resultados Experimentais

4.2.1. Regime de Escoamento

Para este estudo, utilizou-se uma solução com 0,5% de GX escoando no anular parcialmente obstruído concêntrico e com excentricidades de 0,23 e 0,46 sem rotação do tubo interno. Os dados de vazão, queda de pressão e fatores de atrito de Fanning experimentais juntamente com os valores dos números de Reynolds generalizados e fatores de atrito de Fanning calculados segundo diferentes modelos são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Dados de vazão, queda de pressão, fator de atrito e Reynolds generalizado.

Exc	Experimental			Calculado					
	Vazão (m ³ /h)	ΔP (in H ₂ O)	f_f	Re_{MR}	Re_B	Re_{HB}	f_{fPL}	f_{fB}	f_{fHB}
0	1,07	3,65	4,0483	5,39	234,75	13,73	2,9699	3,0968	3,2683
0	2,06	3,76	1,1317	16,46	450,81	37,80	0,9720	1,0690	0,9992
0	3,02	3,80	0,5302	31,79	662,18	68,64	0,5033	0,5117	0,5014
0	4,09	4,09	0,3118	53,31	895,63	109,67	0,3001	0,2884	0,2931
0	4,98	4,27	0,2198	74,65	1090,35	148,82	0,2143	0,1991	0,2071
0	6,00	5,32	0,1880	102,90	1315,21	199,07	0,1555	0,1402	0,1490
0	7,15	6,43	0,1603	138,76	1566,20	261,04	0,1153	0,1013	0,1097
0	8,01	7,07	0,1402	168,77	1756,00	311,74	0,0948	0,0821	0,0899
0	8,90	7,30	0,1174	201,79	1949,23	366,55	0,0793	0,0678	0,0750
0,23	1,04	3,08	3,6089	5,14	228,39	13,16	2,9132	3,7339	3,2164
0,23	2,00	3,32	1,0570	15,70	438,48	36,21	0,9539	1,0553	0,9830
0,23	2,98	3,61	0,5159	31,09	653,68	67,28	0,4815	0,4908	0,4802
0,23	3,99	4,02	0,3207	51,25	875,24	105,82	0,2922	0,2819	0,2857
0,23	4,96	4,23	0,2188	74,27	1087,08	148,13	0,2016	0,1874	0,1948
0,23	6,10	5,14	0,1759	105,72	1336,16	204,02	0,1416	0,1274	0,1356
0,23	7,05	5,75	0,1474	135,45	1544,31	255,40	0,1105	0,0973	0,1053
0,23	7,90	6,15	0,1254	164,79	1731,69	305,07	0,0909	0,0788	0,0862
0,23	8,92	6,22	0,0994	202,86	1955,31	368,33	0,0738	0,0630	0,0698
0,46	1,05	2,35	2,7014	5,23	230,67	13,37	2,5349	3,2413	2,7954
0,46	2,09	2,55	0,7389	16,97	458,84	38,85	0,7811	0,8559	0,8017
0,46	3,02	2,71	0,3784	31,78	662,12	68,63	0,4169	0,4239	0,4154
0,46	3,92	3,03	0,2515	49,60	858,66	102,73	0,2672	0,2587	0,2616
0,46	5,02	3,17	0,1601	75,79	1100,02	150,87	0,1749	0,1622	0,1689
0,46	6,11	4,51	0,1538	106,17	1339,50	204,81	0,1248	0,1122	0,1195
0,46	7,10	5,40	0,1366	137,04	1554,84	258,11	0,0967	0,0851	0,0921
0,46	8,02	5,94	0,1176	168,91	1756,90	311,98	0,0785	0,0679	0,0744
0,46	8,86	6,07	0,0984	200,29	1940,78	364,09	0,0662	0,0566	0,0626

Para uma melhor interpretação dos dados apresentados na Tabela 4.3 foram plotadas as Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 para os dados obtidos no anular concêntrico, de excentricidade 0,23 e de excentricidade 0,46, respectivamente. As determinações dos regimes de escoamentos foram realizadas utilizando correlações empíricas da literatura e dados experimentais de fator de atrito de Fanning versus número de Reynolds generalizado para cada escoamento realizado.

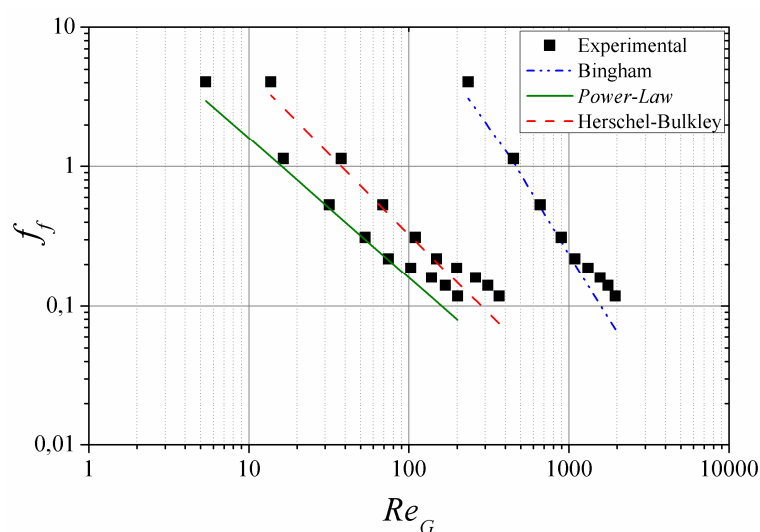


Figura 4.11 – Fator de atrito de Fanning versus Reynolds generalizado para anular concêntrico.

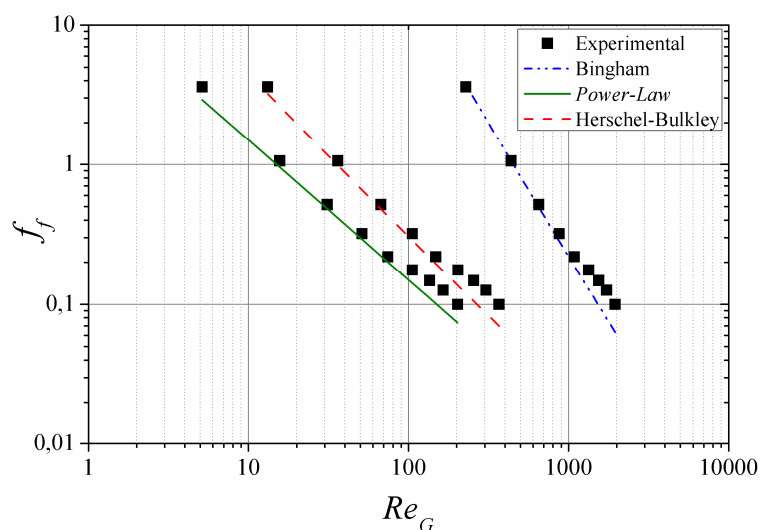


Figura 4.12 – Fator de atrito de Fanning versus Reynolds generalizado para anular excêntrico (E=0,23).

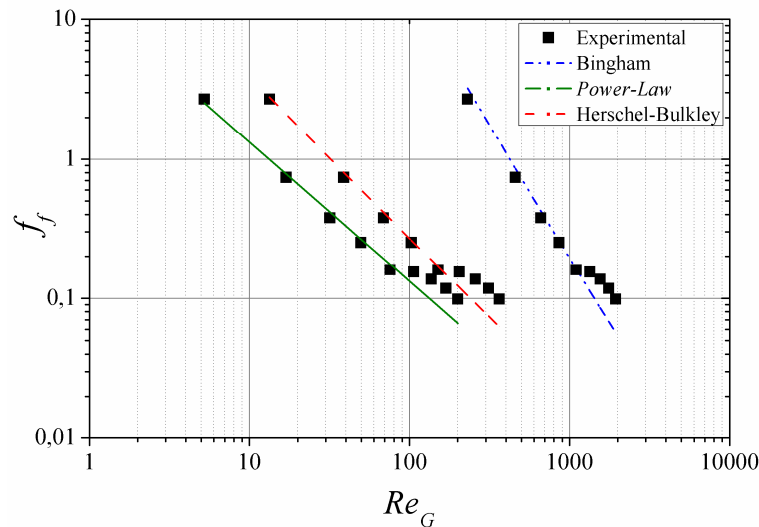


Figura 4.13 – Fator de atrito de Fanning versus Reynolds generalizado para anular excêntrico ($E=0,46$).

Nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 observa-se que os valores dos fatores de atrito experimentais se localizam muito próximos da reta correspondente ao regime laminar, assim, pode-se afirmar que as vazões de escoamento empregadas caracterizam a região de escoamento laminar. Apesar de os quatro últimos pontos experimentais apresentarem um maior desvio da reta laminar, ainda seria necessária a aquisição de mais pontos experimentais (com maiores vazões) para se afirmar o início da transição do escoamento. Para confirmar estas afirmações serão utilizadas correlações da literatura.

A utilização das correlações de RYAN e JONHSON (1959) e MISHRA e TRIPATHI (1971) indicam números de Reynolds generalizado críticos de 2331 e 1904, respectivamente. Como para todos os casos os maiores valores dos números de Reynolds de METZNER e REED (1955) (para fluidos *Power-Law*) situavam-se abaixo de 203 pode-se afirmar que segundo este critério, os escoamentos estudados se situavam no regime laminar.

Segundo o critério de HANKS (1963) para fluidos plásticos de Bingham o Reynolds crítico da transição é de 6672, como a faixa de Reynolds generalizado calculada situa-se entre 200–2000 para todos os casos, os pontos situam-se no regime laminar.

Segundo SLATTER (1996) o escoamento de fluidos Herschel-Bulkley deixa de ser laminar para Reynolds generalizado igual a 2100, o que corresponderia a uma vazão crítica de $32,6 \text{ m}^3/\text{h}$, novamente este valor se situa muito acima dos empregados nos experimentos (vazão máxima empregada de $10 \text{ m}^3/\text{h}$).

4.2.2. Estudo da Influência de Variáveis Geométricas e Operacionais sobre a Queda de Pressão

Investigou-se o efeito de diferentes variáveis geométricas (excentricidade) e operacionais (concentração de GX, vazão e rotação) sobre o escoamento de fluidos não-Newtonianos em seções anulares parcialmente obstruídas empregando, como ferramenta, o planejamento estatístico de experimentos. As determinações experimentais seguiram o planejamento proposto no Capítulo 3. Tal planejamento contemplava apenas três níveis para cada um dos quatro fatores estudados levando a um total de 83 experimentos. As Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 referem-se aos resultados dos experimentos realizados segundo a matriz do planejamento três níveis. As Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 permitem uma melhor visualização dos resultados do planejamento apresentados nas Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6.

Tabela 4.4 – Resultados do planejamento experimental para solução com 0,1% GX

	X_1	X_2	X_3	X_4	ΔP (Pa)	SD (Pa)
1	-1	-1	-1	-1	173,75	14,61
2	-1	-1	-1	0	132,11	15,02
3	-1	-1	-1	1	144,29	15,38
4	-1	-1	0	-1	209,91	22,85
5	-1	-1	0	0	204,01	22,34
6	-1	-1	0	1	211,32	22,27
7	-1	-1	1	-1	255,39	15,18
8	-1	-1	1	0	265,52	15,79
9	-1	-1	1	1	264,88	15,81
10	-1	0	-1	-1	112,33	14,56
11	-1	0	-1	0	111,53	15,31
12	-1	0	-1	1	103,26	15,46
13	-1	0	0	-1	149,25	19,42
14	-1	0	0	0	145,40	19,35
15	-1	0	0	1	129,16	19,38
16	-1	0	1	-1	220,53	17,02
17	-1	0	1	0	224,62	17,25
18	-1	0	1	1	226,64	17,47
19	-1	1	-1	-1	139,82	20,28
20	-1	1	-1	0	146,16	19,96
21	-1	1	-1	1	168,69	19,92
22	-1	1	0	-1	203,15	14,82
23	-1	1	0	0	211,42	15,43
24	-1	1	0	1	192,66	15,75
25	-1	1	1	-1	237,88	16,54
26	-1	1	1	0	263,61	16,51
27	-1	1	1	1	264,99	17,70

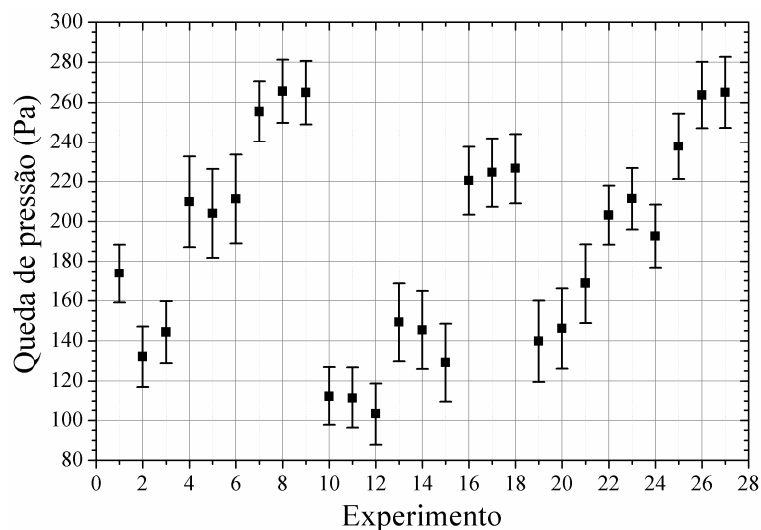


Figura 4.14 – Resultados do planejamento experimental para solução com 0,1% GX.

Tabela 4.5 – Resultados do planejamento experimental para solução com 0,3% GX

	X_1	X_2	X_3	X_4	ΔP (Pa)	SD (Pa)
28	0	-1	-1	-1	490,89	12,76
29	0	-1	-1	0	492,57	12,83
30	0	-1	-1	1	490,79	12,90
31	0	-1	0	-1	671,55	13,42
32	0	-1	0	0	661,64	13,54
33	0	-1	0	1	651,05	13,46
34	0	-1	1	-1	1169,16	12,77
35	0	-1	1	0	1134,87	12,89
36	0	-1	1	1	1149,20	12,93
37	0	0	-1	-1	497,52	13,11
38	0	0	-1	0	502,59	13,26
39	0	0	-1	1	503,22	13,32
40	0	0	0	-1	782,18	12,89
41	0	0	0	0	759,31	12,95
82	0	0	0	0	755,00	12,89
83	0	0	0	0	754,00	13,17
42	0	0	0	1	766,20	13,03
43	0	0	1	-1	983,92	12,95
44	0	0	1	0	1017,24	13,09
45	0	0	1	1	1034,75	13,07
46	0	1	-1	-1	280,21	14,05
47	0	1	-1	0	311,86	14,18
48	0	1	-1	1	300,10	14,10
49	0	1	0	-1	517,81	13,68
50	0	1	0	0	492,87	13,33
51	0	1	0	1	509,87	13,90
52	0	1	1	-1	867,19	12,81
53	0	1	1	0	868,54	13,23
54	0	1	1	1	860,95	14,48

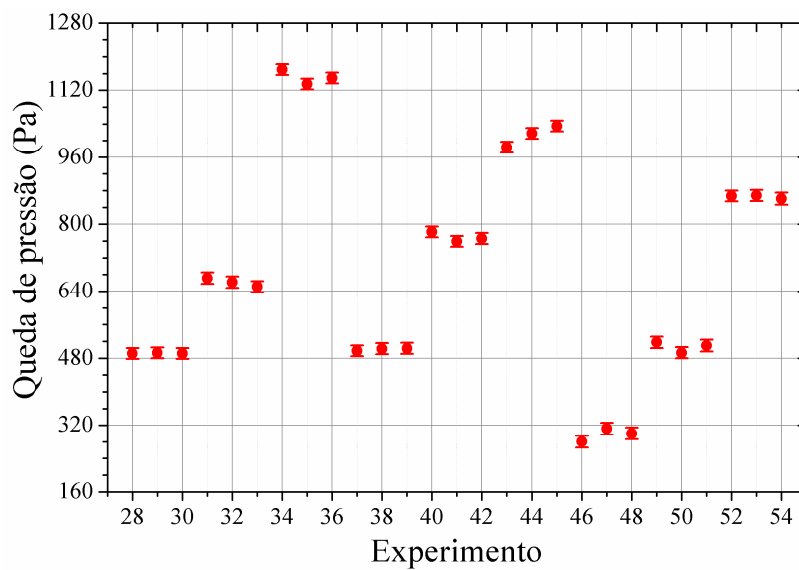


Figura 4.15 – Resultados do planejamento experimental para solução com 0,3% GX.

Tabela 4.6 – Resultados do planejamento experimental para solução com 0,5% GX

	X_1	X_2	X_3	X_4	ΔP (Pa)	SD (Pa)
55	1	-1	-1	-1	947,17	8,77
56	1	-1	-1	0	939,35	9,87
57	1	-1	-1	1	936,33	9,93
58	1	-1	0	-1	1324,96	11,98
59	1	-1	0	0	1294,46	12,69
60	1	-1	0	1	1282,09	12,71
61	1	-1	1	-1	1817,06	10,78
62	1	-1	1	0	1804,84	11,59
63	1	-1	1	1	1790,61	11,87
64	1	0	-1	-1	898,12	11,51
65	1	0	-1	0	870,39	11,61
66	1	0	-1	1	857,10	12,34
67	1	0	0	-1	1279,31	11,88
68	1	0	0	0	1260,87	11,94
69	1	0	0	1	1251,21	12,35
70	1	0	1	-1	1547,85	17,69
71	1	0	1	0	1542,31	17,78
72	1	0	1	1	1536,38	18,55
73	1	1	-1	-1	675,88	12,28
74	1	1	-1	0	663,00	12,10
75	1	1	-1	1	656,62	12,03
76	1	1	0	-1	1124,25	11,81
77	1	1	0	0	1097,86	11,89
78	1	1	0	1	1091,21	12,10
79	1	1	1	-1	1510,69	11,46
80	1	1	1	0	1498,99	12,11
81	1	1	1	1	1496,51	12,41

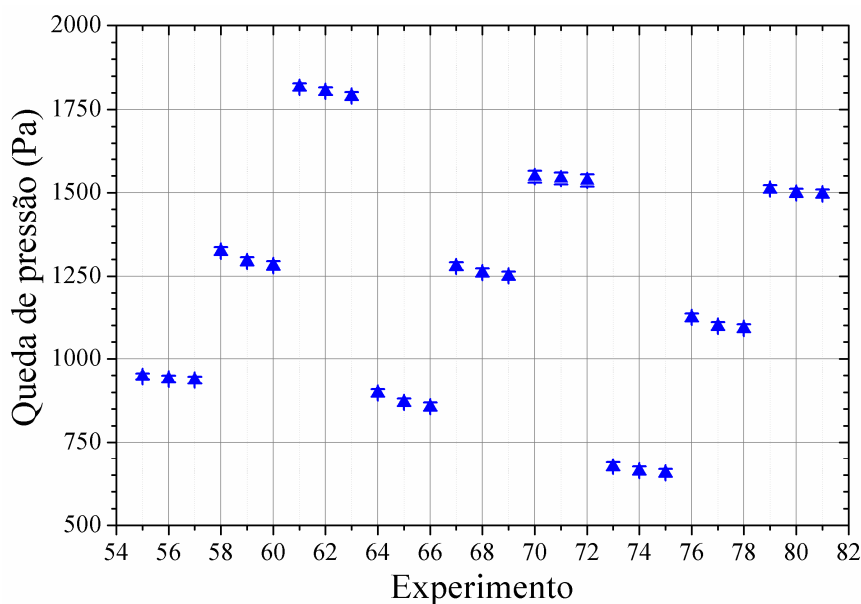


Figura 4.16 – Resultados do planejamento experimental para solução com 0,5% GX.

De acordo com a Figura 4.14, o escoamento de uma solução com 0,1% de GX levou a uma faixa estreita de valores de queda de pressão (103,26 a 265,52 Pa). No escoamento da solução com 0,3% de GX os valores de queda de pressão medidos variaram em uma faixa mais larga de 280,21 Pa a 1169,16 Pa (Figura 4.15). Já para a solução mais concentrada, com 0,5% de GX, as quedas de pressão medidas variaram amplamente de 656,52 a 1817,06 Pa (Figura 4.16).

Nas Figuras 4.14 a 4.16 foram também apresentados os desvios padrões associados a cada medida realizada. Observando-se estas figuras nota-se claramente um efeito da concentração da solução sobre a precisão das medidas efetuadas: quanto mais concentrada era a solução de GX utilizada menor era a importância dos desvios padrões das medidas realizadas, ou de outra forma, a precisão da medida era maior para os experimentos em que se utilizavam soluções mais concentradas. Tal fato resulta dos pequenos valores de queda de pressão obtidos nos anulares com a utilização de soluções menos concentradas, onde a ordem de grandeza dos desvios padrões das medidas era bastante considerável em relação ao valor da medida, o que indica uma maior imprecisão ou dificuldade na obtenção destas medidas.

Desta forma, a visualização dos efeitos das variáveis independentes estudadas é mais nítida na Figura 4.16 que apresenta as respostas para a solução mais concentrada (0,5% de GX). Na Figura 4.14 (solução com 0,1% de GX ou mais diluída) as diferenças nas respostas de pressão são menos evidentes.

As Figuras 4.14 a 4.16 permitem observar o aumento da queda de pressão com o incremento de vazão e da concentração de GX, já a excentricidade promove um efeito contrário. O efeito da rotação do cilindro interno sobre a queda de pressão não foi bem definido nos experimentos usando 0,1 e 0,3% de GX, já nos experimentos com 0,5% de GX observou-se uma redução da queda de pressão com a rotação do eixo interno.

Para uma melhor análise dos efeitos de cada variável independente estudada bem como suas interações sobre a resposta será utilizada a abordagem estatística para o tratamento dos dados do planejamento de experimentos.

Para o estudo da influência da variável geométrica excentricidade (X_2) e das variáveis operacionais concentração de GX no fluido (X_1), vazão de escoamento (X_3) e rotação do eixo interno (X_4) sobre a queda de pressão, foi aplicada uma análise de regressão múltipla utilizando os 83 dados experimentais apresentados nas Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6. A Tabela 4.7 apresenta os resultados obtidos para a regressão múltipla dos valores de queda de pressão, contendo apenas as variáveis e interações que influenciaram significativamente essa resposta, considerando o intervalo de confiança de 95%.

Tabela 4.7 – Resultados da regressão para a queda de pressão.

Variável Codificada	Parâmetro	Nível de significância
Constante	703,43	0,00E-01
X_1	516,35	0,00E-01
X_2	-78,83	1,81E-14
X_3	246,47	0,00E-01
X_1X_2	-63,58	2,51E-08
X_1X_3	169,70	4,16E-27

Observa-se, nos resultados da Tabela 4.7, que todas as variáveis estudadas, com exceção da variável rotação do eixo interno (X_4), apresentaram uma influência significativa sobre a resposta (possuem nível de significância inferior a 5%). Cabe ressaltar que as variáveis concentração de GX no fluido (X_1) e vazão de escoamento (X_3) na forma isolada contribuem positivamente para a queda de pressão, sendo a variável concentração de GX no fluido (X_1) a que influi mais intensamente sobre a resposta analisada. A variável excentricidade (X_2) contribuiu negativamente para a resposta. Observa-se também que existe interação entre as variáveis estudadas. Ressalta-se que a variável rotação do eixo interno (X_4) não afetou a resposta de nenhuma forma (isolada ou combinada).

Com o quadrado do coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,9851, os dados da Tabela 4.7 podem ser dispostos na forma da Equação (4.1), que permite estimar a resposta queda de pressão (ΔP) em função das variáveis estudadas (na forma codificada).

$$\Delta P = 703,43 + 516,35 X_1 - 78,83 X_2 + 246,47 X_3 - 63,58 X_1 X_2 + 169,70 X_1 X_3 \quad (4.1)$$

As Figuras 4.17 e 4.18 permitem analisar a distribuição de resíduos para a Equação (4.1). Observa-se que a distribuição dos resíduos foi aleatória em torno da média, sem tendências, indicando uma distribuição normal.

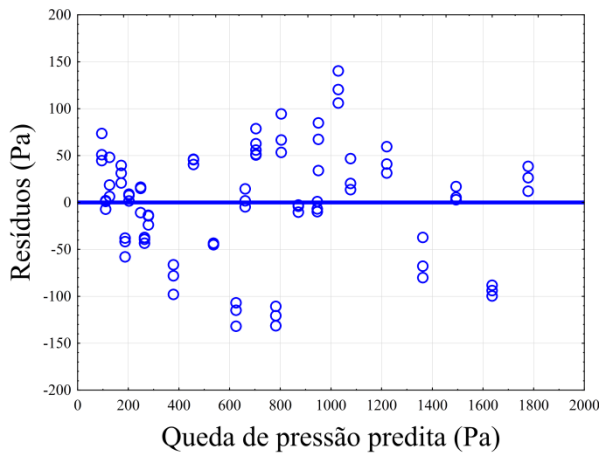


Figura 4.17– Distribuição de resíduos para a queda de pressão.

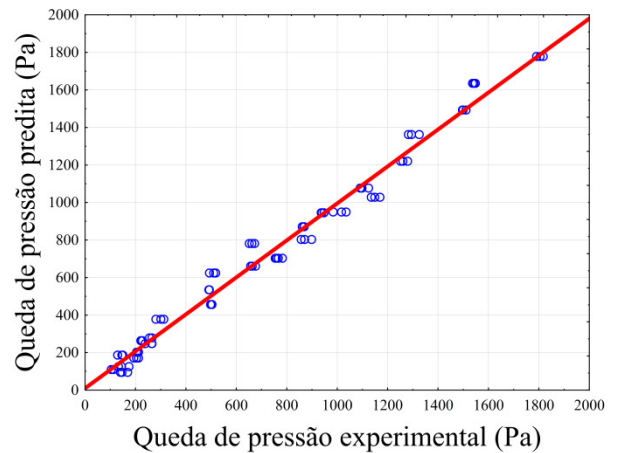
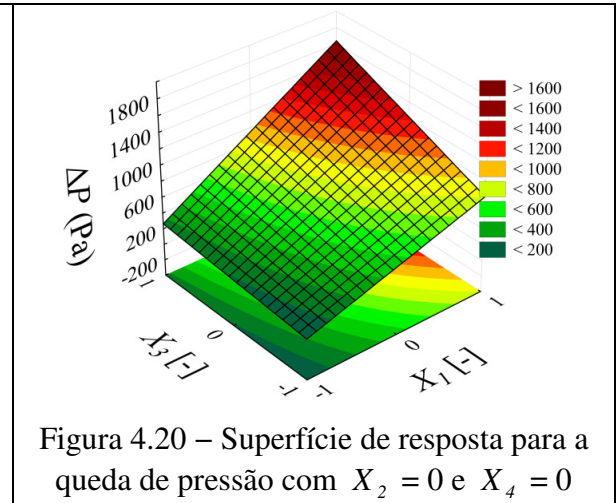
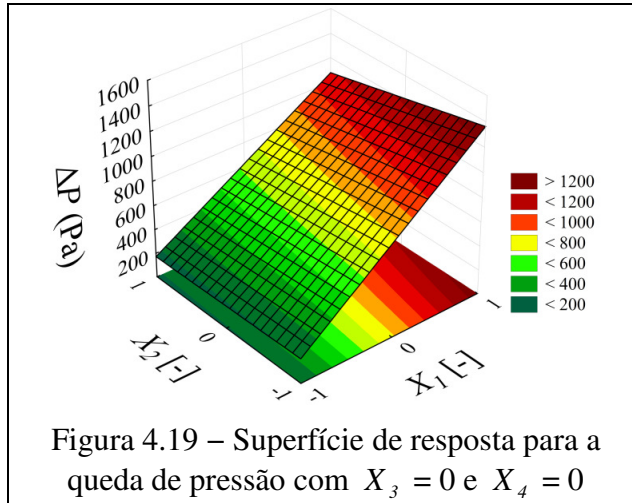


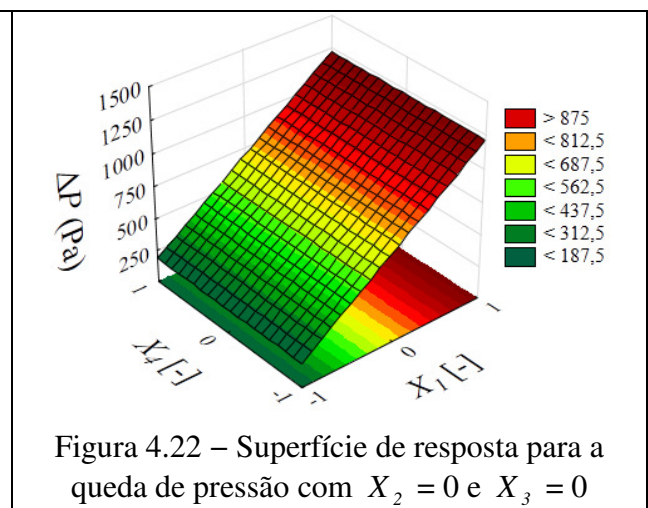
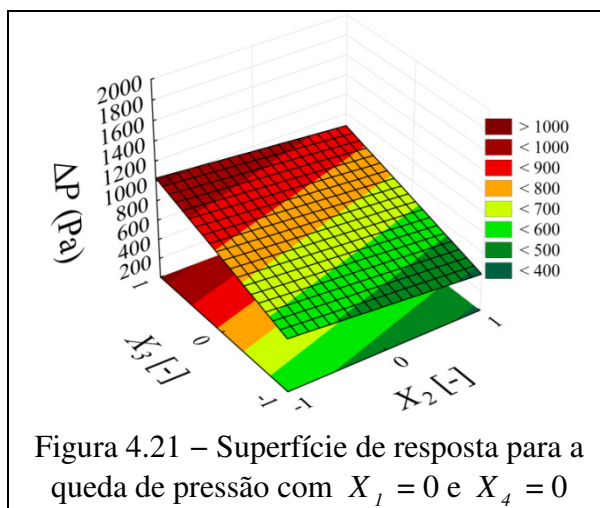
Figura 4.18 – Queda de pressão predita e queda de pressão experimental

Para melhor ilustrar os efeitos das variáveis estudadas são apresentadas, a seguir, as superfícies de respostas. A Figura 4.19 refere-se à curva de superfície de resposta obtida com base nos valores dos parâmetros da regressão para a queda de pressão da Tabela 4.7. A superfície de resposta da Figura 4.19 considera as variáveis X_3 e X_4 nos seus pontos centrais, e mostra a variação da queda de pressão em função da concentração de GX no fluido (X_1) e da excentricidade (X_2). Através dessa figura, percebe-se que a queda de pressão é maximizada com o aumento de X_1 , já para X_2 ocorre o inverso, ou seja, a queda de pressão é aumentada com o decréscimo de X_2 .

A Figura 4.20 refere-se à curva de superfície de resposta para a queda de pressão em função da concentração de GX no fluido (X_1) e da vazão de alimentação (X_3), para as variáveis X_2 e X_4 nos seus pontos centrais. Através dessa figura, percebe-se novamente que a queda de pressão é maximizada com o acréscimo de X_1 , e também é aumentada com o acréscimo de X_3 .



A superfície de resposta apresentada na Figura 4.21 considera as variáveis X_1 e X_4 nos seus pontos centrais, e mostra a variação da queda de pressão em função da excentricidade (X_2) e da vazão de alimentação (X_3). Percebe-se que a queda de pressão aumenta com o aumento de X_3 e com a redução de X_2 . Já a superfície de resposta representada pela Figura 4.22, que mostra a variação da queda de pressão em função da concentração de GX no fluido (X_1) e da rotação do eixo interno (X_4), indica que a queda de pressão é maximizada utilizando maiores concentrações de goma e que a rotação não afeta a resposta.



Analisando de forma fenomenológica o escoamento, espera-se que o aumento da viscosidade aparente do fluido (aumentando a concentração de GX) cause uma redução do número de Reynolds generalizado. Projetando este efeito na curva do fator de atrito para a região laminar, espera-se como resposta um aumento no valor do fator de atrito de Fanning e consequentemente na queda de pressão. O efeito positivo da vazão sobre a queda de pressão é

visto diretamente analisando a equação do fator de atrito de Fanning, onde a queda de pressão cresce com o quadrado da velocidade. Já o efeito da rotação do tubo interno seria aumentar a deformação sobre o fluido, causando uma redução de sua viscosidade (fluido pseudoplástica), o que provocaria um aumento no valor do número de Reynolds generalizado e consequentemente uma redução no valor do fator de atrito e da queda de pressão. Este último efeito só foi ligeiramente observado para os fluidos com 0,5% de GX.

4.2.3. Resultados da Injeção de Partículas Experimental

Neste estudo através da visualização da trajetória da partícula foram estimadas a sua velocidade média e a dimensão periódica do helicoide correspondente ao caminho percorrido pela mesma. Foram realizadas sete medições e os resultados encontram-se na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Cálculo da velocidade média e dimensão do helicoide.

Teste	Velocidade média (cm/s)	Dimensão do helicoide (cm)
1	6,40	$34,2 \pm 6,97$
2	6,35	$32,7 \pm 3,78$
3	6,23	$33,6 \pm 13,98$
4	6,19	$35,0 \pm 4,32$
5	6,15	$40,2 \pm 3,06$
6	6,06	$38,8 \pm 8,76$
7	5,88	$43,2 \pm 1,98$

Nota-se na Tabela 4.8, que foi possível descrever a trajetória helicoidal desenvolvida por uma partícula lançada no anular concêntrico parcialmente obstruído. Como no ensaio não era possível definir a altura radial de injeção da partícula, a posição em que a mesma entrava no espaço anular era desconhecida. Porém, pode afirmar que o lançamento de partículas foi realizado em uma faixa estreita de posições radiais, pois a velocidade média das partículas e o comprimento característico dos helicoides desenvolvidos variaram numa curta faixa.

4.3. Resultados Numéricos

4.3.1 – Verificação dos Resultados Numéricos

Para validar os modelos e métodos utilizados neste trabalho foi feita a comparação da previsão da queda de pressão e perfis de velocidade em anulares simulados com o FLUENT® 14.0 usando resultados existentes na literatura.

❖ Anular concêntrico sem rotação

A Figura 4.23 apresenta os resultados simulados e os obtidos no estudo experimental de FORDHAM *et al.* (1991) para um anular concêntrico ($d_o = 5$ cm e $d_i = 4$ cm) usando um fluido não-Newtoniano do tipo Herschel-Bulkley ($\tau_0 = 1,59$ Pa, $K = 0,143$ Pa.s^{*n*}, $n = 0,54$).

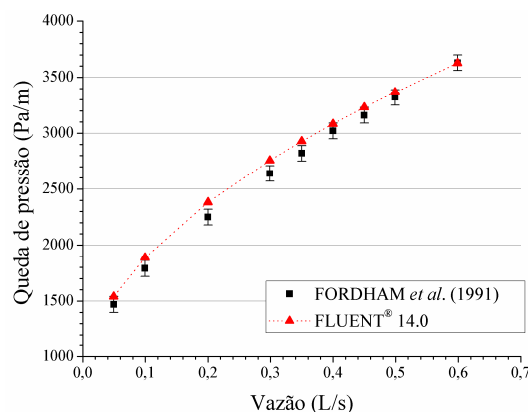


Figura 4.23 – Comparação de resultados de queda de pressão simulados pelo FLUENT® 14.0 com os dados experimentais de FORDHAM *et al.* (1991).

Pode-se perceber na Figura 4.23 que existe uma excelente concordância entre os dados experimentais de queda de pressão obtidos por FORDHAM *et al.* (1991) e os resultados previstos pelo FLUENT® 14.0. Os mesmos autores também calcularam perfis de velocidade axial para anulares concêntricos muito estreitos ($d_o = 70$ mm e $d_i = 62$ mm) e muito largos ($d_o = 70$ mm e $d_i = 5$ mm) usando um fluido não-Newtoniano ($\tau_0 = 10$ Pa, $K = 0,3$ Pa.s^{*n*}, $n = 0,65$), a Figura 4.24 mostra a comparação dos perfis de velocidade. Observe que as previsões do FLUENT® 14.0 são muito boas em ambas as condições, o que vale dizer que o software fornece boas previsões tanto para anulares muito estreitos como para muito largos.

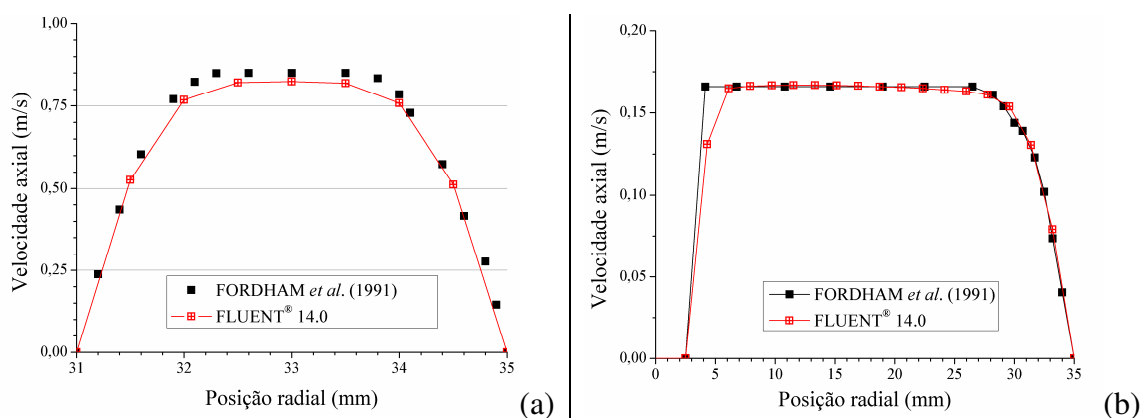


Figura 4.24 – Comparação dos perfis de velocidade simulados pelo FLUENT® 14.0 com os calculados por FORDHAM *et al.* (1991).

A Figura 4.25 apresenta os resultados preditos pelo FLUENT® 14.0 e os calculados por KELESSIDIS *et al.* (2006) para a queda de pressão em um anular concêntrico ($d_o = 0,311$ m e $d_i = 0,127$ m) usando fluidos do tipo Herschel-Bulkley. Foram utilizados os parâmetros reológicos de fluido obtidos segundo duas diferentes metodologias (GS e NLP). Assim para o fluido S12 foram utilizados os seguintes valores para os parâmetros: GS ($\tau_0 = 0,3976$ Pa, $K = 0,094$ Pa.sⁿ, e $n = 0,7036$) e NLP ($\tau_0 = 0,0001$ Pa, $K = 1,0493$ Pa.sⁿ, e $n = 0,3218$). E para o fluido S19 foram utilizados os seguintes valores para os parâmetros: GS ($\tau_0 = 1,4701$ Pa, $K = 0,6234$ Pa.sⁿ, e $n = 0,5203$) e NLP ($\tau_0 = 0$ Pa, $K = 1,117$ Pa.sⁿ, e $n = 0,4414$).

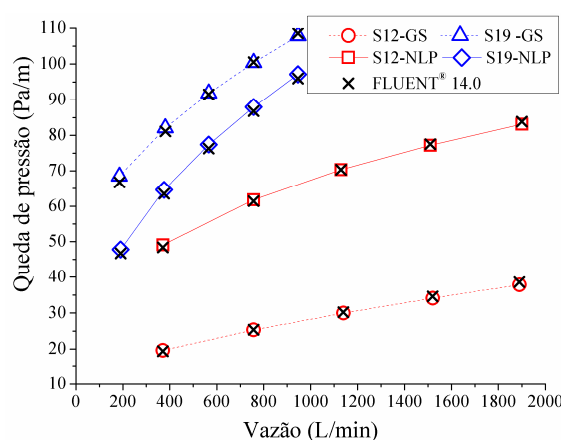


Figura 4.25 – Comparação da queda de pressão obtida pelo FLUENT® 14.0 com a calculada por KELESSIDIS *et al.* (2006).

Na Figura 4.25 pode-se perceber que as previsões obtidas com o FLUENT® 14.0 foram praticamente idênticas aos resultados calculados por KELESSIDIS *et al.* (2006), e é também evidenciado nesta figura a importância da correta escolha dos parâmetros que descrevem o modelo reológico do fluido, já que estes poderão levar a grandes diferenças nas estimativas de quedas de pressão e perfis de velocidade.

A Figura 4.26 apresenta os resultados de queda de pressão simulados e os obtidos no estudo experimental de KELESSIDIS *et al.* (2011) no escoamento de um fluido não-Newtoniano do tipo Herschel-Bulkley ($\tau_0 = 1,073$ Pa, $K = 0,0088$ Pa.sⁿ, $n = 0,8798$) em um anular concêntrico ($d_o = 0,07$ m e $d_i = 0,04$ m). Os autores empregaram diversas vazões de um fluido com 1,85% de bentonita. Foram utilizadas nas simulações somente as vazões correspondentes ao regime laminar e o primeiro ponto da transição.

A Figura 4.26 mostrou uma boa concordância entre os dados experimentais de queda de pressão obtidos por KELESSIDIS *et al.* (2011) e os resultados previstos pelo FLUENT® 14.0,

com exceção do ponto pertencente ao regime de transição (vazão de 2,37 L/s) no qual a resposta foi subestimada com erro bastante significativo. Simulações feitas com vazões pertencentes ao regime de transição ou turbulento levam a valores inconsistentes da resposta queda de pressão caso não forem simulados com uma modelagem adequada para a turbulência. Neste caso a simulação deve ser feita em regime transiente adotando, por exemplo, a metodologia LES para a modelagem da turbulência.

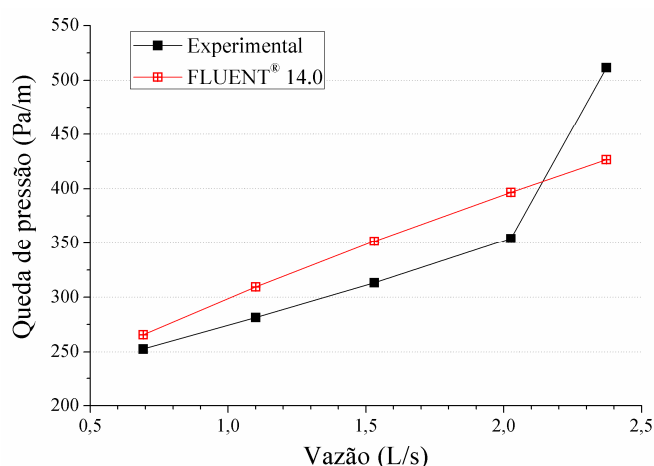


Figura 4.26 – Comparação de resultados de queda de pressão simulados pelo FLUENT® 14.0 com os resultados experimentais de KELESSIDIS *et al.* (2011).

❖ Anular concêntrico com rotação

A Figura 4.27 apresenta os resultados simulados e os obtidos em determinações experimentais dos perfis de velocidade axial e tangencial empregando um sistema laser-Doppler *velocimeter* (LDV), apresentados no trabalho de NOURI e WHITELAW (1994) para um anular concêntrico ($d_o = 40,3$ mm e $d_i = 20$ mm) usando um fluido não-Newtoniano do tipo Power-Law ($K = 0,044$ Pa.s^{*n*}, $n = 0,75$). Os autores empregaram uma vazão de $5,9 \cdot 10^{-4}$ m³/s de um fluido com 0,2% CMC, para caso com e sem rotação do tubo interno.

NOUAR *et al.* (1998) realizaram determinações experimentais dos perfis de velocidade axial e tangencial em um anular concêntrico ($d_o = 65$ mm e $d_i = 40$ mm) usando fluidos não-Newtonianos do tipo Herschel-Bulkley preparados com 0,2% Carbopol 940. Os autores empregaram uma vazão de $1,5 \cdot 10^{-4}$ m³/s de fluido, para casos com rotação (escoamento de Couette-Poiseuille) e sem rotação do tubo interno (escoamento de Poiseuille). Também realizaram experimentos em que só era aplicada a rotação do tubo interno sem a imposição de um gradiente de pressão axial, buscando caracterizar o escoamento de Couette (caso bastante

investigado em mecânica dos fluidos). A Figura 4.28 mostra a comparação entre os resultados simulados pelo FLUENT[®] 14.0 e os apresentados no trabalho de NOUAR *et al.* (1998).

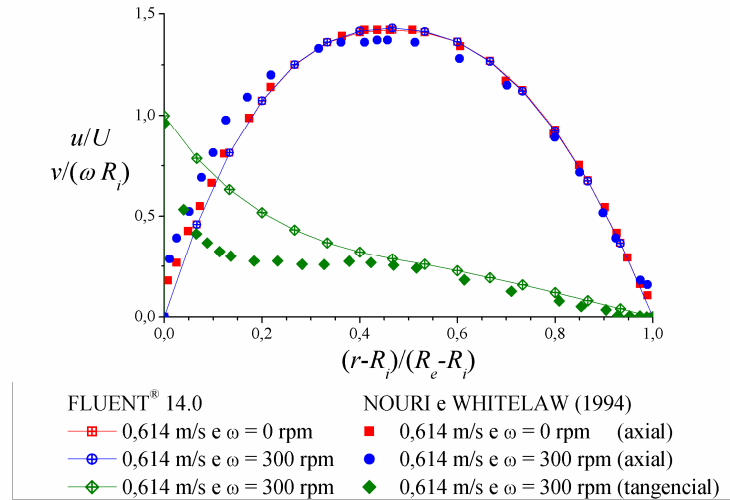


Figura 4.27 – Comparação dos perfis de velocidade simulados pelo FLUENT[®] 14.0 com os resultados experimentais medidos por NOURI e WHITELAW (1994).

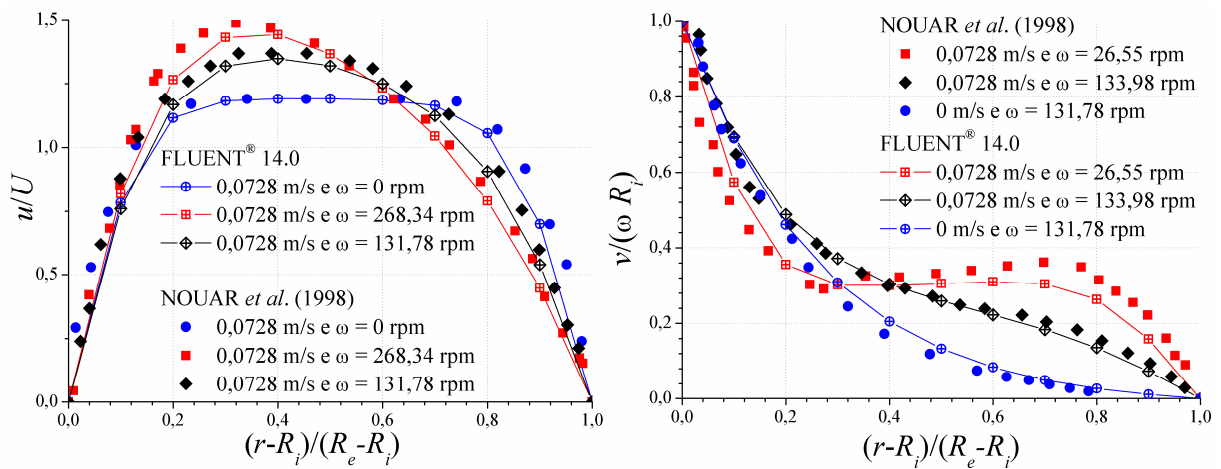


Figura 4.28 – Comparação dos perfis de velocidade simulados pelo FLUENT[®] 14.0 com os resultados experimentais medidos por NOUAR *et al.* (1998).

MEURIC *et al.* (1998) realizaram simulações numéricas dos perfis de velocidade axial e tangencial em um anular concêntrico ($d_o = 65$ mm e $d_i = 40$ mm) usando um fluido não-Newtoniano do tipo Power-Law ($K = 7,8$ Pa.s^{*n*}, $n = 0,55$). Os autores empregaram uma queda de pressão de 9640 Pa/m, para caso com rotação de 300 rpm ($Re = 0,34$ e $Ta = 4,7$) e sem rotação do tubo interno ($Re = 0,34$ e $Ta = 0$). A Figura 4.29 apresenta os resultados simulados pelo FLUENT[®] 14.0 e os apresentados no trabalho de MEURIC *et al.* (1998).

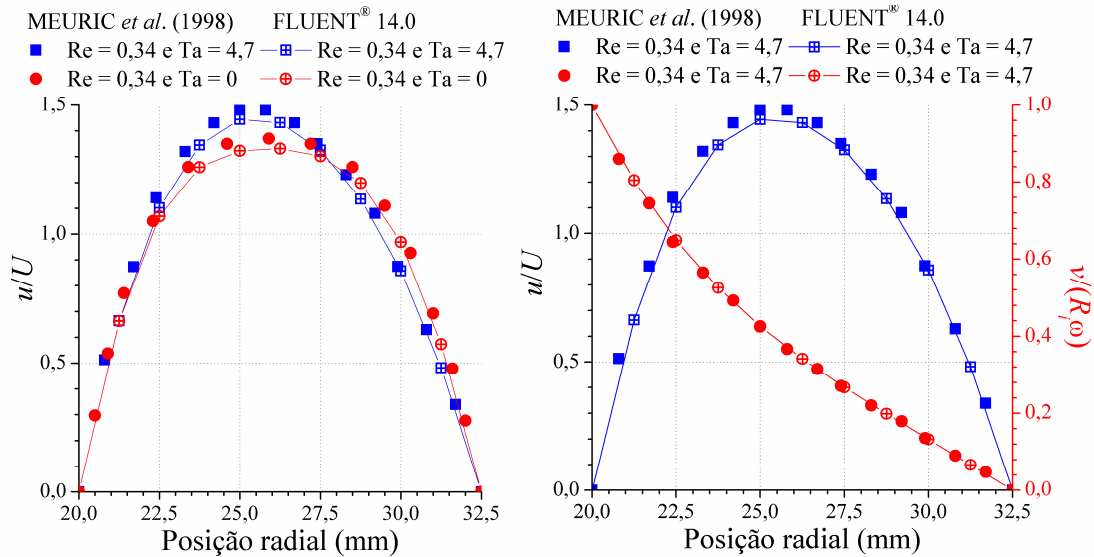


Figura 4.29 – Comparação dos perfis de velocidade simulados pelo FLUENT® 14.0 com os perfis simulados por MEURIC *et al.* (1998).

A Figura 4.30 apresenta os resultados simulados pelo FLUENT® 14.0 e os obtidos em determinações experimentais dos perfis de velocidade axiais e tangenciais empregando um sistema laser Doppler anemometer (LDA), apresentados no trabalho de ESCUDIER *et al.* (2002b) para um anular concêntrico ($d_o = 100,4$ mm e $d_i = 50,8$ mm) usando um fluido não-Newtoniano do tipo Carreau (0,1% GX/0,1% CMC). Os autores empregaram uma velocidade de 0,202 m/s para um fluido com parâmetros do modelo reológico ($\mu_0 = 0,142$ Pa.s, $\mu_\infty = 0,0024$ Pa.s, $K = 0,963$ sⁿ, $n = 0,515$) e rotação do tubo interno de 30 rpm ($Re = 228$ e $Ta = 2026$). E empregaram uma velocidade de 0,203 m/s para um fluido com parâmetros do modelo reológico ($\mu_0 = 0,159$ Pa.s, $\mu_\infty = 0,00273$ Pa.s, $K = 1,305$ sⁿ, $n = 0,509$) e rotação do tubo interno de 50 rpm ($Re = 236$ e $Ta = 6020$).

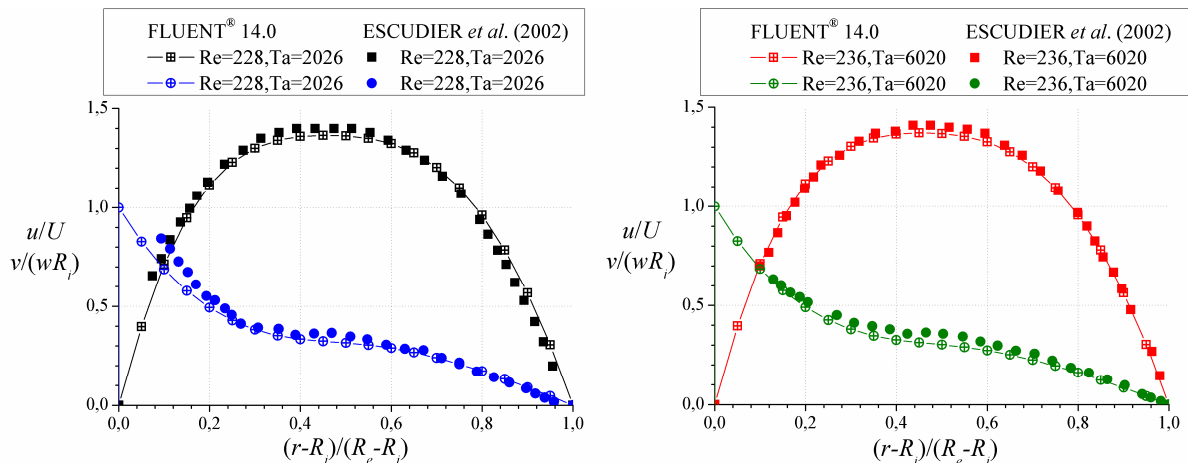


Figura 4.30 – Comparação dos perfis de velocidade simulados pelo FLUENT® 14.0 com os resultados experimentais medidos por ESCUDIER *et al.* (2002b) em um anular concêntrico.

❖ Anular excêntrico sem rotação

A Figura 4.31 apresenta o perfil de velocidade axial obtido experimentalmente (LDV) no trabalho de NOURI e WHITELAW (1997), e o resultado simulado para um anular excêntrico ($d_o = 40,3$ mm e $d_i = 20$ mm) usando um fluido não-Newtoniano do tipo Power-Law ($K = 0,044$ Pa.sⁿ, $n = 0,75$). Os autores empregaram uma vazão de $0,54 \cdot 10^{-3}$ m³/s de um fluido com 0,2% CMC, para caso sem rotação do tubo interno.

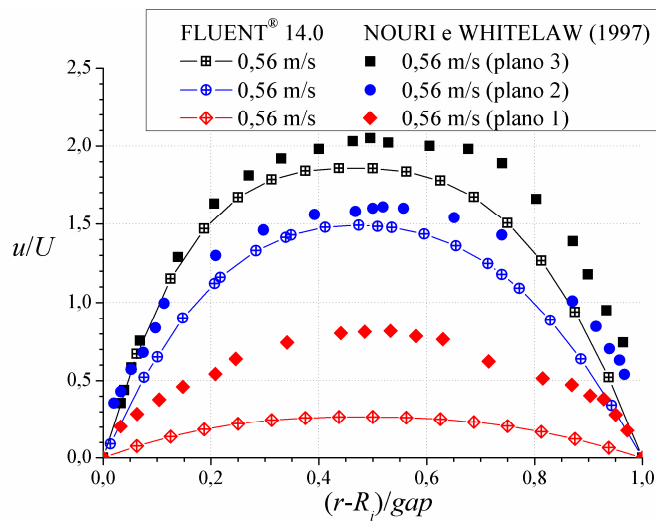


Figura 4.31 – Comparação do perfil de velocidade axial simulado pelo FLUENT® 14.0 com o resultado experimental medidos por NOURI e WHITELAW (1997).

❖ Anular excêntrico com rotação

A Figura 4.32 apresenta os resultados simulados e os obtidos em determinações experimentais dos perfis de velocidade axial e tangencial empregando um sistema laser-Doppler velocimeter (LDV), apresentados no trabalho de NOURI e WHITELAW (1997) para um anular excêntrico ($d_o = 40,3$ mm e $d_i = 20$ mm) usando um fluido não-Newtoniano do tipo Power-Law ($K = 0,044$ Pa.sⁿ, $n = 0,75$). Os autores empregaram uma vazão de $0,52 \cdot 10^{-3}$ m³/s de um fluido com 0,2% CMC, para caso com rotação do tubo interno.

ESCUDIER *et al.* (2002a) realizaram extensas simulações do escoamento de fluidos não-Newtonianos do tipo Power-Law ($K = 0,1$ Pa.sⁿ, $n = 0,5$) em anulares excêntricos ($d_o = 101,6$ mm e $d_i = 50,8$ mm) com diversas excentricidades (0 – 0,7) e usando várias rotações do tubo interno (0 – 25 rad/s), para uma velocidade do fluido na entrada do anular de 0,1 m/s. A Figura 4.33 apresenta os resultados simulados pelo FLUENT® 14.0 e os mostrados no trabalho de ESCUDIER *et al.* (2002a) para a queda de pressão nos anulares.

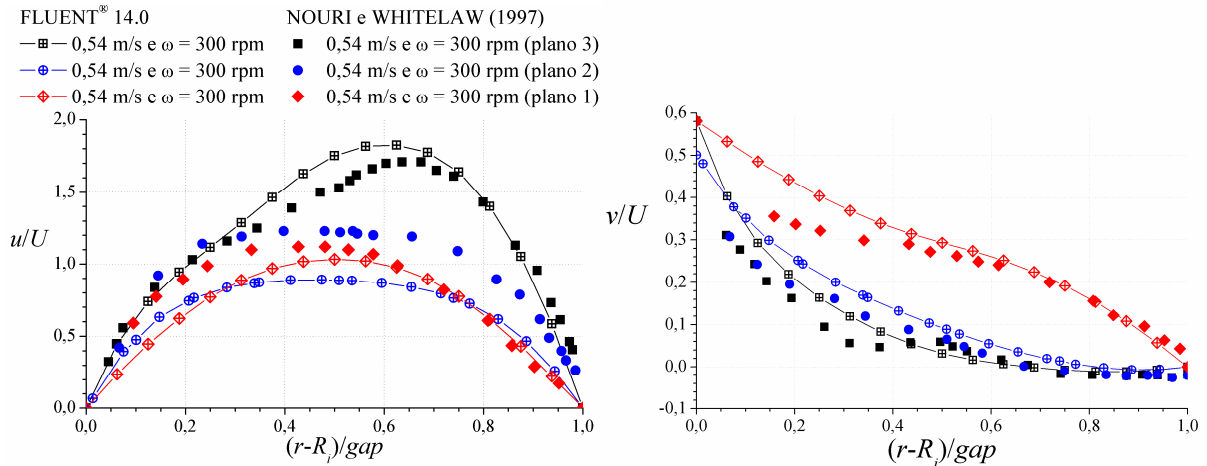


Figura 4.32 – Comparação dos perfis de velocidade simulados pelo FLUENT[®] 14.0 com os resultados experimentais medidos por NOURI e WHITELAW (1997).

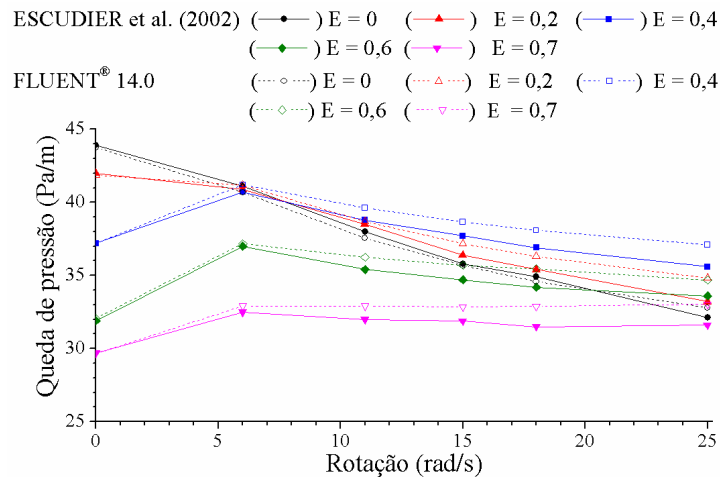


Figura 4.33 – Comparação dos resultados de queda de pressão simulados pelo FLUENT[®] 14.0 e os resultados de ESCUDIER *et al.* (2002a).

A Figura 4.34 apresenta os resultados simulados pelo FLUENT[®] 14.0 e os obtidos em determinações experimentais dos perfis de velocidade axiais e tangenciais empregando um sistema laser Doppler anemometer (LDA), apresentados no trabalho de ESCUDIER *et al.* (2002b) para um anular excêntrico ($d_o = 100,4$ mm e $d_i = 50,8$ mm) usando diversos fluidos não-Newtonianos do tipo Carreau (0,1% GX/0,1% CMC). Os autores utilizaram condições para se ter somente escoamento de Couette, impondo rotação do tubo interno sem gradiente de pressão axial: ($Re = 0$ e $Ta = 3315$, para rotação de 50 rpm usando fluido com $\mu_0 = 0,123$ Pa.s, $\mu_\infty = 0,00343$ Pa.s, $K = 0,552$ sⁿ, $n = 0,552$) e ($Re = 0$ e $Ta = 2754$, para rotação de 50,7 rpm usando fluido com $\mu_0 = 0,134$ Pa.s, $\mu_\infty = 0,0029$ Pa.s, $K = 0,54$ sⁿ, $n = 0,53$). Também impuseram condições para se ter somente escoamento de Poiseuille, aplicando

gradientes de pressão sem rotação do tubo interno: ($Re = 263$ e $Ta = 0$, para velocidade de 0,267 m/s do fluido com $\mu_0 = 0,134$ Pa.s, $\mu_\infty = 0,0029$ Pa.s, $K = 0,54$ sⁿ, $n = 0,53$) e ($Re = 332$ e $Ta = 0$, para velocidade de 0,288 m/s do fluido com $\mu_0 = 0,116$ Pa.s, $\mu_\infty = 0,00349$ Pa.s, $K = 0,502$ sⁿ, $n = 0,553$).

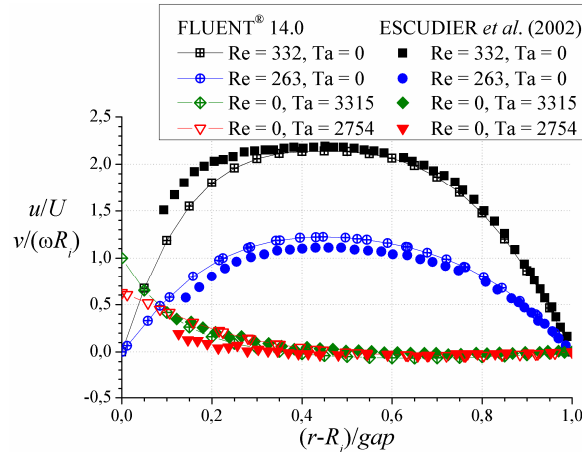


Figura 4.34 – Comparação dos perfis de velocidade (Couette e Poiseuille) simulados pelo FLUENT® 14.0 com os resultados experimentais de ESCUDIER *et al.* (2002b).

ESCUDIER *et al.* (2002b) também estudaram o escoamento de Couette-Poiseuille utilizando o mesmo anular: ($Re = 225$ e $Ta = 3172$, para rotação de 51,1 rpm para velocidade de 0,268 m/s usando fluido com $\mu_0 = 0,177$ Pa.s, $\mu_\infty = 0,00255$ Pa.s, $K = 0,63$ sⁿ, $n = 0,551$) e ($Re = 241$ e $Ta = 3500$, para rotação de 50 rpm para velocidade de 0,268 m/s usando fluido com $\mu_0 = 0,262$ Pa.s, $\mu_\infty = 0,00144$ Pa.s, $K = 2,414$ sⁿ, $n = 0,504$). A Figura 4.35 compara os resultados simulados pelo FLUENT® 14.0 com os apresentados no trabalho de ESCUDIER *et al.* (2002b).

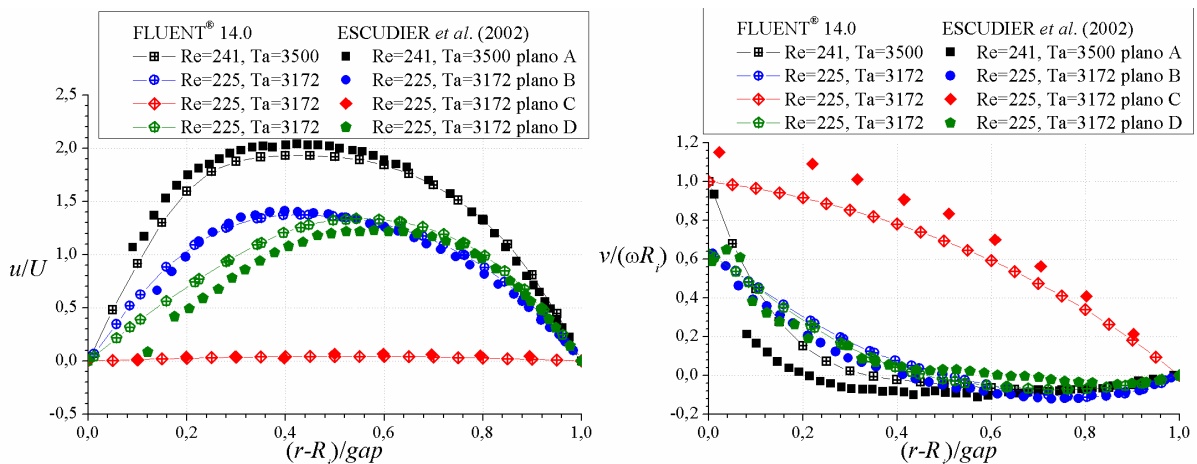


Figura 4.35 – Comparação dos perfis de velocidade simulados pelo FLUENT® 14.0 com os resultados experimentais medidos por ESCUDIER *et al.* (2002b) em um anular excêntrico.

A boa concordância entre os dados reportados na literatura e os resultados previstos pelo FLUENT® 14.0, mostram que esta é uma ferramenta bastante adequada para se realizar previsões sobre o escoamento de fluidos em dutos anulares.

4.3.2 – Resultados da Simulação com Anulares de 2,445 m

4.3.2.1 – Teste de Independência de Malha

De forma a evitar possíveis desvios dos resultados decorrentes do nível de refinamento da malha aplicada e também um esforço computacional desnecessário, foi realizado um teste de independência de malhas considerando quatro diferentes refinamentos para os anulares concêntrico, com excentricidade de 0,23 e com excentricidade de 0,46. As malhas geradas foram simuladas em estado estacionário, sob as mesmas condições de contorno e de operação. Procurou-se neste teste investigar o efeito do refinamento da malha sobre os perfis de velocidade axial e gradientes de pressão obtidos nos anulares.

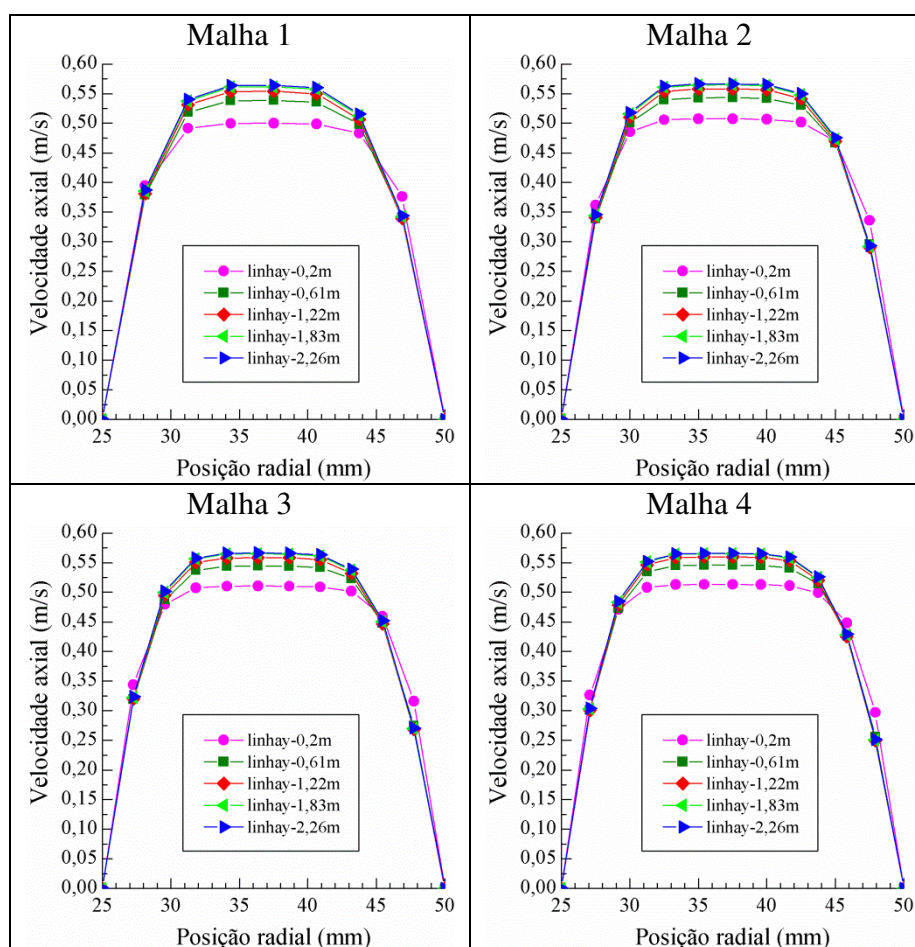


Figura 4.36 – Perfis de velocidade axial (m/s) para as malhas concêntricas.

A Figura 4.36 apresenta os perfis simulados de velocidade axial (m/s) no anular concêntrico ($E=0$) para o escoamento laminar de 0,1% GX a uma vazão de $9 \text{ m}^3/\text{h}$ segundo as quatro diferentes malhas. Nestas figuras são mostrados os perfis de velocidade em uma linha na direção y na seção de maior folga do anular para diferentes posições ao longo do eixo x .

É possível observar na Figura 4.36 que a partir de $x = 0,61\text{m}$ o perfil de velocidade já se encontra completamente desenvolvido, não havendo mais variações significativas ao longo da posição axial (ver Apêndice C). Nesta mesma figura é possível também se verificar a grande similaridade entre os perfis obtidos segundo as diferentes malhas. Isto também pode ser observado na Figura 4.37, que mostra os perfis de velocidade axial na posição $x = 1,22\text{m}$, que corresponde ao meio do tubo, nas seções de menor e maior folga do anular para todas as malhas.

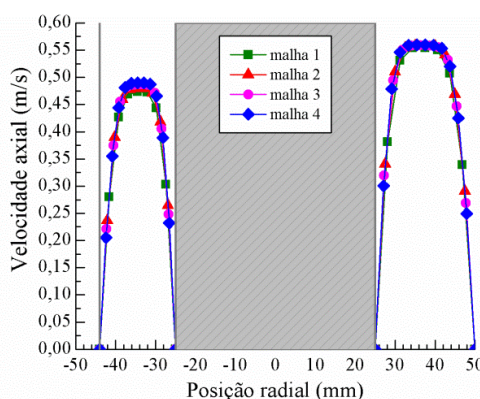


Figura 4.37 – Comparação da velocidade axial no meio do tubo concêntrico.

Buscando também investigar o efeito do refinamento da malha sobre os gradientes de pressão obtidos nos anulares, são apresentados na Figura 4.38 os valores de pressão média obtidos em uma seção próxima à entrada do tubo ($x = 0,2 \text{ m}$) e outra próxima à saída do tubo ($x = 2,26 \text{ m}$) segundo as quatro malhas empregadas. Na Figura 4.39, são mostrados os valores de queda de pressão correspondentes.

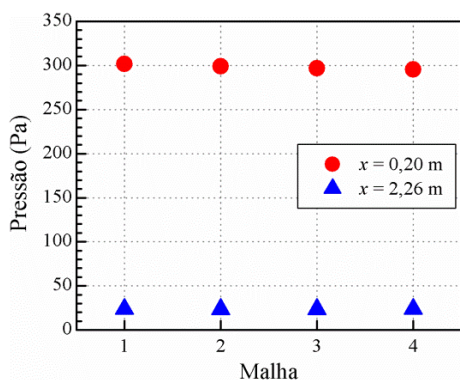


Figura 4.38 – Pressão nos pontos ($E=0$).

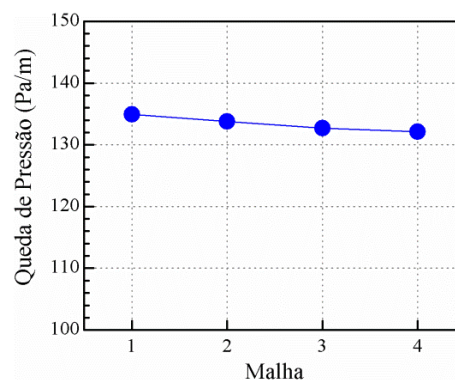


Figura 4.39 – Queda de pressão ($E=0$).

Os valores de pressão média próximo à entrada do tubo e próximo à saída do tubo, juntamente com os valores de queda de pressão, mostrados nas Figuras 4.38 e 4.39, podem ser lidos diretamente na Tabela 4.9. Como a queda de pressão fornecida pela malha 3 diferiu em apenas 0,5% em relação ao valor obtido com a malha 4, além de os resultados para os campos de velocidade segundo essas malhas serem muito similares, a malha 3 foi selecionada para realizar as simulações por requerer um menor esforço computacional.

Tabela 4.9 – Quedas de pressão para o anular concêntrico ($E=0$).

	Pressão entrada (Pa)	Pressão saída (Pa)	Queda de pressão (Pa/m)
Malha 1	301,64	23,98	134,91
Malha 2	299,14	23,76	133,81
Malha 3	296,84	23,73	132,70
Malha 4	295,64	23,79	132,10

A Figura 4.40 apresenta os perfis simulados de velocidade axial (m/s) no anular excêntrico ($E=0,23$) para o escoamento laminar de 0,1% GX a uma vazão de $9 \text{ m}^3/\text{h}$ segundo as quatro diferentes malhas.

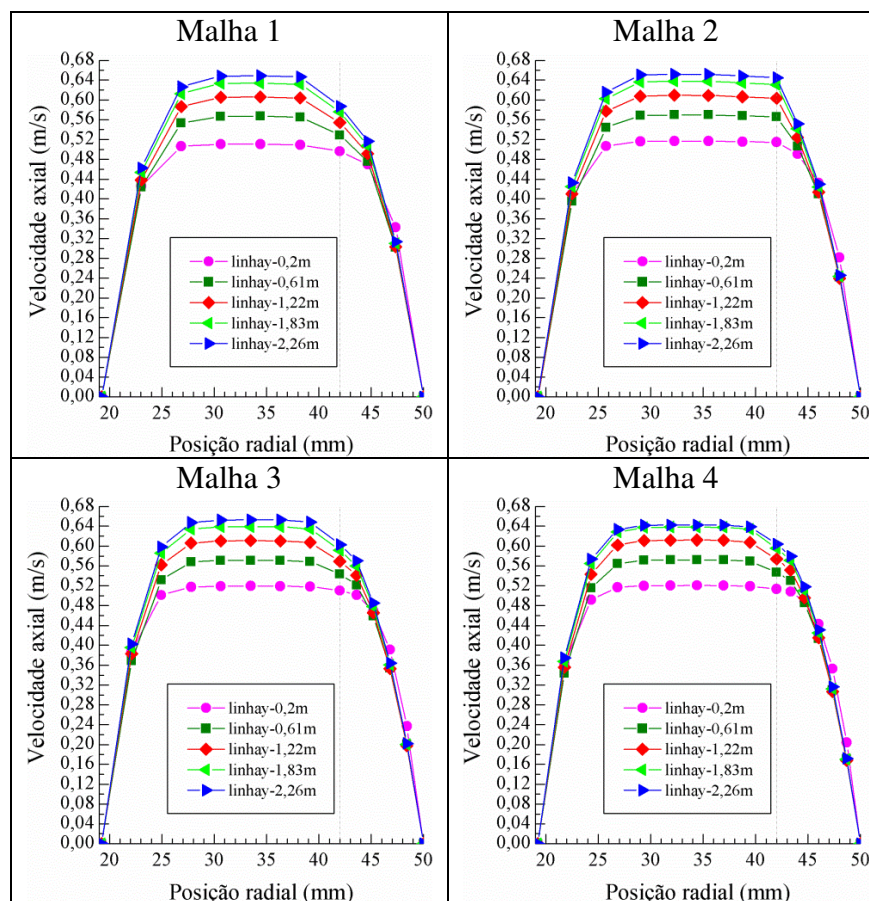


Figura 4.40 – Perfis de velocidade axial (m/s) para as malhas excêntricas ($E=0,23$).

É possível observar na Figura 4.40 que existe uma tendência de estabilização da velocidade axial com o avanço da posição no eixo x , e que a partir de $x = 1,83$ m o perfil de velocidade axial já se encontra completamente desenvolvido. É possível também se verificar uma grande semelhança entre os perfis obtidos segundo as diferentes malhas. A Figura 4.41 destaca esta característica, mostrando os perfis de velocidade axial simulados para a posição $x = 1,22$ m (meio do tubo), nas seções de menor e maior folga anular para todas as malhas.

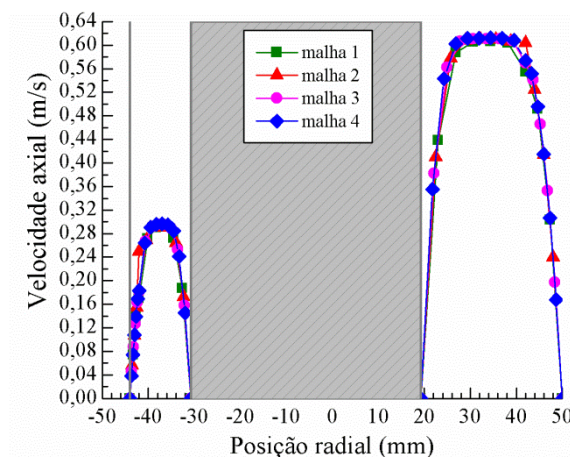


Figura 4.41 – Comparação da velocidade axial no meio do tubo excêntrico ($E = 0,23$).

Para investigar o efeito do refinamento da malha sobre os gradientes de pressão obtidos nos anulares excêntricos, foram apresentados os valores de pressão média obtidos em uma seção próxima à entrada do tubo ($x = 0,2$ m) e outra próxima à saída do tubo ($x = 2,26$ m), como pode ser visto na Figura 4.42, o que permitiu a obtenção dos valores de queda de pressão mostrados na Figura 4.43.

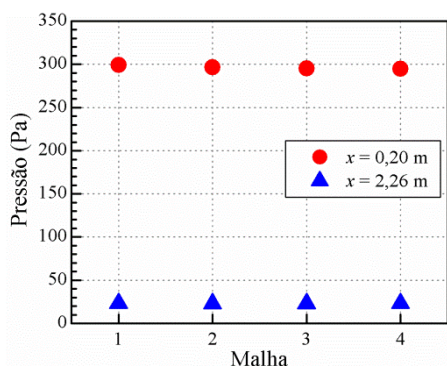


Figura 4.42 – Pressão nos pontos ($E = 0,23$).

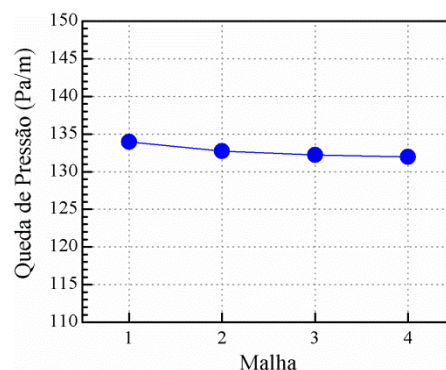


Figura 4.43 – Queda de pressão ($E = 0,23$).

Os valores de pressão média próximo à entrada do tubo e próximo à saída do tubo, juntamente com os valores de queda de pressão, mostrados nas Figuras 4.42 e 4.43, podem ser

lidos na Tabela 4.10. Como o valor da queda de pressão obtida com a malha 3 diferiu em apenas 0,2% em relação ao valor estimado com a malha 4, além dos campos de velocidade serem bastante semelhantes para ambas as malhas, a malha 3 foi selecionada para realizar as simulações por requerer um menor esforço computacional.

Tabela 4.10 – Dados de pressão para o anular excêntrico ($E=0,23$).

	Pressão entrada (Pa)	Pressão saída (Pa)	Queda de pressão (Pa/m)
Malha 1	299,01	23,36	133,94
Malha 2	296,35	23,22	132,72
Malha 3	295,32	23,19	132,23
Malha 4	294,96	23,39	131,96

A Figura 4.44 apresenta os perfis simulados de velocidade axial (m/s) no anular excêntrico ($E=0,46$) para o escoamento laminar de 0,1% GX a uma vazão de 9 m³/h segundo as quatro diferentes malhas. Nestas figuras são mostrados os perfis em uma linha na direção y na seção de maior folga do anular para diferentes posições ao longo do eixo x.

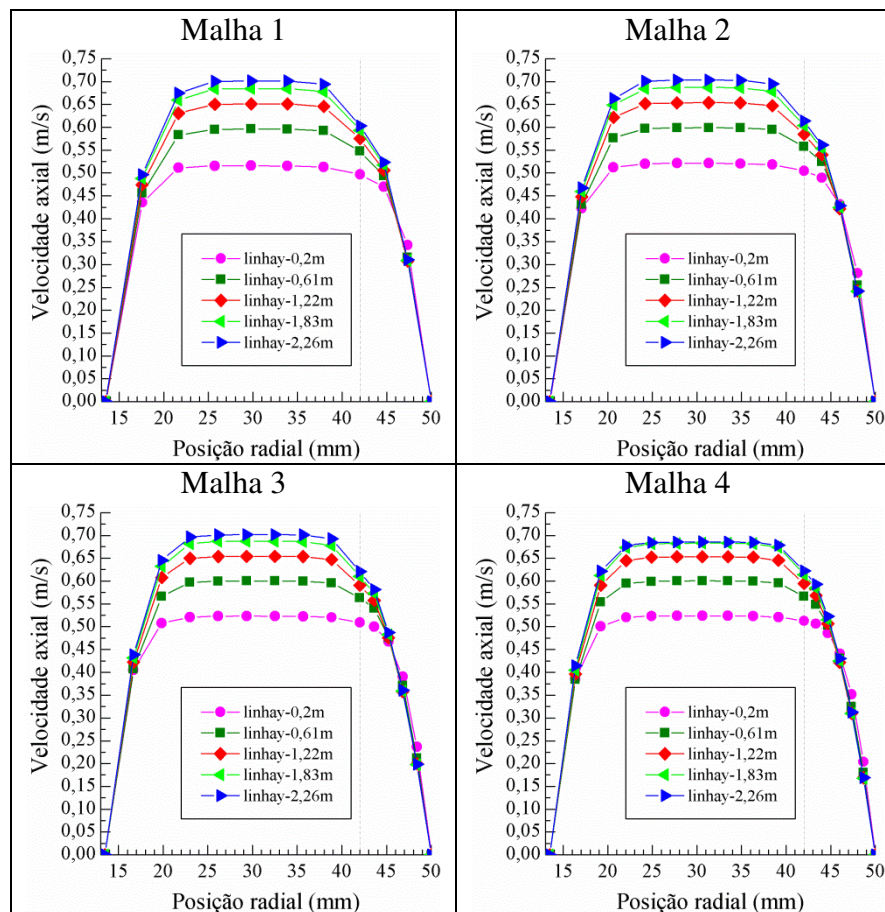


Figura 4.44 – Perfis de velocidade axial (m/s) para as malhas excêntricas ($E=0,46$).

A Figura 4.44 indica uma tendência de estabilização da velocidade axial com o avanço da posição no eixo x , e que esta estabilização é obtida mais rapidamente para a malha 4, sendo que para posições em x partir de 1,83 m o perfil de velocidade axial obtido praticamente não varia mais. A grande semelhança entre os perfis obtidos segundo as diferentes malhas pode ser observado na Figura 4.45, que apresenta os perfis de velocidade axial simulados para a posição $x = 1,22$ m (meio do tubo), nas seções de menor e maior folga anular para todas malhas.

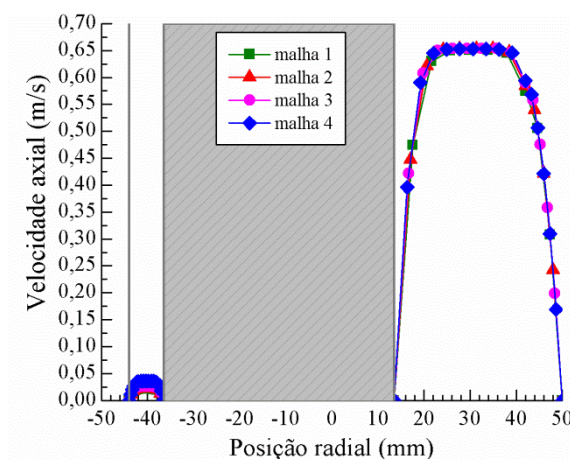


Figura 4.45 – Comparação da velocidade axial no meio do tubo excêntrico ($E=0,46$).

Para investigar o efeito do refinamento da malha sobre os gradientes de pressão obtidos nos anulares de excentricidade 0,46, são apresentados os valores de pressão média obtidos em uma seção do anular próxima à entrada do tubo ($x = 0,2$ m) e outra seção próxima à saída do tubo ($x = 2,26$ m), como pode ser visto na Figura 4.46, o que permite a obtenção dos valores de queda de pressão mostrados na Figura 4.47.

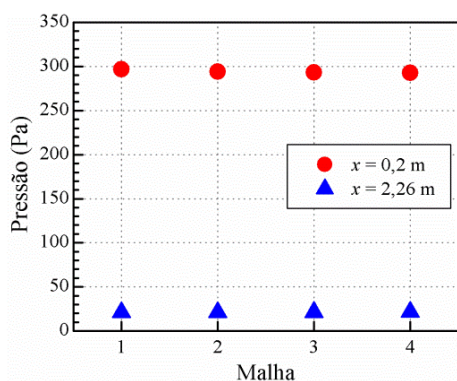


Figura 4.46 – Pressão nos pontos ($E=0,46$).

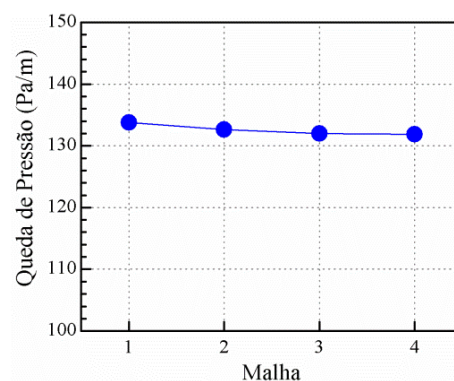


Figura 4.47 – Queda de pressão ($E=0,46$).

Os valores de pressão média próximo à entrada do tubo e próximo à saída do tubo, juntamente com os valores de queda de pressão, mostrados nas Figuras 4.46 e 4.47, podem ser

lidos na Tabela 4.11. Como praticamente não houve diferença da queda de pressão obtida com as malhas 3 e 4, além do fato das duas malhas apresentarem perfis de velocidade axial coincidentes, a malha 3 foi selecionada para realizar as simulações.

Tabela 4.11 – Quedas de pressão para o anular excêntrico ($E=0,46$).

	Pressão entrada (Pa)	Pressão saída (Pa)	Queda de pressão (Pa/m)
Malha 1	296,63	21,28	133,80
Malha 2	294,09	21,14	132,63
Malha 3	293,01	21,33	132,01
Malha 4	292,95	21,58	131,86

4.3.3 – Resultados da Simulação Periódica (0,5 m)

Primeiramente, fez-se uma comparação dos resultados simulados com as mesmas vazões em anulares de 0,5 m e 2,445 m, para validar os resultados obtidos com a seção anular reduzida. A Figura 4.48 mostra a comparação entre os perfis simulados de velocidade axial para o fluxo de 0,1% GX a $9 \text{ m}^3/\text{h}$ em anulares concêntricos e excêntricos de 0,5 m e 2,445 m com obstrução de 6 mm, para caso sem rotação do tubo interno. Os perfis foram obtidos em uma linha na direção y (sendo que o cilindro interno se localizava na porção inferior do anular próximo à obstrução) com posição em x correspondente ao meio do tubo para o anular concêntrico e $x = 1,83 \text{ m}$ para os anulares excêntricos, pois nestas posições os perfis já se encontravam plenamente desenvolvidos.

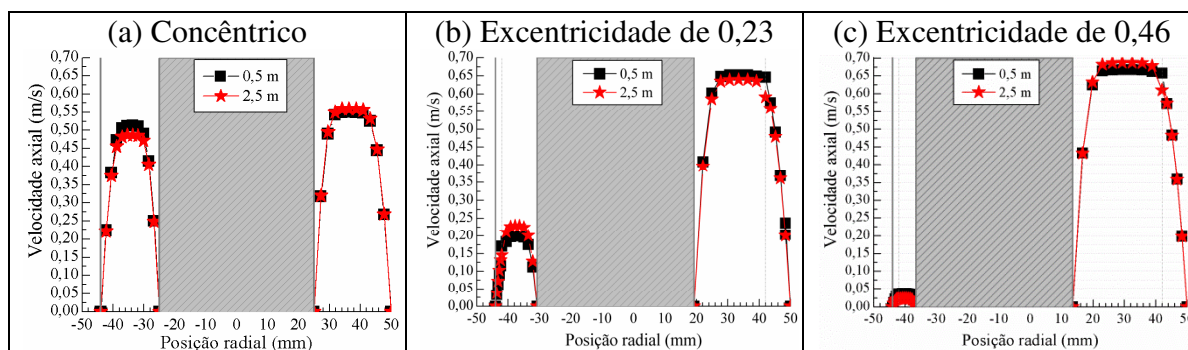


Figura 4.48 – Comparação da velocidade axial para anulares de 0,5 m e 2,445 m.

Como mostra a Figura 4.48 existe uma excelente concordância entre os perfis de velocidade axiais obtidos segundo os dois anulares (completo e reduzido). A Tabela 4.12 mostra a comparação entre os resultados de queda de pressão simulada obtidos com os anulares de 0,5 m e 2,445 m, juntamente com o valor experimental (valor da Tabela 4.4

dividido pelo comprimento entre os pontos de medida que era de 2,058 m). Observa-se que os resultados obtidos para a queda de pressão em anulares com a seção reduzida são menores do que os dos anulares completos e mais próximos da medida experimental.

Tabela 4.12– Queda de pressão para o anulares de 0,5 m e 2,445 m.

Anular	Queda de pressão exp (Pa/m)	Queda de pressão (Pa/m)	
	–	0,5 m	2,445 m
Concêntrica	$124,10 \pm 7,38$	125,74	132,70
Excentricidade de 0,23	$107,16 \pm 8,27$	120,01	132,23
Excentricidade de 0,46	$115,59 \pm 8,04$	113,74	132,01

A partir deste ponto serão apresentados os resultados obtidos no estudo da influência das variáveis concentração de goma xantana, vazão, rotação, excentricidade e altura de obstrução sobre os perfis de velocidade e queda de pressão em anulares de 0,5 m. As variáveis excentricidade e altura de obstrução são variáveis de projeto, e portanto, foram consideradas na construção diferentes geometrias estudadas. A variável concentração de goma xantana (GX) foi aplicada na definição do fluido não-Newtoniano em escoamento: 0,1% de GX ($\tau_0=0,5420$, $K=0,0087$ e $n=0,9370$) e 0,5% GX ($\tau_0=2,2917$, $K=0,6461$ e $n=0,4332$). Lembrando que o escoamento foi definido como periódico na direção axial. A variável vazão mássica de entrada foi especificada como condição de contorno na entrada da seção periódica no valor de 0,8318 kg/s para vazão de 3 m³/h e 2,4955 kg/s para a vazão de 9 m³/h. A variável rotação era considerada conduzindo a simulação com o tubo interno parado (0 rpm) ou com rotação de 400 rpm. Para os casos concêntricos a rotação era definida como uma condição de contorno na parede, e para os casos excêntricos, a rotação era definida ao se habilitar o movimento excêntrico do volume interno utilizando a opção de malha móvel (*moving mesh*).

Os perfis de velocidade foram obtidos em uma linha na direção y na seção do anular em posição em x correspondente ao meio do tubo, após o alcance do regime permanente ou após a estabilização para os casos simulados em regime transiente (cerca de 7 voltas).

Para os casos transientes, eram acompanhados os perfis de velocidade axial e as quedas de pressão ao longo do tempo até que não houvesse mais variações. Para ilustrar o procedimento de determinação da estabilização, são apresentados na Figura 4.49 os perfis de velocidade axial, obtidos a tempos correspondentes a diferentes voltas do tubo interno, para um dos casos estudados (Caso: $E=0,23$, 6 mm de obstrução, 0,5% GX, 9 m³/h e 400 rpm).

Mais perfis obtidos para este mesmo caso, em tempos correspondentes a cada 1/4 de volta podem ser visualizados no Apêndice D.

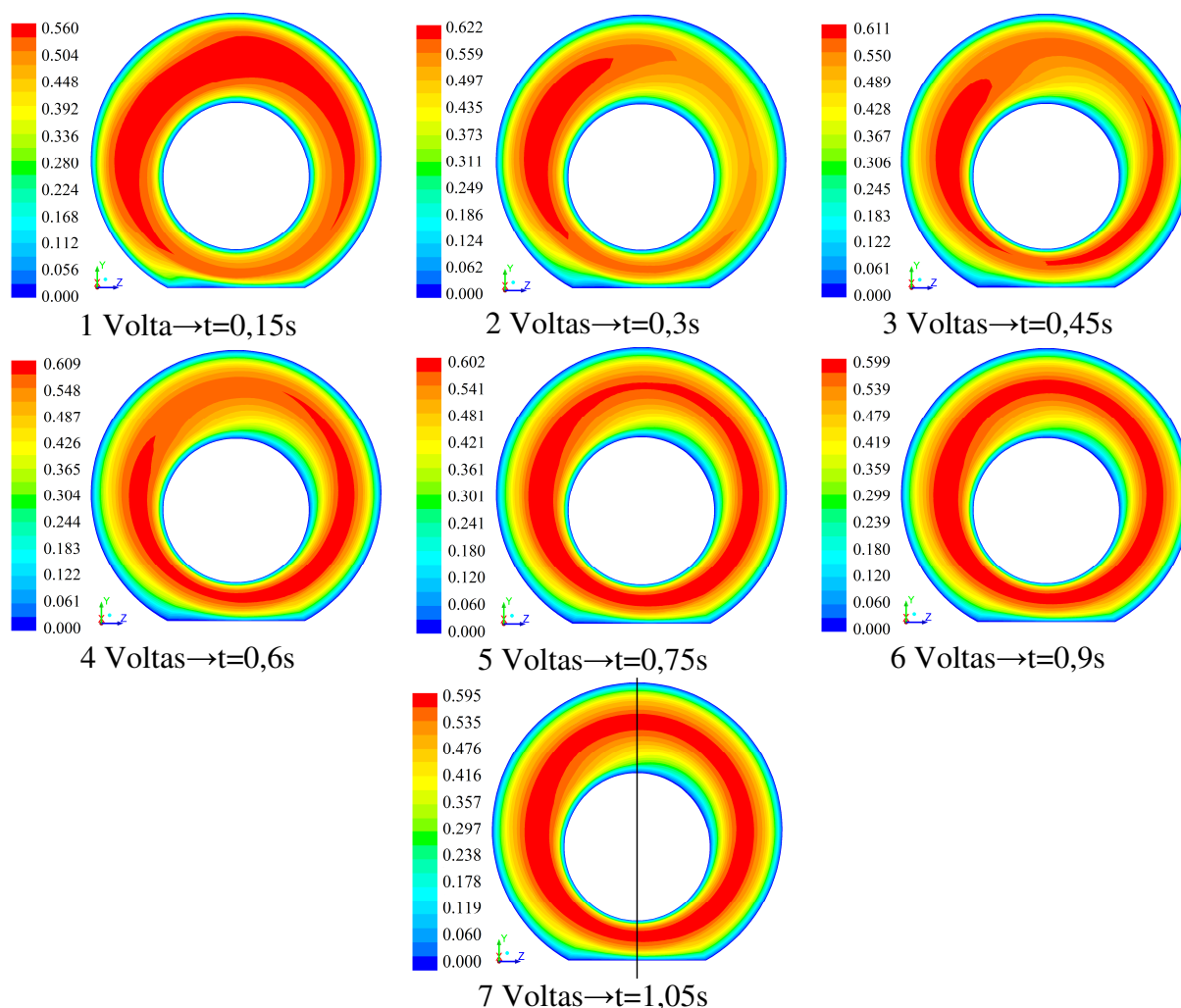


Figura 4.49 – Contornos simulados de velocidade axial obtidos a cada volta da solução transiente mostrando a estabilização.

Ainda é apresentado no perfil correspondente a 7ª volta, a linha na direção y na qual os perfis de velocidades para todos os casos foram obtidos. Observe que esta linha em y é obtida quando o cilindro interno se localizava na porção inferior do anular próximo à obstrução.

As Figuras 4.50, 4.51 e 4.52 apresentam os perfis de distribuição radial de velocidade axial em (m/s) para os anulares com diferentes alturas de obstrução concêntricos, com excentricidade de 0,23 e excentricidade de 0,46, respectivamente. Em cada figura é possível se observar o efeito da vazão de fluido e da rotação do cilindro interno. A comparação com a figura ao lado permite observar o efeito da concentração de goma xantana, e a comparação com a figura abaixo/acima permite observar o efeito da altura de obstrução sobre o escoamento do fluido.

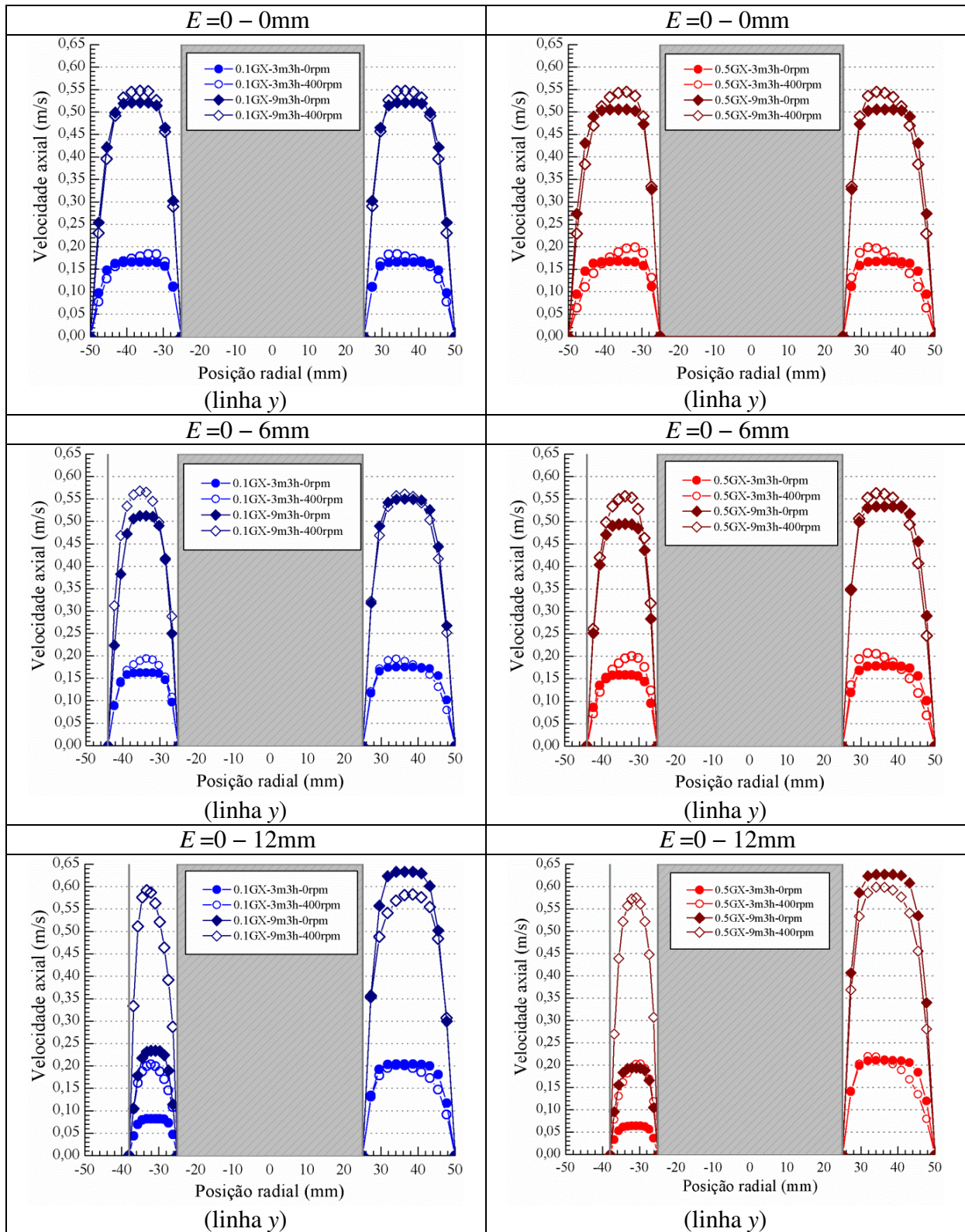


Figura 4.50 – Perfil de distribuição radial de velocidade axial em (m/s) para os anulares com diferentes alturas de obstrução concêntricas.

Nas Figuras 4.51 e 4.52 as linhas pontilhadas indicam a posição da interface gerada nas malhas excêntricas, que é a posição limite entre os dois volume de células das geometrias.

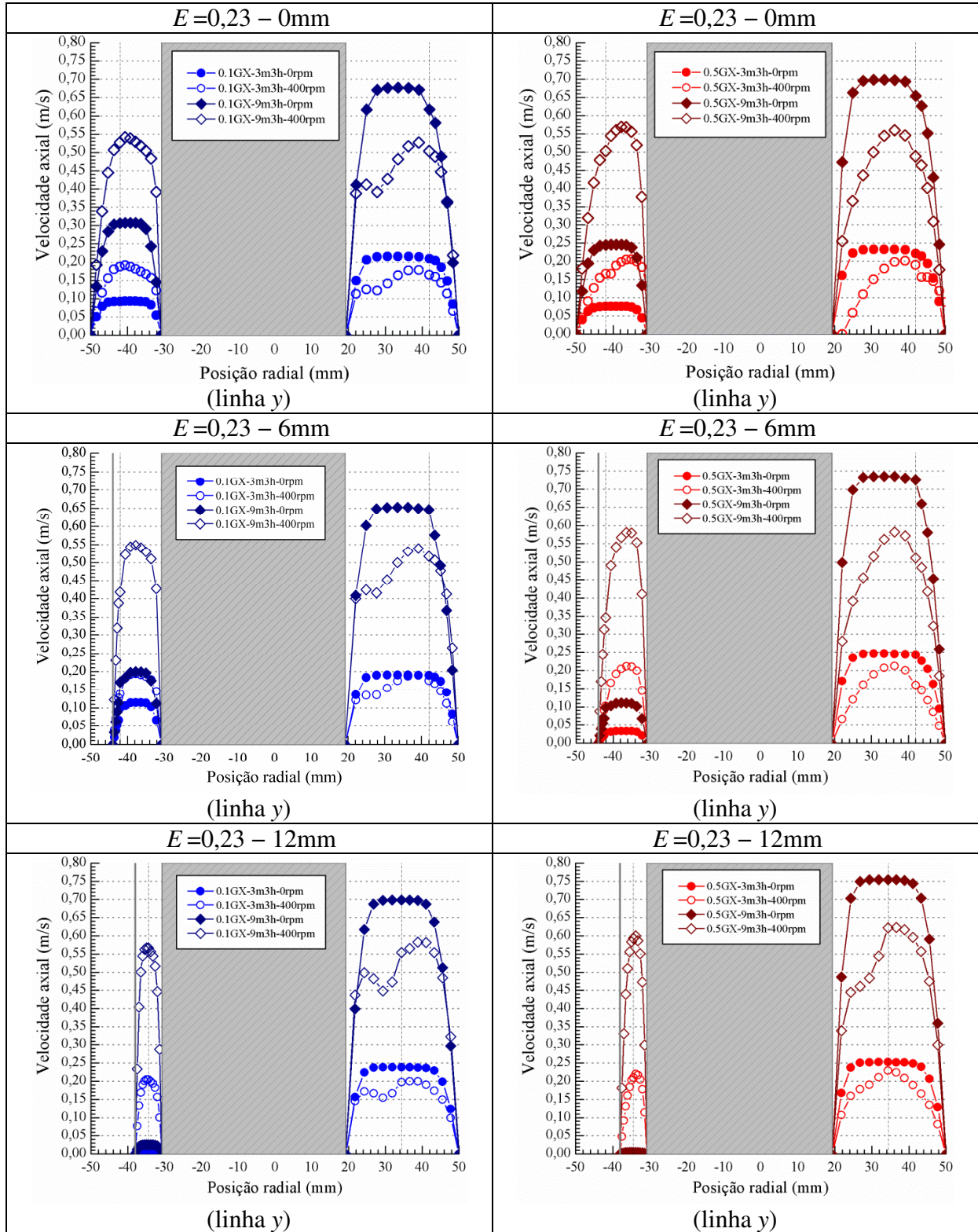


Figura 4.51 – Perfil de distribuição radial de velocidade axial em (m/s) para os anulares com diferentes alturas de obstrução excêntricas ($E=0,23$).

A Figura 4.50 mostra que são obtidos perfis de velocidade axiais simétricos nos dois lados opostos dos anulares concêntricos sem obstrução, como era esperado para esta configuração. No entanto, com a presença de obstrução de 6 mm já é possível se observar um

pequeno desvio deste comportamento para vazões mais elevadas, sendo que este desvio é bastante acentuado na presença de obstrução de 12 mm, situação em que o perfil de velocidade já se mostra preferencialmente na região da seção anular de maior *gap* (distância entre a parede do cilindro externo e cilindro interno). Em todos os casos nota-se que a introdução da rotação do cilindro interno anula completamente essa assimetria nos perfis de velocidades axiais geradas pela presença da obstrução.

Já na Figura 4.51, para os casos dos anulares com excentricidade de 0,23 sem rotação do tubo interno, observou-se que as velocidades axiais obtidas no lado de menor *gap* do anular foram sempre menores que do lado de maior *gap*, sendo esta diferença acentuada com o aumento da altura da obstrução no anular. Assim, a excentricidade introduziu uma assimetria nos perfis de velocidade axial. Essa assimetria foi praticamente eliminada com a rotação do cilindro interno que fez com fossem alcançadas velocidades similares em ambos os lados do anular, diminuindo ou eliminando a tendência de canalização da velocidade em uma região e estagnação em outra, como pode ser observado nos casos com rotação da Figura 4.51.

Também pode ser observado na Figura 4.51 (observando as figuras que se encontram lado a lado) que a concentração de GX no fluido tem uma pequena contribuição para a assimetria dos perfis de velocidade axiais, já que fluidos mais concentrados em GX apresentam maior assimetria de velocidades. Fluidos com concentração de 0,5% de GX apresentam maiores velocidades no lado de maior *gap* e menores velocidades no lado de menor *gap* do que os fluidos com 0,1% de GX.

Ainda na Figura 4.51, para ambos os fluidos com a maior vazão ($9 \text{ m}^3/\text{h}$) nos casos com rotação em anulares de $E=0,23$ e altura de obstrução de 12 mm, nota-se a tendência de formação de um outro pico de velocidade próximo à parede do tubo interno, devido à formação de uma zona de escoamento preferencial em um dos lados do anular (ver perfil completo no Apêndice E).

Na Figura 4.52 fica bem evidente o efeito de distorção criado nos perfis de velocidade axial quando há rotação excêntrica do tubo interno no anular de maior excentricidade ($E=0,46$). Para todos os casos de $E=0,46$ com rotação observou-se o deslocamento dos picos de máxima velocidade axial em direção à parede do cilindro interno, onde era formada uma pequena zona de escoamento preferencial. Para os casos com obstrução de 12 mm esta região fica bem evidenciada já que aparece também o pico de velocidade que normalmente é esperado para os casos com rotação, próximo à parede do tubo externo.

Observando as Figuras 4.50 até a 4.52 pode-se afirmar que o incremento da altura da obstrução favoreceu o alcance de maiores velocidades axiais no lado de maior *gap* no anular,

e levava a grandes reduções da velocidade axial no lado de menor *gap* do anular, principalmente para os casos excêntricos sem rotação, onde para alguns casos se observou a estagnação nesta região. O efeito da vazão também foi comum para todos os anulares, sendo que o seu incremento favorecia a obtenção de maiores velocidades axiais.

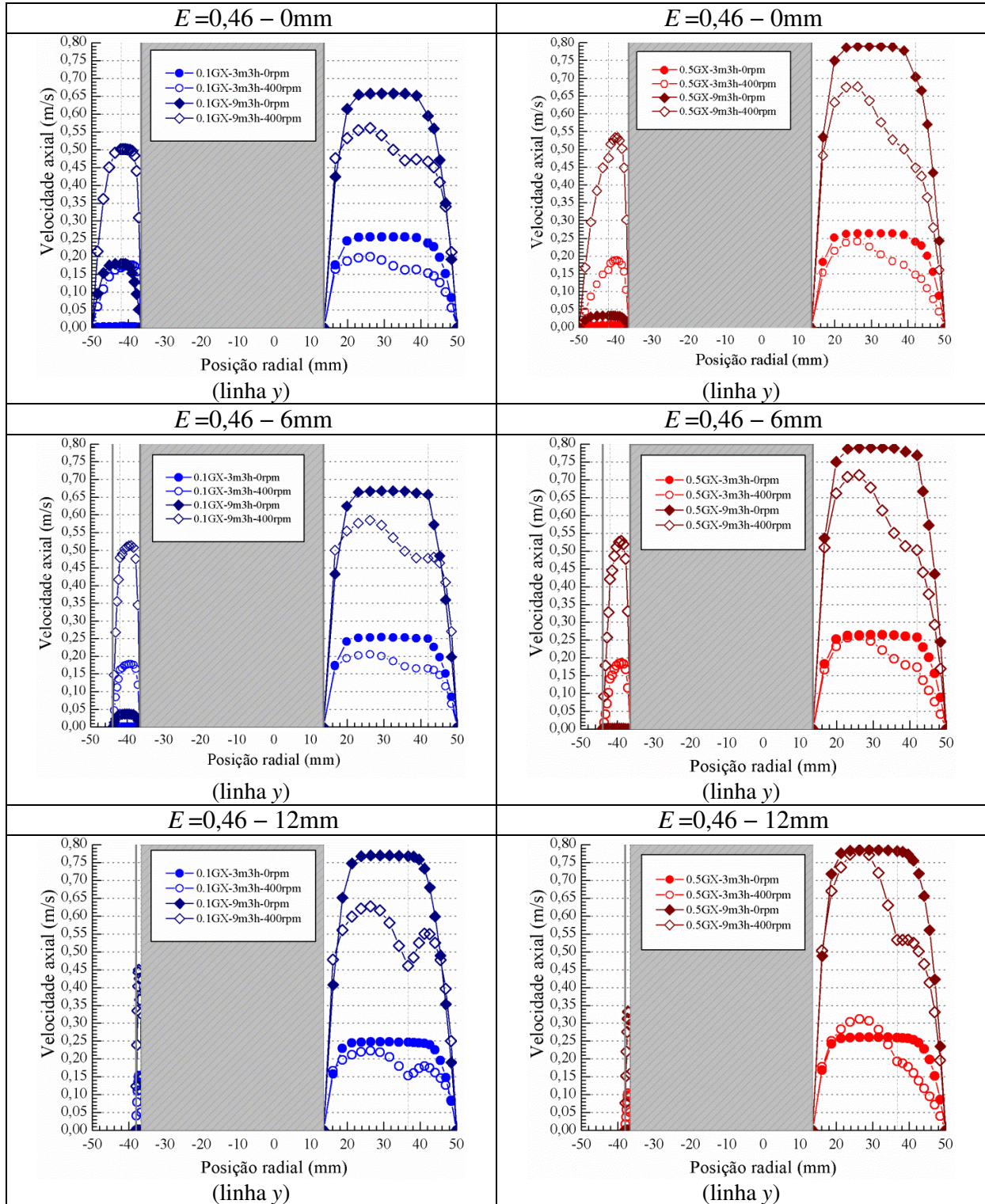


Figura 4.52 – Perfil de distribuição radial de velocidade axial em (m/s) para os anulares com diferentes alturas de obstrução excêntricas ($E = 0.46$).

Deve-se destacar a importância do efeito da rotação do tubo interno para obtenção de uma distribuição uniforme de fluxo no anular, especialmente para os casos excêntricos com obstrução parcial. Este aspecto é bastante favorável em processos de escoamento de fluidos de perfuração, uma vez que, a estagnação do fluxo provoca o surgimento de regiões de acúmulo de sólidos. Também é importante lembrar que a utilização de fluidos com maior concentração de polímero favorece a suspensão dos sólidos em eventuais paradas do processo.

Os perfis ou contornos de velocidade axial nas seções anulares completas para cada um dos casos estudados podem ser vistos nas Figuras AE.1 – AE.8 do Apêndice E.

Os perfis de distribuição radial de velocidade tangencial em (m/s), obtidos em uma linha na direção y na seção do anular em posição em x correspondente ao meio do tubo, para todos os casos simulados com rotação do cilindro interno, são apresentados na Figura 4.53.

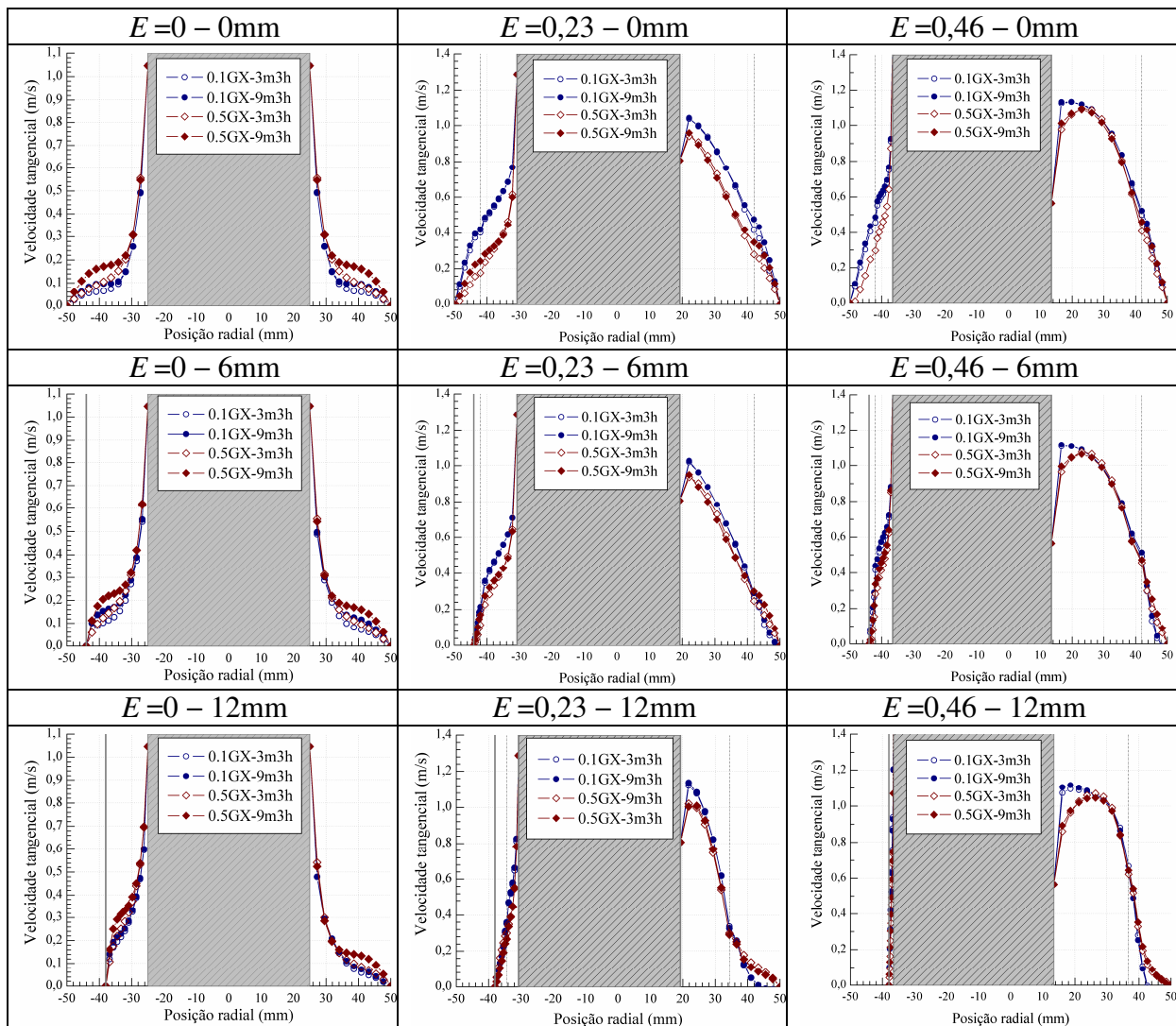
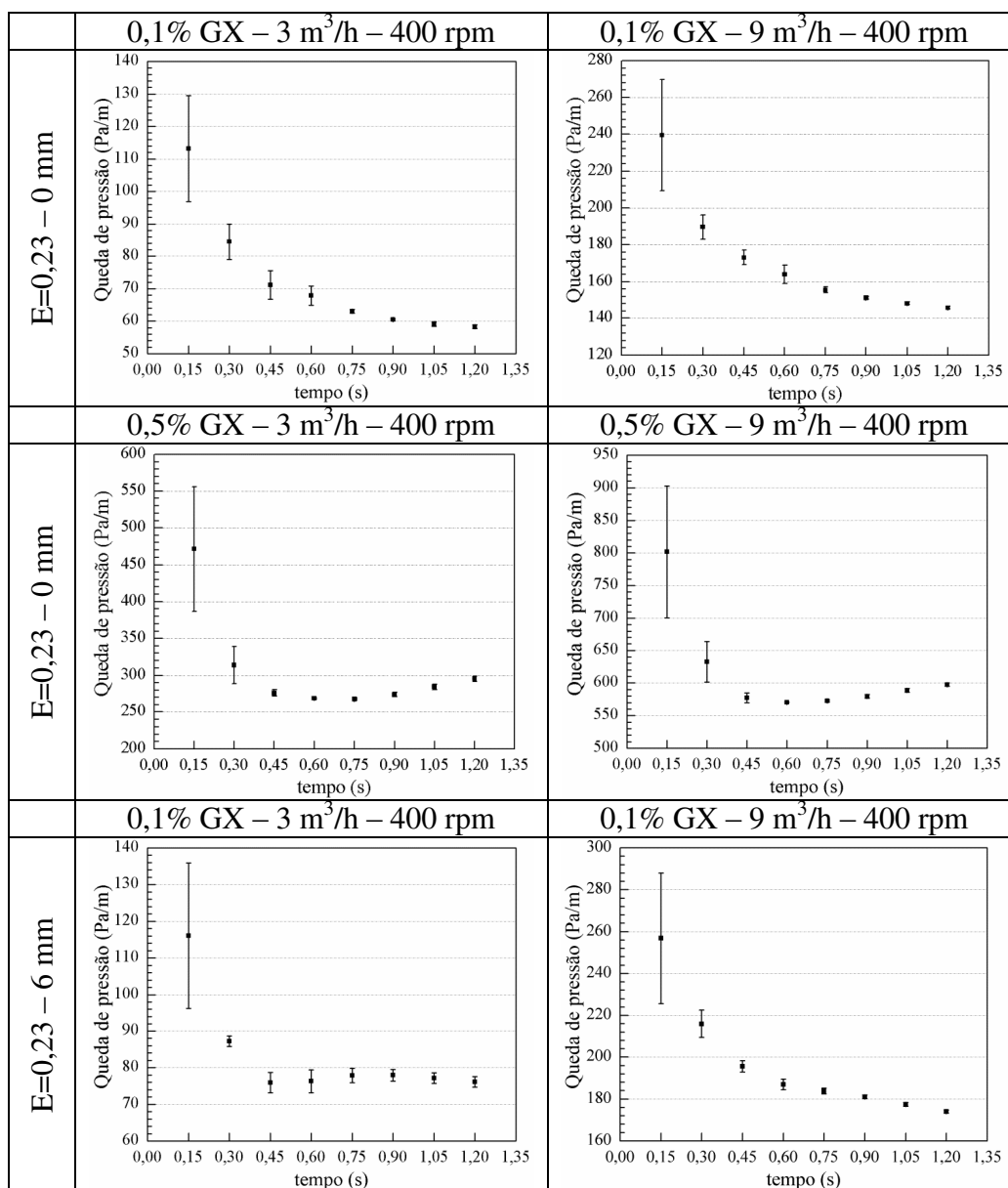


Figura 4.53 – Perfil de distribuição radial de velocidade tangencial em (m/s) para casos com rotação de 400 rpm.

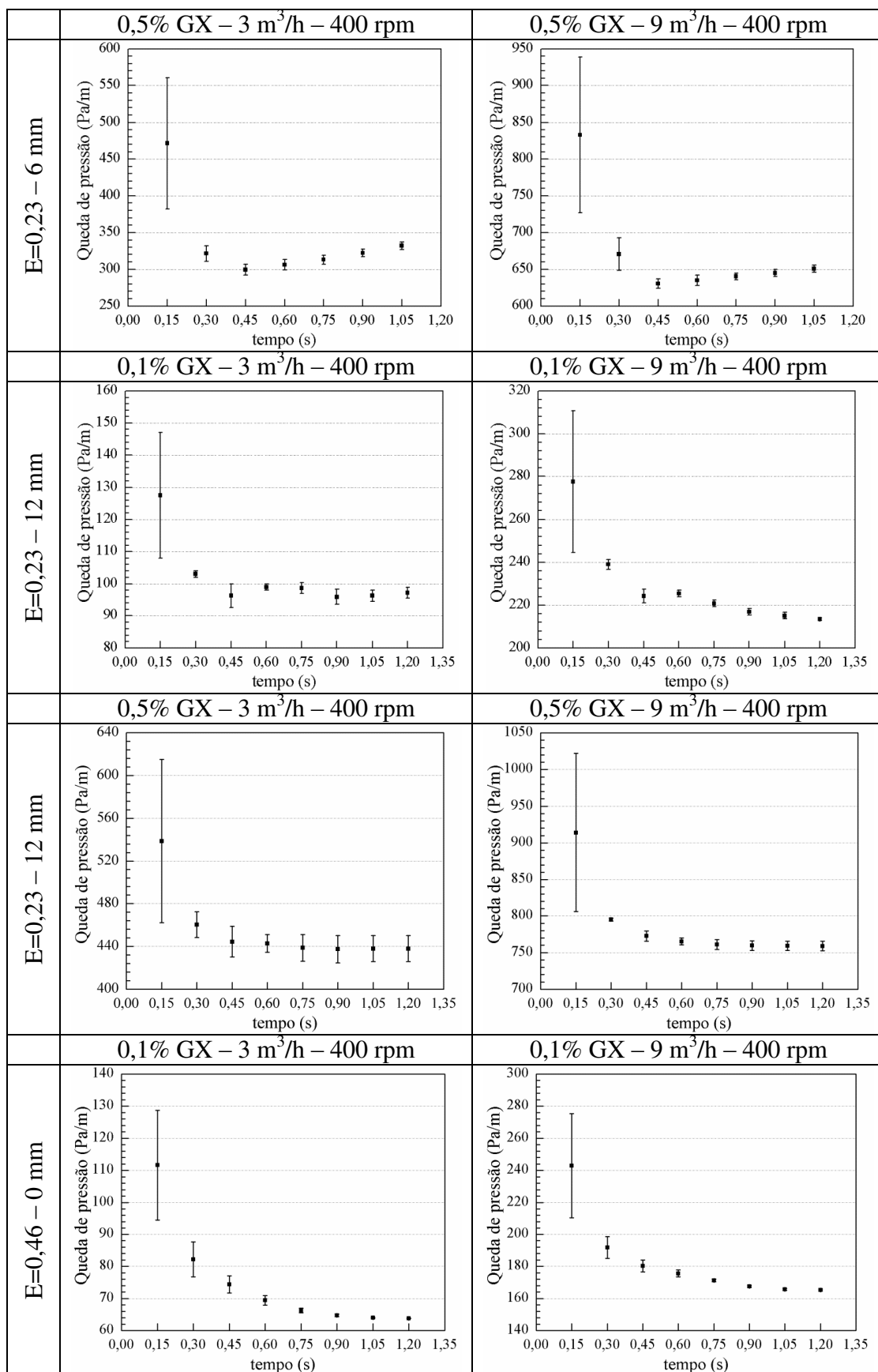
Pode-se observar na Figura 4.53 que para os casos concêntricos há uma redução brusca da velocidade tangencial ao se afastar do tubo interno, ao passo que, nos anulares excêntricos esta redução ocorre de modo mais gradativo (especialmente para a região de maior folga). Outro efeito que pode ser notado na Figura 4.53, é que para os anulares excêntricos, na região de maior folga, existe um deslocamento dos picos de maiores velocidades tangenciais em direção ao centro do anular à medida em que se aumenta a altura da obstrução e a concentração de GX, especialmente para o anular de excentricidade 0,46.

A estabilização dos valores de queda de pressão para os casos simulados em regime transiente, que eram os casos excêntricos com movimentação excêntrica do cilindro interno, podem ser vistos na Figura 4.54. Nessas figuras são apresentados os valores da queda de pressão média a cada volta (0,15 s).



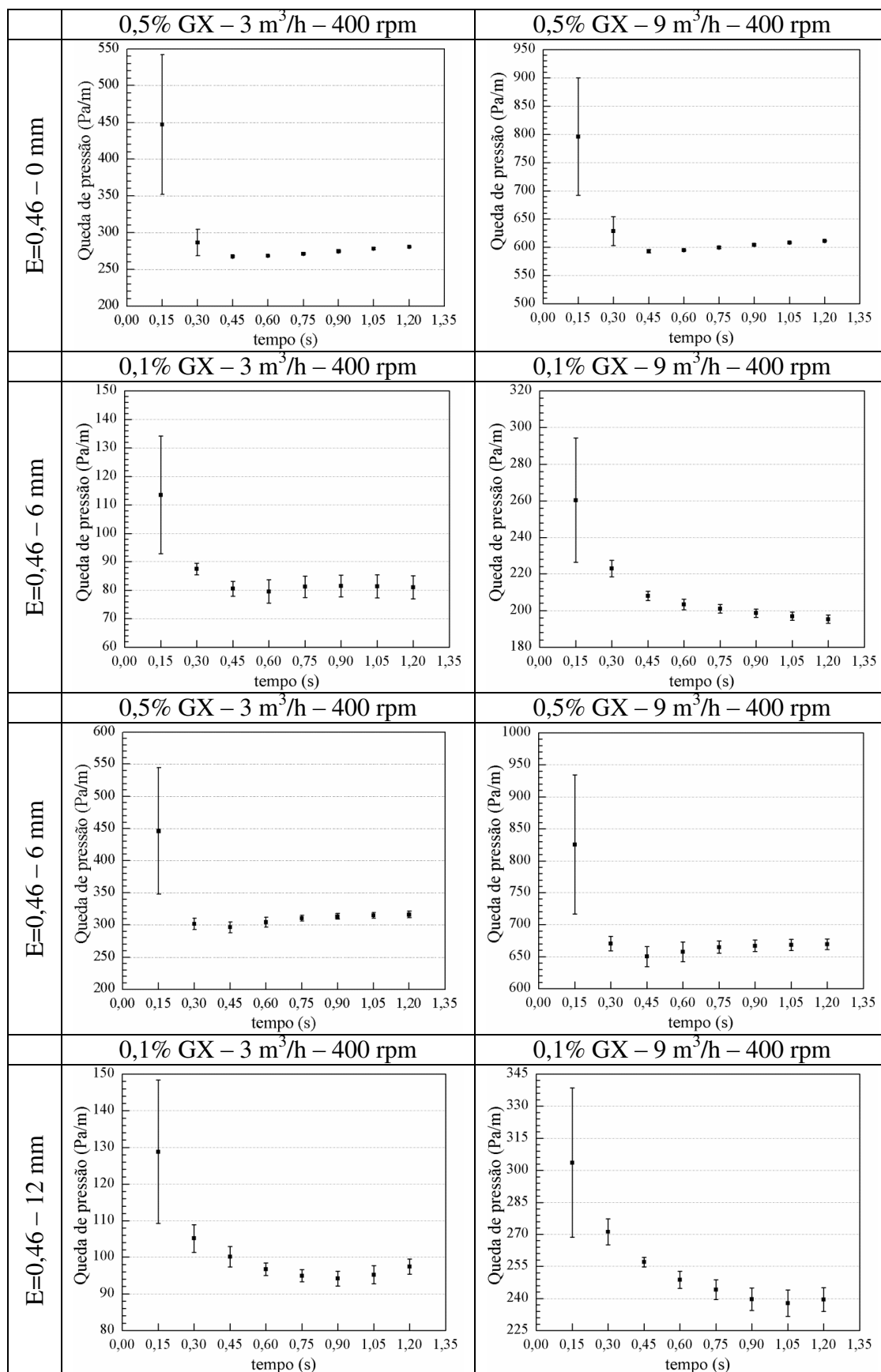
continua

continuação



continua

continuação



continua

continuação

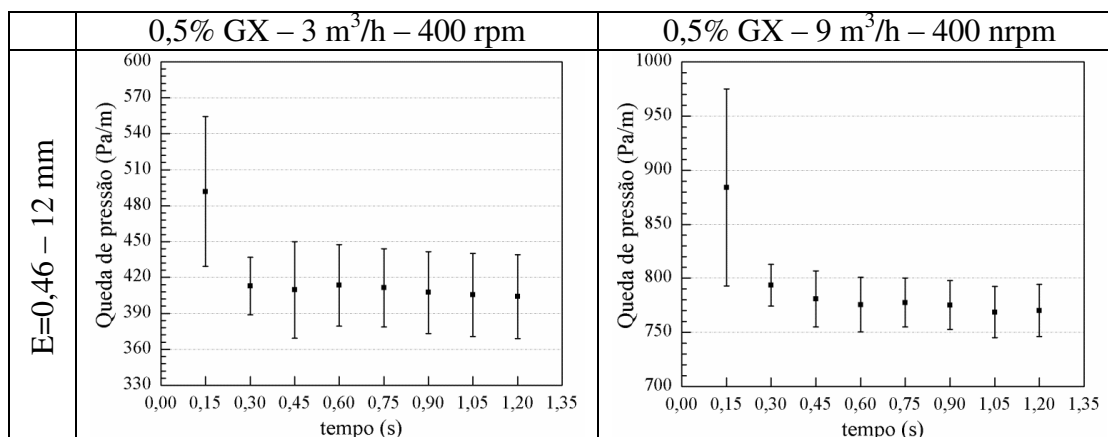


Figura 4.54 – Estabilização da queda de pressão.

Os valores das quedas de pressão obtidos em cada um dos 72 casos simulados são apresentados na Figura 4.55, que permite a visualização e comparação dos resultados.

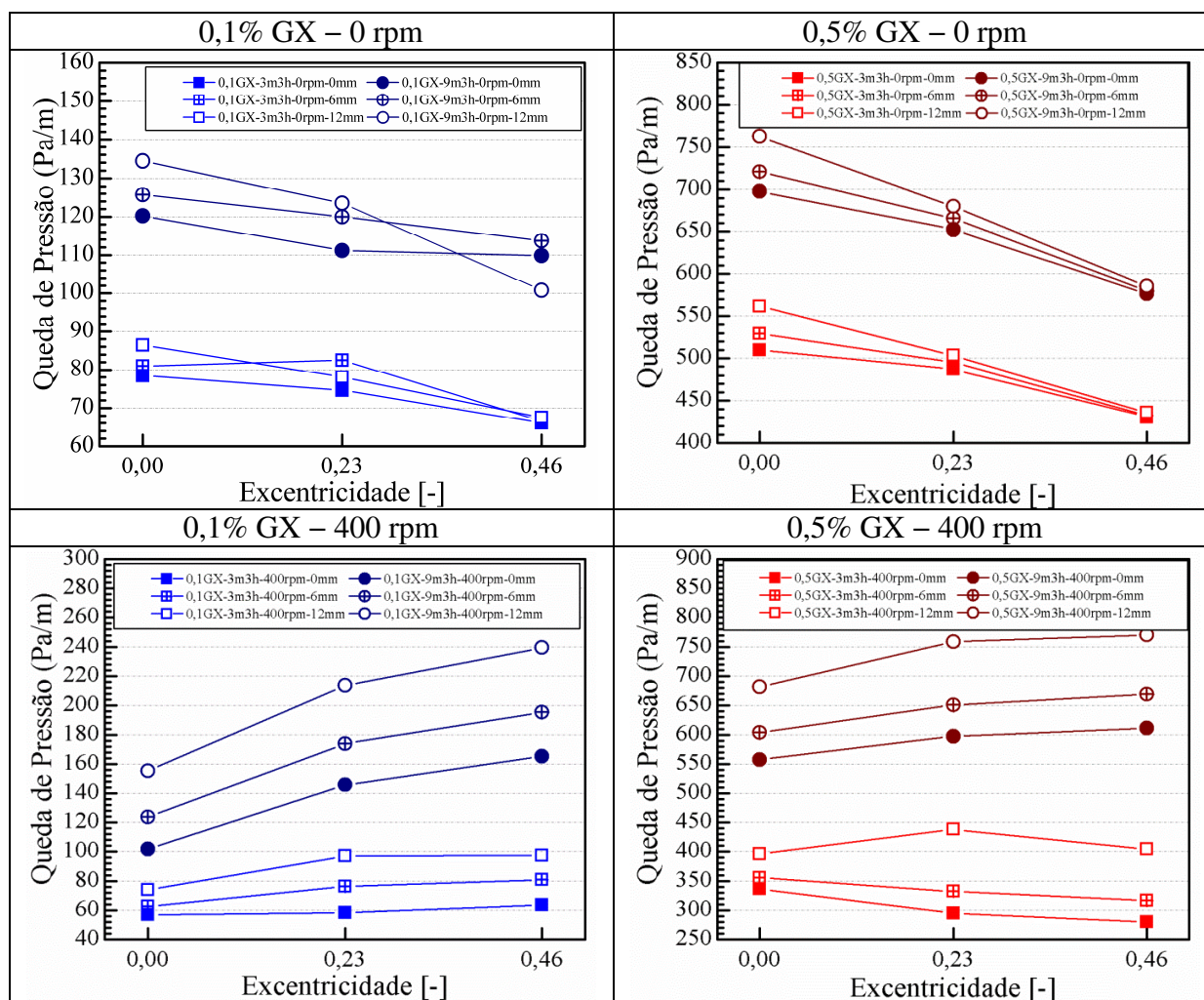


Figura 4.55 – Resultados de queda de pressão simulada versus excentricidade.

Observa-se na Figura 4.55 que a concentração de goma foi a variável que provocou maiores variações na queda de pressão, sendo que quanto maior sua concentração mais elevados eram os gradientes de pressão obtidos. O aumento da vazão ou uso de maiores obstruções também contribuíram para o acréscimo da queda de pressão nos anulares. Pode-se também notar na Figura 4.55 um efeito combinado da rotação com a excentricidade. Para os casos sem rotação há uma tendência de redução da queda de pressão com o aumento da excentricidade, por outro lado quando há rotação do tubo interno este efeito é invertido.

A Tabela 4.13 apresenta uma regressão múltipla dos dados de queda de pressão (considerando os níveis codificados das variáveis independentes), para um intervalo de confiança de 95%, considerando apenas as variáveis significativas. O quadrado do coeficiente de correlação (R^2) foi igual a 0,99, e os níveis de significância dos parâmetros da regressão podem ser usados para constatação do efeito das variáveis estudadas.

Tabela 4.13 – Resultados da regressão dos dados de queda de pressão simulados.

	Coeficiente	Nível de significância
Média	323,40	0,00E-01
Obstrução (1)	26,26	1,05E-09
Excentricidade (2)	-9,45	1,15E-02
Concentração (3)	214,43	0,00E-01
Vazão (4)	76,50	0,00E-01
Rotação (5)	-11,25	3,45E-04
1x3	13,12	6,15E-04
1x5	17,75	7,97E-06
2x3	-16,38	3,06E-05
2x5	25,63	2,06E-09
3x4	42,46	6,80E-21
3x5	-23,50	6,91E-11
4x5	23,31	8,89E-11

Observa-se na Tabela 4.13 que a concentração de goma foi a variável que mais afetou a queda de pressão, seguida pela vazão e pela obstrução, sendo que todas essas variáveis afetaram de forma positiva a queda de pressão, ou seja, seu incremento favoreceu o aumento da queda de pressão. O efeito da rotação e da excentricidade foi contribuir para uma redução da queda de pressão.

Visando verificar a capacidade de previsão da expressão, obtida pela regressão múltipla dos dados de queda de pressão simulados (Tabela 4.13), para as condições experimentais que foram avaliadas no planejamento de experimentos, é apresentada a Tabela 4.14 a seguir. Note que a Tabela 4.14 mostra a comparação para somente 24 experimentos porque os dados experimentais correspodiam a um anular com obstrução de 6 mm, e as simulações foram feitas para vazões de 3 e 9 m³/h, rotações de 0 e 400 rpm e fluidos com 0,1 e 0,5% de GX.

Tabela 4.14 – Comparação da queda de pressão experimental, simulada e predita.

Exp	Concentração de GX (% em peso)	Excentricidade [-]	Vazão (m ³ /h)	Rotação (rpm)	ΔP_{exp} (Pa/m)	SD (Pa/m)	$\Delta P_{\text{simulado}}$ (Pa/m)	$\Delta P_{\text{correlação}}$ (Pa/m)
1	0,1	0	3	0	84,43	7,10	80,96	104,70
3	0,1	0	3	400	70,11	7,47	62,75	31,32
7	0,1	0	9	0	124,10	7,38	125,74	126,15
9	0,1	0	9	400	128,71	7,68	123,67	146,02
10	0,1	0,23	3	0	54,58	7,07	82,48	85,99
12	0,1	0,23	3	400	50,17	7,51	76,14	63,87
16	0,1	0,23	9	0	107,16	8,27	120,01	107,44
18	0,1	0,23	9	400	110,13	8,49	173,96	178,57
19	0,1	0,46	3	0	67,94	9,85	66,58	67,28
21	0,1	0,46	3	400	81,97	9,68	81,04	96,43
25	0,1	0,46	9	0	115,59	8,04	113,74	88,73
27	0,1	0,46	9	400	128,76	8,60	195,36	211,13
55	0,5	0	3	0	460,24	4,26	529,44	528,40
57	0,5	0	3	400	454,97	4,83	355,67	361,00
61	0,5	0	9	0	882,93	5,24	720,62	719,69
63	0,5	0	9	400	870,07	5,77	603,54	645,55
64	0,5	0,23	3	0	436,40	5,59	495,18	476,93
66	0,5	0,23	3	400	416,47	6,00	332,04	360,80
70	0,5	0,23	9	0	752,11	8,60	665,77	668,23
72	0,5	0,23	9	400	746,54	9,01	650,68	645,35
73	0,5	0,46	3	0	328,42	5,97	432,25	425,47
75	0,5	0,46	3	400	319,06	5,85	316,14	360,60
79	0,5	0,46	9	0	734,06	5,57	580,27	616,77
81	0,5	0,46	9	400	727,17	6,03	669,42	645,15

Uma melhor visualização dos dados apresentados na Tabela 4.14 pode ser feita através das Figuras 4.56 (a) e 4.56 (b), para os casos sem rotação e com rotação de 400 rpm, respectivamente. Pode-se notar que os resultados simulados e os obtidos pela equação são mais próximos dos valores experimentais para a solução com 0,1% de GX.

Uma possível explicação para as diferenças encontradas entre os valores experimentais e os simulados ou obtidos pela correlação, pode ser feita baseada nas condições em que foram realizadas as simulações. Todas as simulações foram feitas considerando escoamento completamente desenvolvido, no entanto, experimentalmente não se pode garantir esta condição. Para se ter certeza de um escoamento totalmente desenvolvido deveria-se coletar dados de queda de pressão em diferentes pontos na direção axial. Somente assim seria possível garantir que os pontos de tomada de pressão não estão ainda sendo influenciados pelo comprimento de entrada. Pela Figura 4.56 pode-se afirmar ainda que, certamente, o comprimento de entrada necessário para se obter escoamento completamente desenvolvido

para o fluido com 0,5% de GX (carater não-Newtoniano mais forte) é maior, pois para esta solução foi observada maior diferença entre os dados experimentais e simulados.

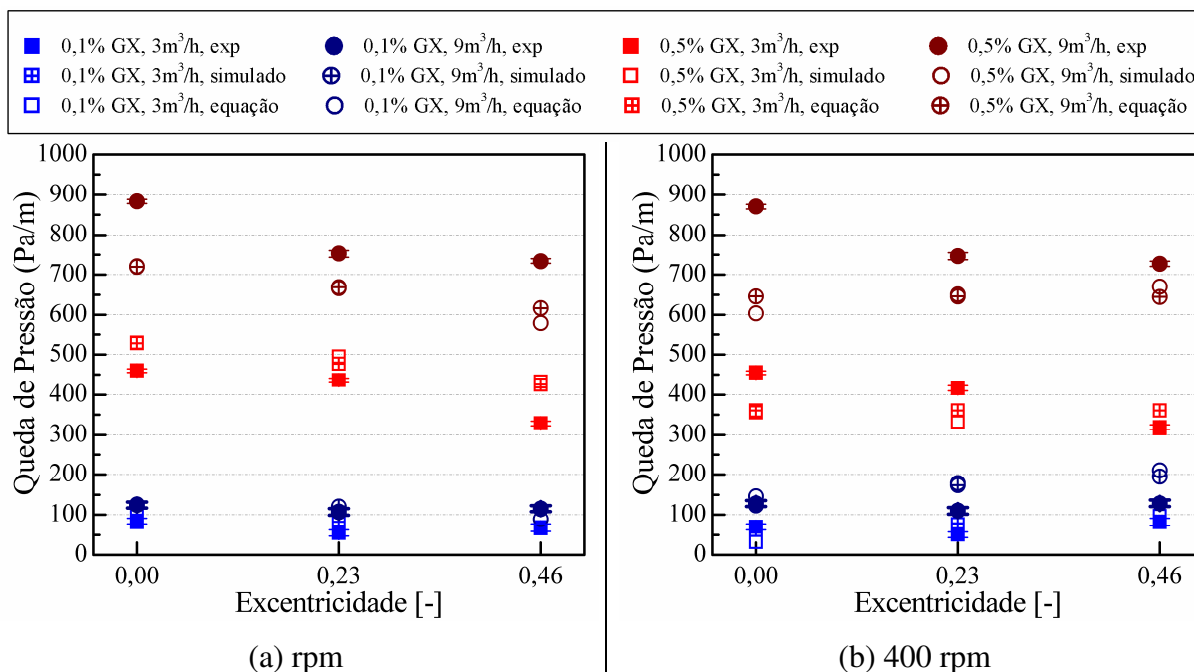


Figura 4.56 – Dados de queda de pressão experimentais, simulados e preditos.

4.3.4 – Linhas de Corrente Simuladas x Trajetórias Experimentais das Partículas

O software FLUENT[®] 14.0 foi utilizado para se obter o campo de velocidades do fluido para a condição experimental de injeção de partícula estudada (anular concêntrico, vazão de 1 m³/h, solução 0,1% de GX, rotação de 183 rpm), o que permitiu estimar as diferentes linhas de corrente a depender da altura no espaço anular, usando a opção *Pathlines*. Esta simulação foi conduzida no anular com 2,445 m de comprimento em condições periódicas na direção axial. Para cada linha de corrente gerada tem-se uma velocidade média característica e um tamanho do helicóide característico.

Neste estudo fez-se a comparação entre os tamanhos dos helicóides experimentais desenvolvidos para cada velocidade axial média da partícula, com linhas de corrente simuladas que levavam a mesmas velocidades axiais desses experimentos. Desta forma, através de uma comparação entre a trajetória da partícula e das linhas de correntes para a condição estudada, era possível se estimar a altura experimental de injeção da partícula.

Fica claro que ao fazer esta comparação, é utilizada a aproximação de que a partícula pode ser considerada como um traçador. Assim, assume-se que a injeção de uma única

partícula não é suficiente para provocar alterações no campo de velocidades do fluido, e ao ser lançada, a partícula segue a linha de corrente correspondente à posição em que entra.

A Figura 4.57 mostra os resultados calculados pelo FLUENT® 14.0 para a velocidade axial média da partícula traçadora a depender da posição radial em y (altura) em que a mesma era lançada no espaço anular. Essa velocidade era calculada utilizando-se a distância axial percorrida pela partícula (2,248 m) dividida pelo tempo gasto no deslocamento (que variava a depender da posição em y).

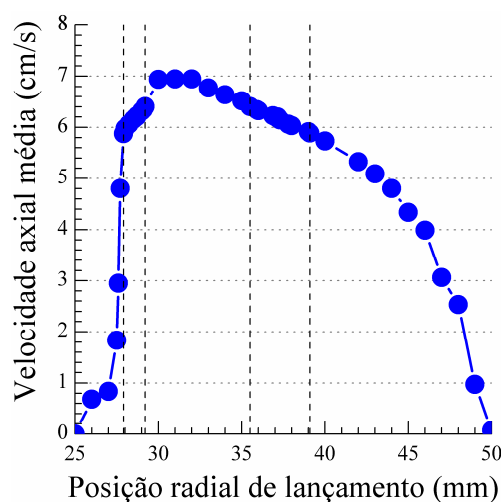


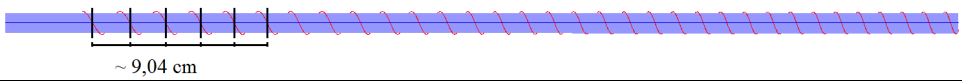
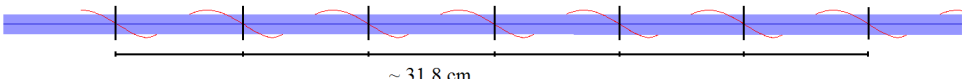
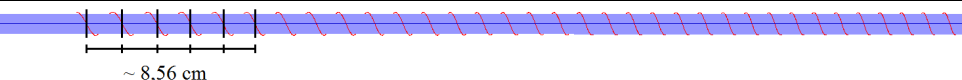
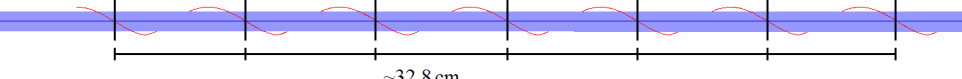
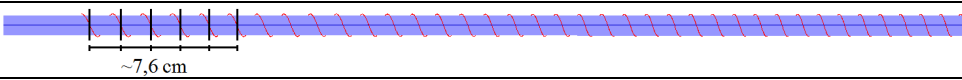
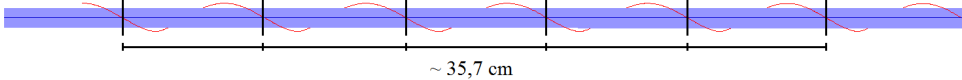
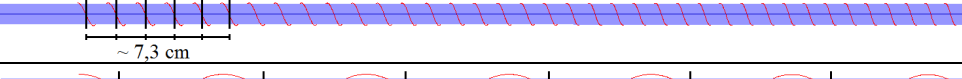
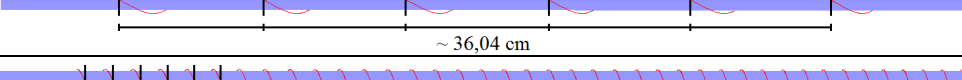
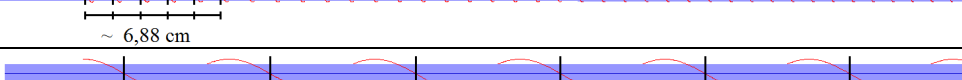
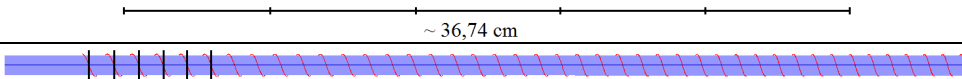
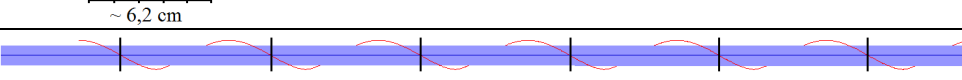
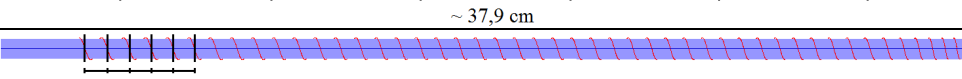
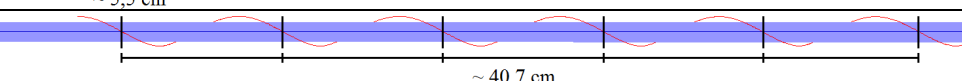
Figura 4.57 – Velocidade axial média em função da posição radial de lançamento.

Os resultados mostrados na Figura 4.57 indicam que se a partícula for lançada próxima às paredes do tubo interno ou externo, a mesma gasta um tempo muito grande para atravessar o anular, o que leva a uma baixa velocidade axial média, ou até mesmo ao aprisionamento da partícula (situação que foi verificada experimentalmente). As linhas pontilhadas na Figura 4.57 indicam as faixas de posições de lançamento da partícula traçadora que levam a velocidades axiais médias iguais aos valores obtidos experimentalmente na injeção de partículas.

Observa-se que existem duas possíveis faixas em que as partículas podem ter sido lançadas: 28mm–29,2mm e 35,5mm–39mm. Assim o conhecimento apenas da velocidade axial média desenvolvida pela partícula não é suficiente para se conhecer a sua posição radial de lançamento. Para isto, a dimensão periódica da linha de corrente será utilizada.

A Tabela 4.15 mostra a comparação entre as dimensões periódicas das linhas de corrente para as duas posições radiais de lançamento que levam as velocidades axiais obtidas experimentalmente.

Tabela 4.15 – Linhas de corrente calculadas em função da velocidade média e posição radial.

V (cm/s)	y (mm)	Linha de corrente ou trajetória da partícula traçadora
6,4	29,2	 ~ 9,04 cm
	35,5	 ~ 31,8 cm
6,35	29,1	 ~ 8,56 cm
	35,9	 ~ 32,8 cm
6,23	28,74	 ~ 7,6 cm
	36,87	 ~ 35,7 cm
6,19	28,7	 ~ 7,3 cm
	37,15	 ~ 36,04 cm
6,15	28,5	 ~ 6,88 cm
	37,3	 ~ 36,74 cm
6,06	28,23	 ~ 6,2 cm
	37,8	 ~ 37,9 cm
5,88	27,9	 ~ 5,5 cm
	39,1	 ~ 40,7 cm

A dimensão média do helicóide gerado numericamente foi estimada tratando a imagem da linha de corrente obtida pelo FLUENT® 14.0 com o software xyExtract 4.1. Observando todos os casos estudados fica claro que a posição radial de lançamento da partícula deve ter sido na faixa de 35,5 mm–39,1 mm. As dimensões do helicóide (ou o seu comprimento de onda) estimadas para cada posição de lançamento segundo o software FLUENT® 14.0 e os resultados experimentais são resumidos na Tabela 4.16 a seguir.

Na Tabela 4.16 fica evidenciada a boa concordância entre os resultados experimentais e os calculados numericamente usando o software FLUENT® 14.0. Um simples tratamento de linhas de corrente pode fornecer informações importantes sobre o escoamento de uma partícula, como a sua velocidade média e sua trajetória no espaço anular.

Tabela 4.16 – Dimensões do helicóide para cada velocidade axial média.

Velocidade média experimental (cm/s)	Dimensão do helicóide experimental (cm)	Posição radial y de lançamento (mm)	Dimensão do helicóide prevista (cm)
6,40	$34,2 \pm 6,97$	35,5	31,8
6,35	$32,7 \pm 3,78$	35,9	32,8
6,23	$33,6 \pm 13,98$	36,87	35,7
6,19	$35,0 \pm 4,32$	37,15	36,04
6,15	$40,2 \pm 3,06$	37,3	36,74
6,06	$38,8 \pm 8,76$	37,8	37,9
5,88	$43,2 \pm 1,98$	39,1	40,7

4.3.5 – Resultados da Simulação para Anulares Reproduzindo um Poço de Perfuração de Petróleo

Os resultados das 25 simulações realizadas de acordo com a aplicação de um planejamento composto central (PCC), considerando a variável tensão limite de escoamento como parâmetro reológico do fluido a se estudar, são mostrados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Resultados do PCC considerando a variável τ_0 .

Simulação	Excentricidade E [-]	Parâmetro reológico τ_0 (Pa)	Vazão Q (m ³ /h)	Rotação ω (rpm)	Queda de pressão ΔP (Pa/m)
1	0,1	3,5	39,6	65,1	578,10
2	0,1	3,5	39,6	334,9	472,55
3	0,1	3,5	109,6	65,1	971,30
4	0,1	3,5	109,6	334,9	902,04
5	0,1	17,5	39,6	65,1	1.158,42
6	0,1	17,5	39,6	334,9	894,26
7	0,1	17,5	109,6	65,1	1.627,15
8	0,1	17,5	109,6	334,9	1.428,90
9	0,5	3,5	39,6	65,1	528,44
10	0,5	3,5	39,6	334,9	484,35
11	0,5	3,5	109,6	65,1	939,97
12	0,5	3,5	109,6	334,9	973,69
13	0,5	17,5	39,6	65,1	1.029,62
14	0,5	17,5	39,6	334,9	890,35
15	0,5	17,5	109,6	65,1	1.538,25
16	0,5	17,5	109,6	334,9	1.479,68
17	0	10,5	74,6	200	1.016,35
18	0,6	10,5	74,6	200	1.002,28
19	0,3	0,12194	74,6	200	635,39
20	0,3	20,8781	74,6	200	1.414,07
21	0,3	10,5	22,71	200	568,23
22	0,3	10,5	126,49	200	1.345,50
23	0,3	10,5	74,6	0	1.086,49
24	0,3	10,5	74,6	400	960,19
25	0,3	10,5	74,6	200	1.033,92

De acordo com a Tabela 4.17, verifica-se que os dados de queda de pressão variaram amplamente (472,55 a 1.627,15 Pa/m). Para o estudo da influência das variáveis estudadas sobre a queda de pressão, foi aplicada uma análise de regressão múltipla utilizando os dados da Tabela 4.17. A Tabela 4.18 apresenta os resultados obtidos para a regressão múltipla dos valores de queda de pressão, contendo apenas as variáveis e interações que influenciaram significativamente essa resposta, considerando um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 4.18 – Resultados da regressão para o PCC usando τ_0 .

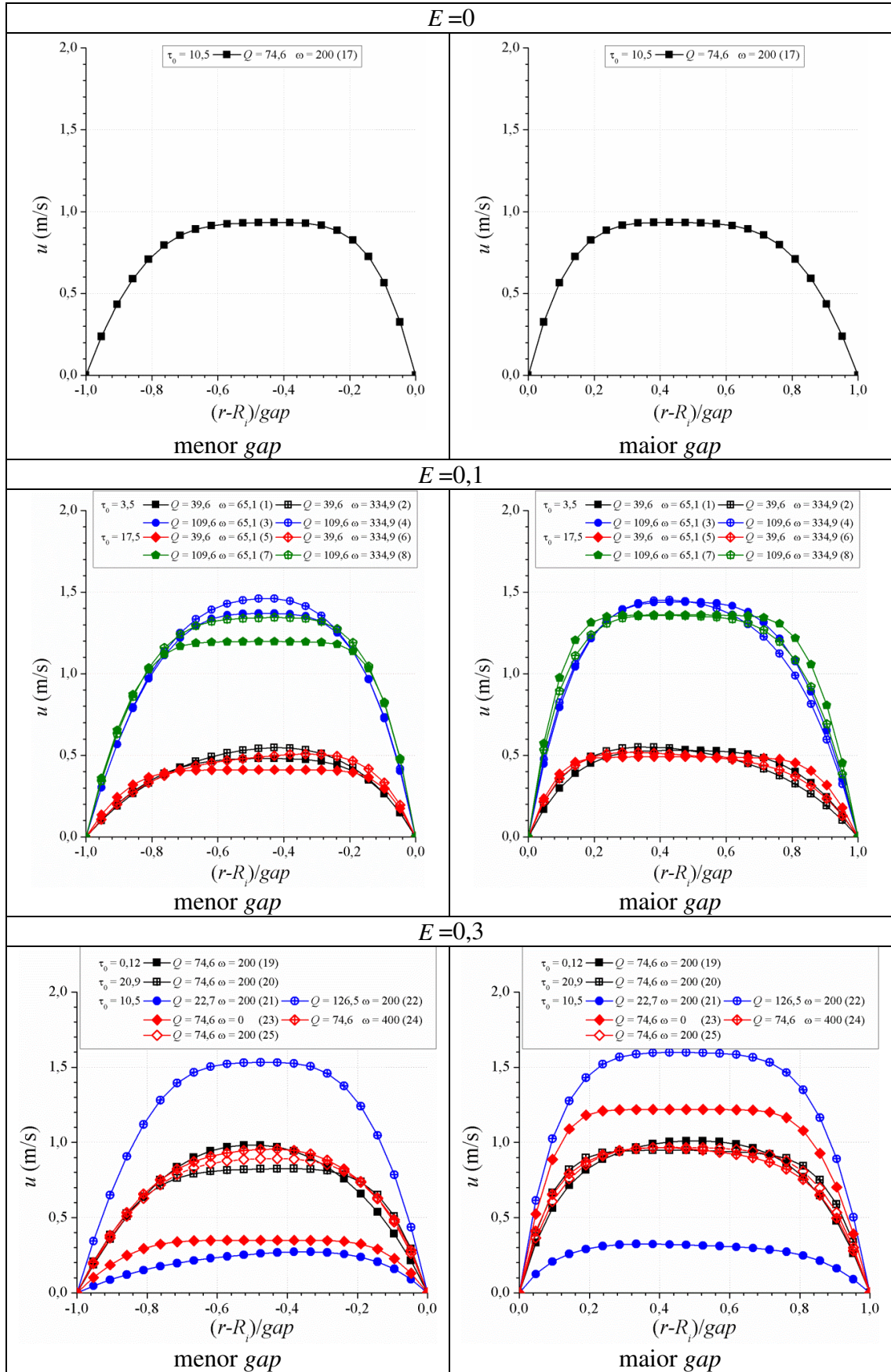
Variável Codificada	Parâmetro	Nível de significância
Constante	1021,843	2,06E-23
E	-9,278	2,84E-02
τ_0	262,337	4,07E-18
Q	244,031	1,04E-17
ω	-50,631	5,26E-09
Q^2	-28,760	2,11E-04
$E.\tau_0$	-10,831	2,43E-02
$E.Q$	10,800	2,46E-02
$E.\omega$	26,813	2,71E-05
$\tau_0.Q$	23,610	9,31E-05
$\tau_0.\omega$	-29,692	9,54E-06
$Q.\omega$	16,295	2,07E-03

Observa-se, na Tabela 4.18, que todas as variáveis estudadas apresentaram uma influência significativa sobre a resposta (possuem nível de significância inferior a 5%). Cabe ressaltar que as variáveis: tensão limite de escoamento do fluido (τ_0) e vazão de fluido (Q) na forma isolada contribuíram positivamente para a queda de pressão, sendo a variável tensão limite de escoamento do fluido (τ_0) a que influenciou mais intensamente sobre a resposta analisada. As variáveis rotação (ω) e excentricidade (E) contribuíram negativamente para a queda de pressão. Observa-se também que existe interação entre as variáveis estudadas.

Com o quadrado do coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,9986, os dados da Tabela 4.18 podem ser dispostos na forma da Equação (4.2), que permite estimar a queda de pressão (ΔP) em função das quatro variáveis estudadas (na forma codificada).

$$\Delta P(Pa/m) = 1021,843 - 9,278 E + 262,337 \tau_0 + 244,031 Q - 50,631 \omega - 28,76 Q^2 - 10,831 E \tau_0 + 10,8 E Q + 26,813 E \omega + 23,61 \tau_0 Q - 29,692 \tau_0 \omega + 16,295 Q \omega \quad (4.2)$$

Buscando-se também verificar como as variáveis estudadas afetariam a limpeza de um poço ou sua fluidodinâmica, são mostradas na Figura 4.58 os perfis de velocidade axial.



continua

continuação

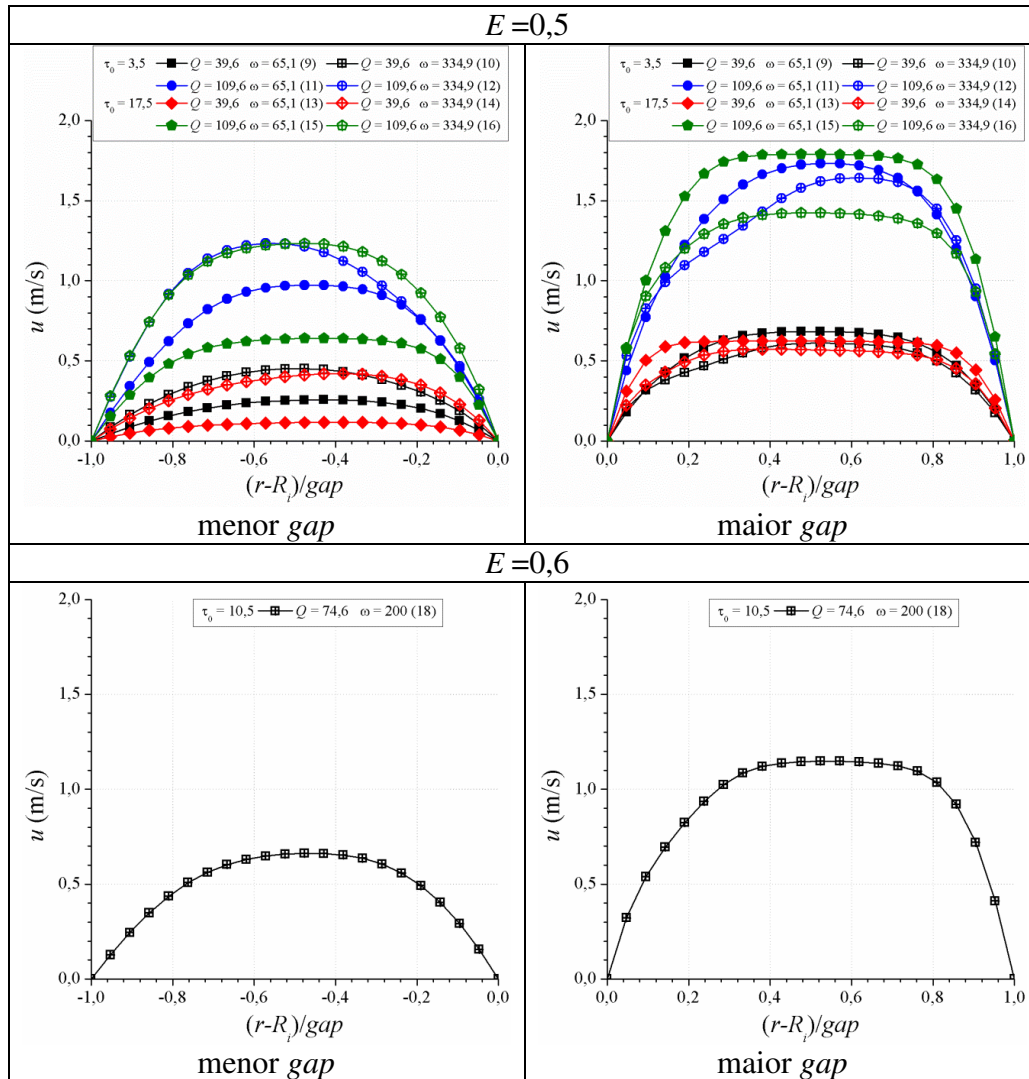


Figura 4.58 – Perfis de velocidade axiais simulados para o PCC usando τ_0 .

Pode-se observar na Figura 4.58 que para o caso concêntrico o perfil de velocidade axial é simétrico, ligeiramente achatado e com velocidades máximas na região central do *gap* porém ligeiramente deslocadas em direção a parede do tubo interno como um efeito da rotação. Para todos os casos maiores velocidades axiais foram obtidas com o uso de maiores vazões volumétricas na entrada. A rotação do tubo interno fez com que as velocidades no lado da seção de menor *gap* aumentassem o que levava a uma distribuição da velocidade axial mais uniforme em toda a seção anular. O perfil de velocidade axial se mostrou mais achatado para os casos em que se trabalhava com um fluido com maior valor da tensão limite de escoamento, porém este efeito só é visível para maiores vazões. Observa-se também que quanto maior a excentricidade do anular mais desigual é o perfil de velocidade se não há rotação do tubo interno, pois são alcançadas baixas velocidades na região de menor *gap*.

Os resultados das 25 simulações realizadas de acordo com a aplicação de um planejamento composto central (PCC), considerando a variável índice de comportamento como parâmetro reológico do fluido a se estudar, são mostrados na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 – Resultados do PCC considerando a variável n .

Simulação	Excentricidade E [-]	Parâmetro reológico n [-]	Vazão Q (m ³ /h)	Rotação ω (rpm)	Queda de pressão ΔP (Pa/m)
1	0,1	0,12142	39,6	65,1	450,8404
2	0,1	0,12142	39,6	334,9	351,8378
3	0,1	0,12142	109,6	65,1	500,8063
4	0,1	0,12142	109,6	334,9	420,5618
5	0,1	0,57142	39,6	65,1	826,8977
6	0,1	0,57142	39,6	334,9	648,100
7	0,1	0,57142	109,6	65,1	1.201,774
8	0,1	0,57142	109,6	334,9	1.069,776
9	0,5	0,12142	39,6	65,1	438,5654
10	0,5	0,12142	39,6	334,9	354,2271
11	0,5	0,12142	109,6	65,1	489,5000
12	0,5	0,12142	109,6	334,9	452,7454
13	0,5	0,57142	39,6	65,1	743,593
14	0,5	0,57142	39,6	334,9	651,4305
15	0,5	0,57142	109,6	65,1	1.159,710
16	0,5	0,57142	109,6	334,9	1.130,054
17	0	0,34642	74,6	200	570,716
18	0,6	0,34642	74,6	200	604,100
19	0,3	0,01284	74,6	200	395,9107
20	0,3	0,6800	74,6	200	1.294,96
21	0,3	0,34642	22,71	200	409,4942
22	0,3	0,34642	126,49	200	680,238
23	0,3	0,34642	74,6	0	674,970
24	0,3	0,34642	74,6	400	522,5713
25	0,3	0,34642	74,6	200	597,711

De acordo com a Tabela 4.19, verifica-se que os dados de queda de pressão variaram amplamente (351,84 a 1.201,77 Pa/m). Para o estudo da influência das variáveis estudadas sobre a queda de pressão, foi aplicada uma análise de regressão múltipla utilizando os dados da Tabela 4.19. A Tabela 4.20 apresenta os resultados obtidos para a regressão múltipla dos valores de queda de pressão, contendo apenas as variáveis e interações que influenciaram significativamente essa resposta, considerando um intervalo de confiança de 95%.

Observa-se, nos resultados da Tabela 4.20, que somente a variável excentricidade não teve uma influência significativa sobre a resposta. Cabe ressaltar que as variáveis: índice de comportamento do fluido (n) e vazão de fluido (Q) na forma isolada contribuíram

positivamente para a queda de pressão, sendo a variável índice de comportamento do fluido (n) a que influiu mais intensamente sobre a resposta analisada. A variável rotação (ω) contribuiu negativamente para a queda de pressão. Observa-se também que existe interação entre as variáveis estudadas.

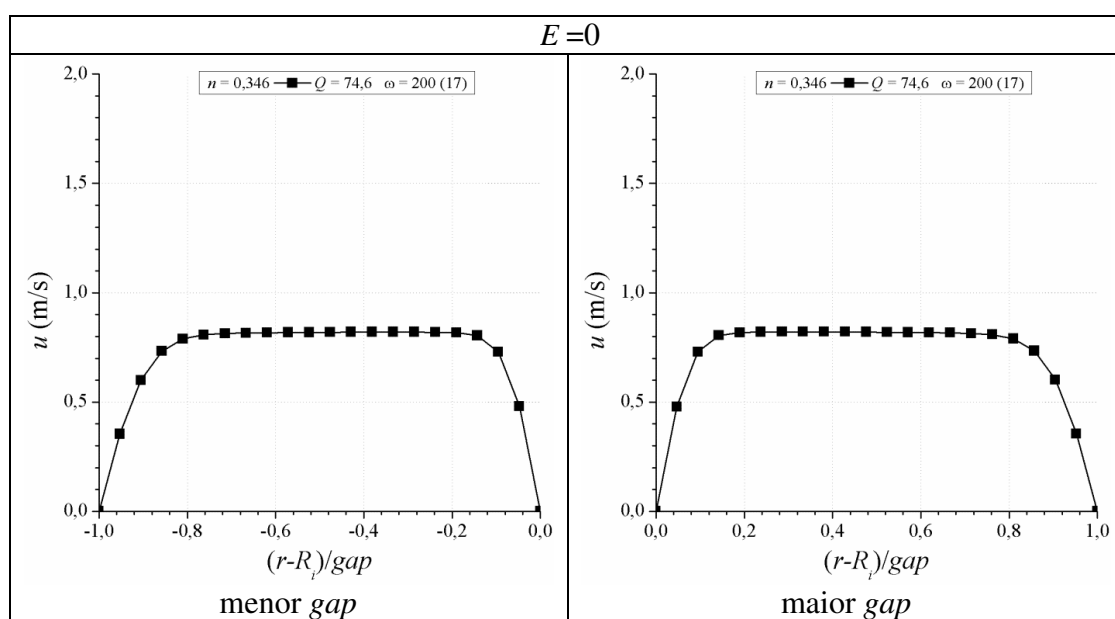
Tabela 4.20 – Resultados da regressão para o PCC usando τ_0 .

Variável Codificada	Parâmetro	Nível de significância
Constante	572,46	2,37E-20
n	260,11	2,33E-17
Q	115,75	5,29E-11
ω	-47,01	3,66E-05
n^2	114,21	5,21E-08
$n.Q$	88,95	2,97E-08

Com o quadrado do coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,9848, os dados da Tabela 4.20 podem ser dispostos na forma da Equação (4.3), que permite estimar a queda de pressão (ΔP) em função das quatro variáveis estudadas (na forma codificada).

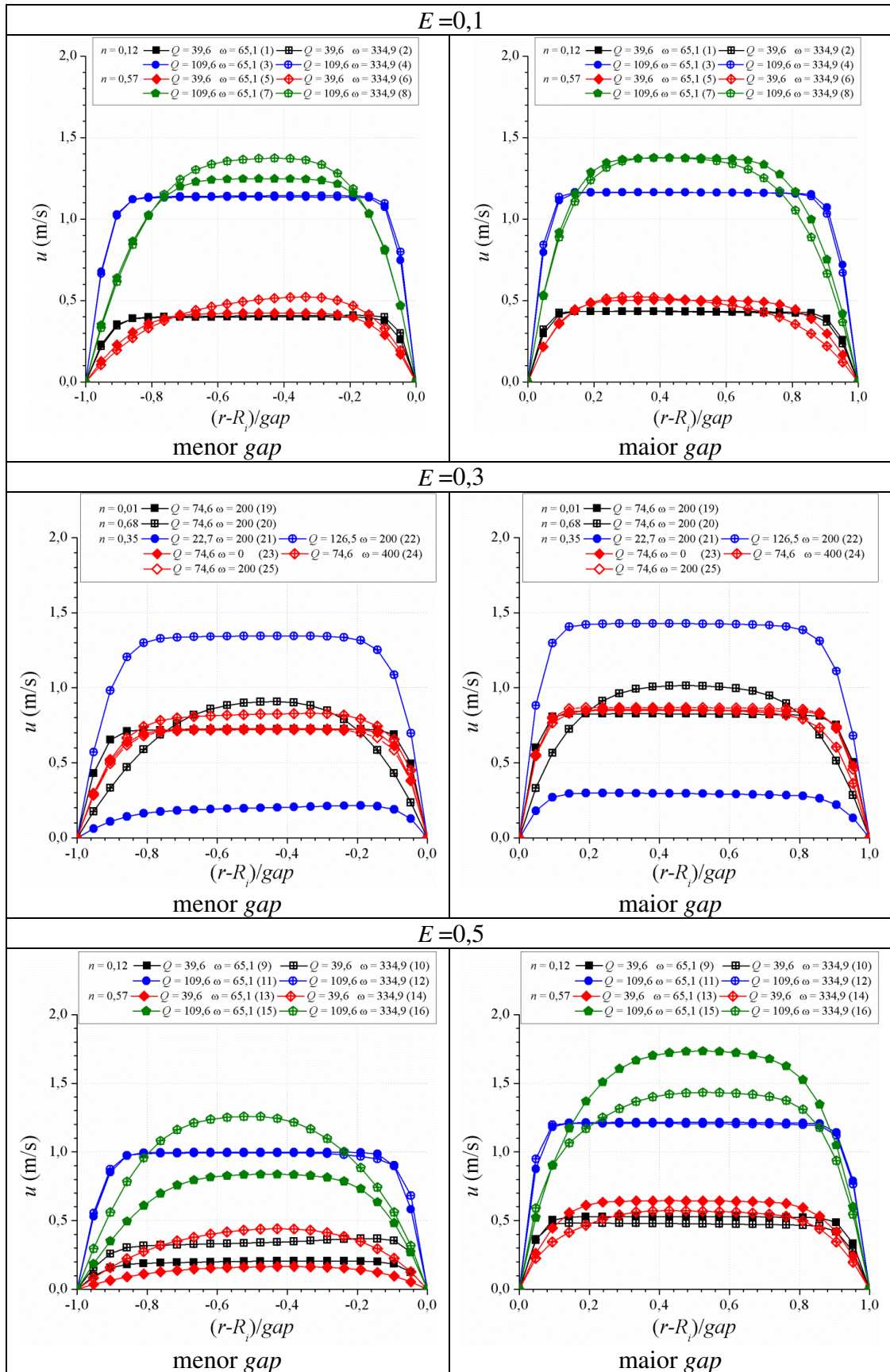
$$\Delta P (Pa/m) = 572,46 + 260,11n + 115,75 Q - 47,01 \omega + 114,21 n^2 + 88,95 n Q \quad (4.3)$$

Buscando-se também verificar como as variáveis estudadas afetariam a limpeza de um poço ou sua fluidodinâmica, são mostradas na Figura 4.59 os perfis de velocidade axial nos anulares estudados.



continua

continuação



continua

continuação

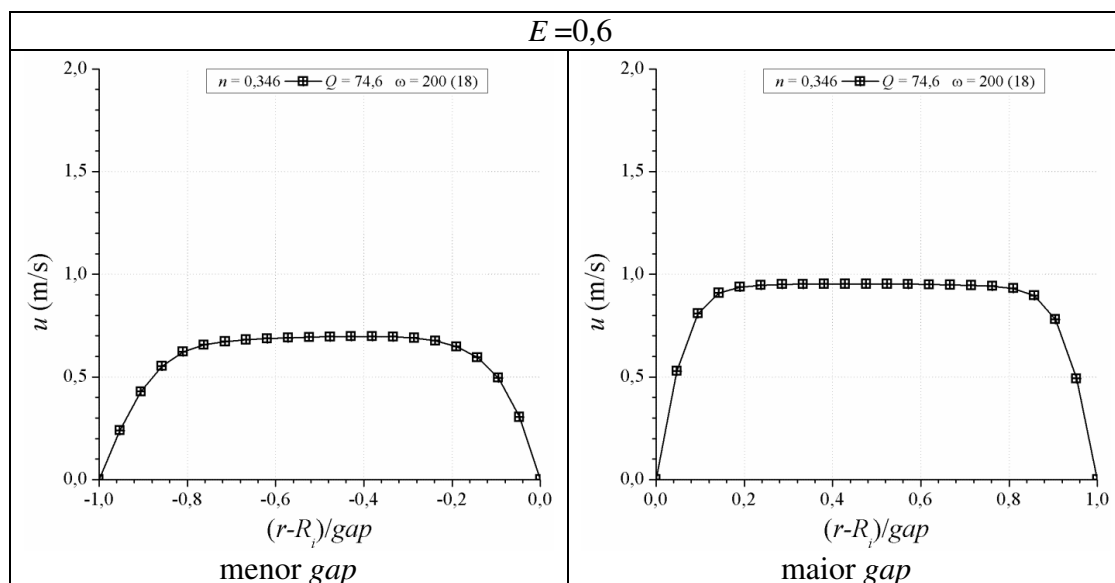


Figura 4.59 – Perfis de velocidade axiais simulados para o PCC usando n .

Podem ser feitas observações na Figura 4.59 similares às que foram feitas na Figura 4.58. Porém neste caso como se trabalhou com fluidos com características que variavam mais entre um fluido mais próximo de Newtoniano e um fluido não-Newtoniano os efeitos das variáveis sobre os perfis foram mais destacados. Podem ser visualizados na Figura 4.59 casos em que o perfil de velocidade é altamente achatado para um fluido fortemente não-Newtoniano (menores valores de n), assim como perfis mais parabólicos devido ao comportamento mais próximo de fluido Newtoniano (maiores valores de n).

CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Foi possível realizar um estudo simultâneo de um arranjo com movimentação excêntrica do cilindro interno e com obstrução parcial do espaço anular para avaliar o efeito da sobreposição destes dois tipos de problemas (excentricidade variável e obstrução parcial do canal anular pela sedimentação de cascalhos que não são completamente removidos) sobre a dinâmica de escoamento dos fluidos de perfuração, permitindo um melhor entendimento dos fenômenos complexos que podem ocorrer na perfuração de poços horizontais e inclinados. Esse trabalho apresentou resultados pioneiros, não sendo ainda encontrado algo a respeito na literatura sobre escoamento helicoidal em anulares parcialmente obstruídos.

Considerando as investigações realizadas experimentalmente e por simulações numéricas (CFD) sobre o escoamento laminar de fluidos não-Newtonianos em regiões anulares, podem se destacar como as principais conclusões obtidas nesta tese:

Um estudo reológico das soluções de GX preparadas e de fluidos de perfuração foi realizado. Estabeleceu-se 24 h como o tempo de hidratação da goma, que foi classificada como agente modificador reológico com características pseudoplásticas, viscoplásticas e não tixotrópico. Um estudo do efeito da temperatura sobre a reologia das soluções poliméricas mostrou que as características pseudoplásticas da GX são conservadas quando esta é exposta a temperaturas entre 20 e 50°C.

Foi determinado de forma gráfica e segundo correlações empíricas da literatura, o regime de escoamento laminar prevalecente na faixa de operação experimental empregada (vazões de 1–9 m³/h) para uma solução com 0,5% de GX escoando em anulares concêntricos e excêntricos ($E=0,23$ e $E=0,46$) parcialmente obstruídos (altura de obstrução de 6 mm) sem o emprego de rotação do eixo interno.

Analizou-se através de um planejamento experimental com 83 ensaios, o efeito de diferentes variáveis geométricas (excentricidade) e operacionais (concentração de GX, vazão e rotação do cilindro interno) sobre a resposta de queda de pressão, no escoamento de fluidos não-Newtonianos em seções anulares parcialmente obstruídas sob efeito de movimentação excêntrica do tubo interno (para os casos excêntricos). Constatou-se que variável que predomina sobre as demais é a concentração de Goma Xantana, seguida da vazão, e finalmente da excentricidade. Dentre todas as variáveis estudadas, a única que não afetou a resposta queda de pressão foi a rotação do eixo interno. Verificou-se que o incremento da concentração polimérica promoveu um aumento na resposta de queda de pressão, assim como

o aumento da vazão, ao passo que, o efeito da excentricidade foi o oposto, provocou uma redução no gradiente de pressão. Observou-se também um forte efeito de interação entre as variáveis estudadas.

Foi constatada uma limitação experimental na obtenção de medidas de queda de pressão em escoamentos utilizando fluidos com baixa concentração de polímero (menor do que 0,1% de GX). Para a solução de fluido com 0,1% de GX, a ordem de grandeza dos desvios padrões associados às medidas experimentais já era bastante considerável em relação ao valor da medida.

A estratégia numérica adotada neste estudo foi verificada através de um conjunto de simulações, que mostraram uma boa concordância com dados reportados na literatura para os campos de velocidade e/ou quedas de pressão em anulares, mostrando que a ferramenta CFD é bastante adequada para se realizar previsões sobre o escoamento laminar de fluidos não-Newtonianos em dutos anulares.

O campo de fluxo nos anulares parcialmente obstruídos foi numericamente simulado usando o software FLUENT® 14.0. Um teste de independência de malha realizado para os anulares gerados de acordo com as reais dimensões da unidade experimental levou a escolha de um refinamento de malha ótimo que foi utilizado para todas as simulações. Simulações preliminares com os anulares de 2,445 m selecionados mostraram que seria inviável realizar a simulação de casos com movimentação excêntrica do cilindro interno devido ao demasiadamente grande tempo de simulação computacional requerido para estas malhas com enormes números de células.

Simulações do escoamento laminar de uma solução de 0,1% GX a uma vazão de 9 m³/h para casos sem rotação do tubo interno realizada em anulares concêntricos e excêntricos com obstrução de 6 mm e 0,5 m de comprimento em condições periódicas, mostraram que era possível obter um perfil de velocidade axial plenamente desenvolvido similar ao obtido na simulação com anulares completos em mesmas condições, além de fornecer quedas de pressão simuladas bem mais próximas do valores experimentais. Portanto, todas as simulações foram conduzidas em seções de 0,5 m periódicas.

Foi possível verificar através de um conjunto de simulações, a influência das variáveis concentração de goma Xantana, vazão, rotação, excentricidade e altura de obstrução sobre os perfis de velocidade e queda de pressão em anulares de 0,5 m sob efeito de movimentação excêntrica do tubo interno (para os casos excêntricos). A rotação excêntrica foi realizada utilizando-se os conceitos de malhas deslizantes e malha móvel (*moving mesh*). Os perfis foram obtidos após o alcance do regime permanente ou após 7 voltas para os casos simulados

em regime transiente, para que já houvesse acontecido a estabilização dos valores de queda de pressão e dos perfis de velocidade.

O incremento da vazão volumétrica de fluido no anular favoreceu a obtenção de maiores velocidades axiais e maiores quedas de pressão.

A excentricidade e a presença da obstrução introduziram uma assimetria nos perfis de velocidade (surgimento de regiões de canalização e outras de estagnação de fluxo axial), que foi potencializada com o incremento dessas variáveis. A presença da obstrução elevou a queda de pressão e a excentricidade teve um efeito contrário.

A rotação do eixo interno contribuiu para aumentar os valores de velocidade axial nas regiões de menor *gap* (abertura), auxiliando na distribuição do fluxo axial na região anular, o que é favorável em processos de escoamento de fluidos de perfuração em poços horizontais e inclinados, já que a estagnação do fluxo provoca o surgimento de regiões de acúmulo de sólidos e aumento da queda de pressão. A introdução da rotação do cilindro interno contribuiu para uma redução da queda de pressão.

As quedas de pressão e as velocidades axiais obtidas nos anulares foram aumentadas com o uso de fluidos com maior concentração de GX. Também se observou que fluidos mais concentrados em GX apresentaram maior assimetria de velocidades. É importante lembrar que uma maior concentração de polímero impede que o cascalho desça novamente ao fundo do poço durante etapas de paradas da perfuração, ficando estes sólidos suspensos na lama.

O levantamento dos perfis de velocidades permitiu um melhor entendimento do campo de escoamento de fluidos não-Newtonianos em anulares parcialmente obstruídos, situação que precisa ser evitada visando o sucesso das operações de limpeza de poços.

A injeção de partículas permitiu uma melhor descrição do comportamento fluidodinâmico do escoamento helicoidal estudado (anular concêntrico, vazão de 1 m³/h, solução 0,1% de GX, rotação de 183 rpm). Através da trajetória da partícula foram estimadas a sua velocidade média e a dimensão periódica do helicoide correspondente ao caminho percorrido pela mesma no anular. O uso da simulação para obtenção das linhas de corrente permitiu estimar a posição radial de lançamento da partícula experimental que se situou na faixa de 35,5 mm–39,1 mm. Novamente, foi evidenciada a boa concordância entre os resultados experimentais e os calculados numericamente usando o software FLUENT® 14.0.

Por fim, os resultados obtidos no estudo de simulação reproduzindo poços de perfuração de petróleo, mostraram que os efeitos das variáveis independentes estudadas sobre a queda de pressão e os perfis de velocidade, foram similares aos obtidos experimentalmente usando

fluidos que buscavam representar o comportamento dos fluidos de perfuração, indicando que os experimentos representavam bem o fenômeno real estudado.

Algumas sugestões para estudos futuros são:

- a) Investigar o efeito de outras variáveis geométricas do sistema com obstrução parcial, como por exemplo, o efeito da razão de diâmetros;
- b) Utilizar controle de temperatura na unidade experimental para manter as propriedades reológicas dos fluidos constantes;
- c) Utilizar faixas de escoamento mais amplas para se trabalhar também no regime turbulento. Simular escoamentos turbulentos via CFD com fluidos não-Newtonianos utilizando técnicas numéricas mais complexas, como por exemplo: Simulações de Grandes Escalas (LES) e Simulações Numéricas Diretas (DNS).
- d) Avaliar o efeito da obstrução parcial sobre as transições de regimes.
- e) Incorporar o efeito da inclinação ao sistema anular, visando aplicação aos casos de poços inclinados que tem um restrito número de publicações sobre esta configuração.
- f) Realizar a simulação multifásica, empregando o Modelo de Fase Discreta para baixas concentrações de sólidos ou o Modelo Euler-Euler para misturas mais concentradas. No primeiro caso, seria interessante prever a trajetória de escoamento das partículas em função das propriedades físicas do fluido, como faixa de viscosidade e diferentes densidades. No segundo caso, poderia ser verificado o padrão de sedimentação das partículas e formação do leito de cascalhos, e a investigação dos efeitos de escoamento (reologia, vazão, rotação do eixo interno) sobre a movimentação desse leito de sólidos em função de sua forma, densidade e tamanho.
- g) Trocar a placa de obstrução parcial plana e lisa por um leito de cascalhos, onde na modelagem entraria outras variáveis tais como a compactação do leito e as características geométricas dos cascalhos. A experimentação desse tipo de condição de contorno estabeleceria outros desafios ao problema. A realização da simulação via CFD com um leito móvel seria um problema bastante interessante, onde se poderia, por exemplo, avaliar um mapa identificando do percentual de área que seria carregado pelo escoamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEGRIA, L.M.C., ADMILSON, T.F., MORALES, R.E.M., MARTINS, A.L., WALDMANN, A.T.A, Escoamento Laminar de Fluido Viscoplastico em Dutos e Anulares Elípticos, ENAHPE 2011 – IV Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo e Gás, Foz do Iguaçu - PR, 8 a 11 de agosto de 2011.
- ALEXANDRE, B.B., Escoamento de Fluido não Newtoniano em Espaço Anular com Excentricidade Variável, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro (dissertação de mestrado) 107 p., 2009.
- ALMEIDA, R.D.F., SILVA, W.G.A.L., Avaliação de Fluidos de Perfuração de Base Aquosa Contendo Poliglicóis Modificados, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ (projeto de graduação) 62p., 2010.
- ALVES, J.V.B., Hidrociclone para a Separação do Óleo Residual de Água em Refinarias, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro – RJ (dissertação de mestrado) 90p., 2012.
- AMANULLAH, M.; YU, L. Environment Friendly Fluid Loss Additives to Protect the Marine Environment from the Detrimental Effect of Mud Additives, Journal of Petroleum Science and Engineering 48 (2005) 199–208.
- AMORIM, L.V., Teoria das Argilas, Notas de aulas, Especialização em Fluidos de Perfuração, 2007.
- ANP (Agência Nacional do Petróleo) – Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2013. Disponível em: <http://www.cogen.com.br/paper/2013/Anuario_Estatistico_Brasileiro_Petroleo_Gas_Biocombustiveis_ANP_2013.pdf>. Acesso em: 20 de Abril de 2014.
- ARIARATNAM, S.T., HARBIN, B.C., STAUBER, R.L., Modeling of Annular Fluid Pressures in Horizontal Boring, Tunnelling and Underground Space Technology 22 (2007) 610–619.
- ARAÚJO, T.A., FARIA, S., FRANÇA, F.P., CARDOSO, V.L., Avaliação do Comportamento Reológico dos Diferentes Meios de Produção de Goma Xantana a partir do Caldo de Cana. VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, Campinas – SP, 2005.

- ASTARITA G., MARUCCI, G., Principles of Non-Newtonian Fluid Mechanics, McGraw-Hill, London, 1974.
- BALTAR, C.A.M., LUZ, A.B., Insumos Minerais para Perfuração de Poços de Petróleo, Cap. 1– A Função dos Minerais Industriais Componentes da Lama de Perfuração de Poços, p. 12–19, Rio de Janeiro: CETEM (Centro de Tecnologia Mineral), 2003.
- BARIOD, Baroid Fluids Handbook and Product Data Sheets. Baroid IDP, Houston, TX, 2001.
- BARRA, G., Apostila de Processos 4, EMC 5744, Parte 1: Fundamentos de Reologia de Materiais Poliméricos.
- BARTH, T.J. AND JESPERSEN, D., The Design and Application of Upwind Schemes on Unstructured Meshes, Technical Report AIAA-89-0366, AIAA 27th Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada, 1989.
- BIRD, R.B.; FREDRICKSON, A.G., Non-Newtonian Flow in Annuli. *Industrial and Engineering Chemistry* 50 (3) (1958) 347–352.
- BIRD, R.B., STEWART, W.E., LIGHTFOOT, E.N., Fenômenos de Transporte. 2ª edição, Editora Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- BITTLESTON, S.H., HASSAGER, O., Flow of viscoplastic fluids in a rotating concentric annulus, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 42 (1992) 19–36.
- BOGEY, C., BAILLY, C., JUVÉ, D., Noise Investigation of a High Subsonic, Moderate Reynolds Number Jet Using a Compressible Large Eddy Simulation, *Theoret. Comput. Fluid Dynamics* 16 (2003) 273–297.
- BOURGOYNE Jr., A.T., MILHEIM, K., CHENEVERT, M.E., Applied Drilling Engineering; SPE Richardson, 1991.
- BOX, G.E. e WILSON, K.B. On the experimental attainment of optimum conditions. *J. Roy. Statist. Soc. B* 13, 1, 1951.
- BOX, M.J., HUNTER, W.G., HUNTER, J.S., Statistics for experimenters: An Introduction to design, data analysis, and model building. John Wiley and Sons, New York, 1978.
- BRAGA, E.R., Estudo do Escoamento de Fluidos de Perfuração em Dutos e em Regiões Anulares, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Tecnologia, Seropédica – RJ, (dissertação de mestrado) 99 p., 2009.
- BRONDANI, W.M., Simulação Numérica do Escoamento de um Fluido Viscoelástico através de um Tubo Anular Concêntrico, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Mecânica, Engenharia Industrial Mecânica, Curitiba – PR (projeto final de curso) 125p., 2007.

- CAENN, R., CHILLINGAR, G.V., Drilling Fluids: State of the Art, Journal of Petroleum Science and Engineering 14 (1996) 221–230.
- CELNIK, J., Deslocamento de Líquidos em Espaços Anulares, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro (dissertação de mestrado) 71 p., 2008.
- CHHABRA, R.P. e RICHARDSON, J.F., Non-Newtonian Flow and Applied Rheology, Engineering Applications, Second Edition, 2008.
- DARLEY, H.C., GRAY, G.R., Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids, Fifth Edition, 634p., Gulf Publishing Company, Houston-USA, 1988.
- DODGE, D.W.; METZNER, A.B., Turbulent flow of non-Newtonian systems, AIChE Journal, 5(2) (1959) 189 – 204.
- DUTRA, E.S.S., Deslocamento de Líquidos não Newtonianos em Tubos Anulares Excêntricos, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro (dissertação de mestrado) 104 p., 2005.
- ESCUDIER, M.P., GOULDSON, I.W. Concentric annular flow with centerbody rotation of a Newtonian and a shear-thinning liquid, Int. J. Heat Fluid Flow 16 (1995) 156–162.
- ESCUDIER, M.P., GOULDSON, I.W., OLIVEIRA, P.J., PINHO, F.T., Effects of inner cylinder rotation on laminar flow of a Newtonian fluid through an eccentric annulus. *Int. J. Heat Fluid Flow* 21 (2000) 92–103.
- ESCUDIER, M.P., OLIVEIRA, P.J., PINHO, F.T., Fully developed laminar flow of purely viscous non-Newtonian liquids through annuli, including the effects of eccentricity and inner-cylinder rotation. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 23 (2002a) 52–73.
- ESCUDIER, M.P., OLIVEIRA, P.J., PINHO, F.T., SMITH, S., Fully developed laminar flow of non-Newtonian liquids through annuli: comparison of numerical calculations with experiments, *Experiments in Fluids* 33 (2002b) 101–111.
- FERZIGER, J.H. and PERIC, M., Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer-Verlag, Heidelberg, 1996.
- FLUENT INC., Fluent 14.0 User's Guide, Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, November 2011.
- FONTES, C.E., SILVA, L.F.L.R., LAGE, P.L.C., RODRIGUES, R.C., Introdução à Fluidodinâmica computacional. Rio de Janeiro: Escola Piloto Virtual, UFRJ/COPPE/PEQ, 2005.

- FORDHAM, E.J., BITTLESTON, S.H., TEHRANI, M.A., Viscoplastic Flow in Centered Annuli, Pipes and Slots, Ind. Eng. Chem. Res. 30 (1991) 517–524.
- FORTUNA, O., Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos – Conceitos Básicos e Aplicações, Edusp, 2000.
- FOUNARGIOTAKIS, K., KELESSIDIS, V.C., MAGLIONE, R., Laminar, Transitional and Turbulent Flow of Herschel–Bulkley Fluids in Concentric Annulus, Can. J. Chem. Eng. 86 (2008) 676–683.
- FOX, R.W., MCDONALD, A.T., PRITCHARD, P.J., Introduction to Fluid Mechanics, Six Edition, John Wiley & Sons Inc, 789 p., 2004.
- G1 Economia, Brasil será um dos maiores produtores de petróleo do mundo. Acesso em 19/04/14 às 17:16 no site <<http://g1.globo.com/economia/noticia/2013/11/brasil-sera-um-dos-maiores-produtores-de-petroleo-do-mundo.html>>.
- GARIM, M.M. Coeficiente de transferência de massa de um corpo submerso para um leito vibro-fluidizado. Dissertação de mestrado, São Carlos, PPG/EQ/UFSCar, 1994. 131p.
- GOMES, F.C., Modelo Assintótico do Deslocamento de Líquidos em Anulares com Excentricidade Variável, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro (dissertação de mestrado) 54 p., 2009.
- GUCUYENER, I.H.; MEHMETOGLU, T. Characterization of Flow Regime in Concentric Annuli and Pipes for Yield-pseudoplastic Fluids, Journal of Petroleum Science and Engineering 16 (1996) 45–60.
- GUILLOT, D., Rheology of Well Cementing Slurries, in NELSON, E.B., Ed., “Well Cementing,” Schlumberger Educational Services, Houston (1990) 01–37.
- HACISLAMOGLU, M. e LANGLINAIS, J., Non-Newtonian Flow in Eccentric Annuli, J. Energy Res. Tech. 112 (1990) 163–169.
- HACISLAMOGLU, M. e CARTALOS, U., Practical pressure loss predictions in realistic annular geometries, SPE 28304. SPE 1994 Annual Technical Conf. and Exhibit, New Orleans, LA, Sep. 25–28.
- HAJIDAVALLOO, E., SADEGHI-BEHBAHANI-ZADEH, M., SHEKARI, Y., Simulation of gas–solid two-phase flow in the annulus of drilling well, Chemical Engineering Research and Design 91 (2013) 477–484.
- HANKS, R.W., The Laminar-turbulent Transition for Fluids with a Yield Stress, AIChE J.9 (1963) 306–309.

- HARGREAVES, J.H. e SILVESTER, R.S., Computational fluid dynamics applied to the analysis of deoiling hydrocyclone performance, Trans. IChemE. 68 (1990) 365–383.
- HEDSTROM, B.O.A., Flow of Plastic Materials in Pipes, Ind. Eng. Chem. 44 (1952) 651–656.
- HERMANY, L., Aproximações Estabilizadas de Escoamento de Fluidos Viscopoplásticos através de uma Expansão seguida de uma Contração Axissimétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (dissertação de mestrado) 71p., 2012.
- JÚNIOR, U.S., Avaliação por Simulação Computacional da Circulação Reversa na Perfuração de Poços de Petróleo, Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro (dissertação de mestrado) 159p., 2005.
- KELESSIDIS, V.C., DALAMARINIS, P., MAGLIONE, R., Experimental study and predictions of pressure losses of fluids modeled as Herschel–Bulkley in concentric and eccentric annuli in laminar, transitional and turbulent flows, J. Pet. Sci. Eng. 77 (2011) 305–312.
- KELESSIDIS, V.C., MAGLIONE, R., TSAMANTAKI, C., ASPIRTAKIS Y., Optimal Determination of Rheological Parameters for Herschel-Bulkley Drilling Fluids and Impact on Pressure Drop, Velocity Profiles and Penetration Rates during Drilling, J. Petrol. Sci. Eng. 53 (2006) 203–224.
- LEONARD, B.P. and MOKHTARI, S. ULTRA-SHARP Nonoscillatory Convection Schemes for High-Speed Steady Multidimensional Flow, NASA TM 1-2568 (ICOMP-90-12), NASA Lewis Research Center, 1990.
- LIMA, R.C., Simulação de Grandes Escalas de Escoamentos Incompressíveis com Transferência de Calor e Massa por um Método de Elementos Finitos de Subdomínio, Universidade Estadual Paulista, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica –UNESP, Ilha Solteira (dissertação de mestrado) 161p., 2005.
- LOMAX, H., PULLIAM, T.H., ZINGG, D.W., Fundamentals of Computacional Fluid Dynamics, Springer, New York, 2001.
- LOPES, L.F., Influência da Argila na Invasão de Fluidos de Perfuração em Reservatórios de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Programa de Pós Graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo, Campinas – SP (dissertação de mestrado) 98p., 2012.
- LOUREIRO, B.V., Escoamento Secundário em um Anular Parcialmente Obstruído com Rotação do Cilindro Interno, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC,

- Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro (tese de doutorado) 181 p., 2004.
- LYRA, P.R.M., CARVALHO, D.K.E., A Computational Methodology for Automatic Two-Dimensional Anisotropic Mesh Generation and Adaptation, J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng. XXVIII (4) (2006) 399–412.
- MACHADO, J.C.V., Reologia e Escoamento de Fluidos: Ênfase na Indústria do Petróleo. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2002.
- MACHADO, J.C.V., OLIVEIRA, M.M., Concentração Ótima de Cloreto de Potássio para Reduzir a Capacidade de Hidratação de Formações Argilosas. Publicação interna, Petrobrás, 1986.
- MAGLIONE, R. New Method Determines Flow Regime and Pressure Losses During Drilling and Cementing, Oil & Gas Journal 93(36) (1995) 94–101.
- MALISKA, C.R., Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional: Fundamentos, Coordenadas Generalizadas, LTC Editora, 1995.
- MAO, Z., YANG C., KELESSIDIS, V.C., Modeling and Numerical Simulation of Yield Viscoplastic Fluid Flow in Concentric and Eccentric Annuli, Chinese Journal of Chemical Engineering 20 (1) (2012) 191–202.
- MATTIUSE, E.M., Escoamento Laminar de Fluidos Newtonianos Generalizados em Tubos de Seção Transversal Elíptica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais–PPGEM, Curitiba (dissertação de mestrado) 133p., 2007.
- MATUTTI, O.C., Instabilidade de Taylor-Couette em Escoamentos de Fluidos Viscoplasticos, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro (dissertação de mestrado) 68 p., 2002.
- MELO, K.C., Avaliação e Modelagem Reológica de Fluidos de Perfuração Base Água, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Natal – RN (dissertação de mestrado) 100p., 2008.
- METZNER, A.B. e REED, J.C., Flow of Non-Newtonian Fluids – Correlation of Laminar, Transition and Turbulent Flow Regions. AIChE J. 1(1955) 434–440.
- MEURIC, O.F.J., WAKEMAN, R.J., CHIU, T.W., FISHER, K.A., Numerical Flow Simulation of Viscoplastic Fluids in Annuli, Can. J. Chem. Eng. 76 (1998) 27–40.

- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço energético nacional 2014. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>>. Acesso em: 25 de Janeiro de 2014.
- MISHRA, P. e TRIPATHI, G., Transition from Laminar to Turbulent Flow of Purely Viscous Non-Newtonian Fluids in Tubes, Chem. Eng. Sci. 26 (1971) 915–921.
- MOHANTY, A.K., ASTHANA, S.B.L., Laminar Flow in the Entrance Region of a Smooth Pipe, Journal of Fluid Mechanics 90 (1978) 433–447.
- MYERS, R.H. Response surface methodology, Ann Arbor, Mich.: Edwards Brothers (Distributors), Virginia, 1976.
- NETO, J.L.V., Estudo Experimental e de Simulação por CFD de Escoamentos em Seções Anulares, Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química –PPGEQ/UFU, Uberlândia – MG (dissertação de mestrado) 144p., 2011.
- NGUYEN T., MISKA, S., YU, M., TAKACH, N., AHMED, R., SAASEN, A., OMLAND, T.H., MAXEY, J., Experimental study of dynamic barite sag in oil-based drilling fluids using a modified rotational viscometer and a flow loop, Journal of Petroleum Science and Engineering 78 (2011) 160–165.
- Norma API-Recommended Practice 13D – Rheology and Hydraulics of oil-well drilling fluids. 6ª ed, 2009.
- NOUAR, C., DESAUBRY, C., ZENAIDI, H., Numerical and experimental investigation of thermal convection for a thermodependent Herschel-Bulkley fluid in an annular duct with rotating inner cylinder, Eur. J. Mech. B/Fluids 17 (6) (1998) 875–900.
- NOURI, J.M., WHITELAW, J.H., Flow of Newtonian and non-Newtonian fluids in an eccentric annulus with rotation of the inner cylinder, Int. J. Heat Fluid Flow 18 (1997) 236–246.
- NOURI, J.M., WHITELAW, J.H., Flow of Newtonian and Non-Newtonian Fluids in a Concentric Annulus with Rotation of the Inner Cylinder, Journal of Fluids Engineering 116 (1994) 821–827.
- OLIVEIRA, G.M., FRANCO, A.T., NEGRÃO, C.O.R., MARTINS, A.L., SILVA, R.A., Modeling and Validation of Pressure Propagation in Drilling Fluids Pumped into a Closed Well, Journal of Petroleum Science and Engineering 103 (2013) 61–71.
- OLIVEIRA, G.M., NEGRÃO, C.O.R., FRANCO, A.T., SILVA, R.A., MARTINS, A.L., Mathematical model for pressure transmission in drilling fluids. In: Proceedings of the 2012 AADE National Technical Conference and Exhibition, April 10–11, 2012. Houston.

- PATANKAR, S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Ed. Hemisphere Pub. Co., NY, 1980.
- PATANKAR, S.V. e SPALDING, D.B., A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 15, p.1789, 1972.
- PEREIRA, F.A.R., Escoamento Laminar de Líquidos Não-Newtonianos em Seções Anulares: Estudos de CFD e Abordagem Experimental, Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química –PPGEQ/UFU, Uberlândia – MG (tese de doutorado) 229 p., 2006.
- PEREIRA, F.A.R., BARROZO, M.A.S., ATAÍDE, C.H., CFD predictions of drilling fluids velocity and pressure profiles in laminar helical flow, Braz. J. Chem. Eng. 24 (04) (2007) 587–595.
- PETERS, G.W.M., SCHOONEN, J.F.M., BAAIJENS, F.P.T., MEIJER, H.E.H., On the Performance of Enhanced Constitutive Models for Polymer Melts in a Cross-Slot Flow. J. Non-Newtonian Fluid Mech. 82 (1999) 387–427.
- PINTO, J.C., e LAGE, P.L.C., Métodos Numéricos em Problemas de Engenharia Química, Série Escola Piloto em Engenharia Química - COPPE/UFRJ, Editora E-Papers, Rio de Janeiro, 2001.
- RABINOWITCH, B., On the Viscosity and Elasticity of Sols, Z. Physik. Chem. 1 (1929) 1–26.
- REYNOLDS, O., On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion, Philos. Trans. R. Soc., London, p.123–161, 1884.
- RYAN, N.W. e JOHNSON, M.M., Transistion from Laminar to Turbulent Flow in Pipes, AIChE J. 5 (1959) 433–435.
- ROCHA, L.A.S., *et al.* Perfuração Direcional, 2^a ed., Rio de Janeiro, Editora Interciência: Petrobras, 323 p. ISBN 9788571931862, 2008.
- SAIDLER, L.A., LOUREIRO, B.V., Avaliação da Técnica de Ultrassom para Determinação da Velocidade de Sedimentação de Partículas, V Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo e Gás – ENAHPE 2013.
- SEED, Um Programa Schlumberger de Desenvolvimento Comunitário sem Fins Lucrativos. Disponível em:< <http://www.seed.slb.com> >. Acesso em: 6 de março de 2007.
- SILVA, M.G.P., Avaliação de Equações Pertinentes aos Projetos Hidráulicos com Fluidos de Perfuração, Pastas de Cimento e Fluidos de Completação no Escoamento Tubular e

- Anular, Relatório Técnico Interno n° 675 – 12009, Vol.1, CENPES/PETROBRAS, 1989.
- SILVEIRA NETO, A., Fundamentos da Turbulência nos Fluidos. In: Coleção Cadernos de Turbulência. Associação Brasileira de Ciências Mecânicas – ABCM. Rio de Janeiro. Vol. 1, Cap. 1 (2002) 1–48.
- SLATTER, P.T., The Laminar/turbulent Transition: An Industrial Problem Solved, British Hydromechanics Research Group, 13th International Conference on Slurry Handling and Pipeline Transport, Hydrotransport 13 (1996) 97–113.
- TANNER, R.I., Engineering Rheology, Oxford University Press, 2ª edição, New York, 2002.
- THOMAS, J.E., Fundamentos de Engenharia de Petróleo, 2. ed., Rio de Janeiro, Editora Interciência, 271p., 2001.
- TONNESEN, D.A., LUZ, A.B., BERTOLINO, L.C. – Caracterização e Beneficiamento das Bentonitas dos Novos Depósitos de Cubati e Pedra Lavrada – PB, Série Anais da XVIII Jornada de Iniciação Científica – 2010.
- TORRES, F., Palestra intitulada Perfuração e Completação de Poços, V Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo e Gás –ENAHPE, 2013.
- TRIGGIA, A.A; *et al*, Fundamentos de engenharia de petróleo. Rio de Janeiro, Editora Interciência:Petrobras,2001.
- UNER, D., OZGEN, C., TOSUN, I., An Approximate Solution for Non-Newtonian Flow in Eccentric Annuli, Ind. Eng. Chem. Res. 27 (1988) 698–701.
- VANDOORMAAL, J.P. e RATHBY, G.D. Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows, Numerical Heat Transfer, Vol. 7, p. 147–163, 1984.
- VERSTEEG, H.K., MALALASEKERA, W., An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method, Longman, London, 1995.
- VIEIRA, L. G. M., Otimização dos Processos de Separação em Hidrociclones Filtrantes, PPGEQ/UFU, Uberlândia – MG (tese de doutorado), 297p, 2006.
- VIEIRA NETO, J.L., MARTINS, A.L., ATAÍDE, C.H., BARROZO, M.A.S., Non-Newtonian Flows in Annuli with Variable Eccentric Motion of the Inner Tube, Chem. Eng. Technol. 35 (11) (2012) 1981–1988.
- VIEIRA NETO, J.L., MARTINS, A.L., ATAÍDE, C.H., BARROZO, M.A.S., The Effect of the Inner Cylinder Rotation on the Fluid Dynamics of Non-Newtonian Fluids in Concentric and Eccentric Annuli, Braz. J. Chem. Eng. 31 (04) (2014) 829–838.

WALKER, G., Non-newtonian flow (Food structure and component class notes), Obtido em 17 de Outubro de 2002, University of Teesside, Middlesbrough, England, School of Science & Tech.

WHITE, F.M., Mecânica dos Fluidos. McGraw-Hill, 2002.