

## 5 Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações realizadas para prever o escoamento em um hidrociclone com diferentes modelos de turbulência. Os resultados obtidos são comparados com os dados medidos por Marins (2007) para o mesmo hidrociclone.

A vazão utilizada na simulação também foi fonte de investigação, por ter sido reportado no trabalho experimental (Marins, 2007) uma incerteza em sua medição estimada entre 6,1 e 6,9 m<sup>3</sup>/h.

Investigou-se, ainda, a influência da rugosidade e razão de aspecto no desempenho do hidrociclone.

Visando comparar os resultados numéricos com as medidas experimentais de Marins (2007), especificou-se, como fluido de trabalho, água a temperatura ambiente. Como os experimentos foram realizados sem registro ou controle da temperatura, foram utilizadas as propriedades da água pura a 25° C: massa específica,  $\rho = 97,08 \text{ kg/m}^3$  e viscosidade molecular,  $\mu = 0,917 \text{ cP}$  (Perry, 1999).

Na literatura foram encontrados dois tipos de condição de contorno para as saídas: uma primeira onde se especifica as pressões no rejeito e saída de fundo; e uma segunda onde se pré fixa a divisão de massa entre as saídas. Como a monitoração de pressão no experimento foi feita em posições externas ao volume modelado, foi utilizada a partição de massa entre as duas saídas como condição de contorno. A partir dos valores obtidos no experimento (vazão volumétrica igual a 6,5 m<sup>3</sup>/h), especificou-se 35% da vazão para o rejeito ('overflow') e 65% para a saída de fundo ('underflow').

No trabalho experimental de Marins (2007) foram medidas as componentes tangencial e axial da velocidade ao longo do hidrociclone nas posições indicadas na Fig. 5.1. Também foram apresentadas medições pontuais de flutuação turbulenta sobre a linha 440 mm a 11,9 mm do centro do hidrociclone.

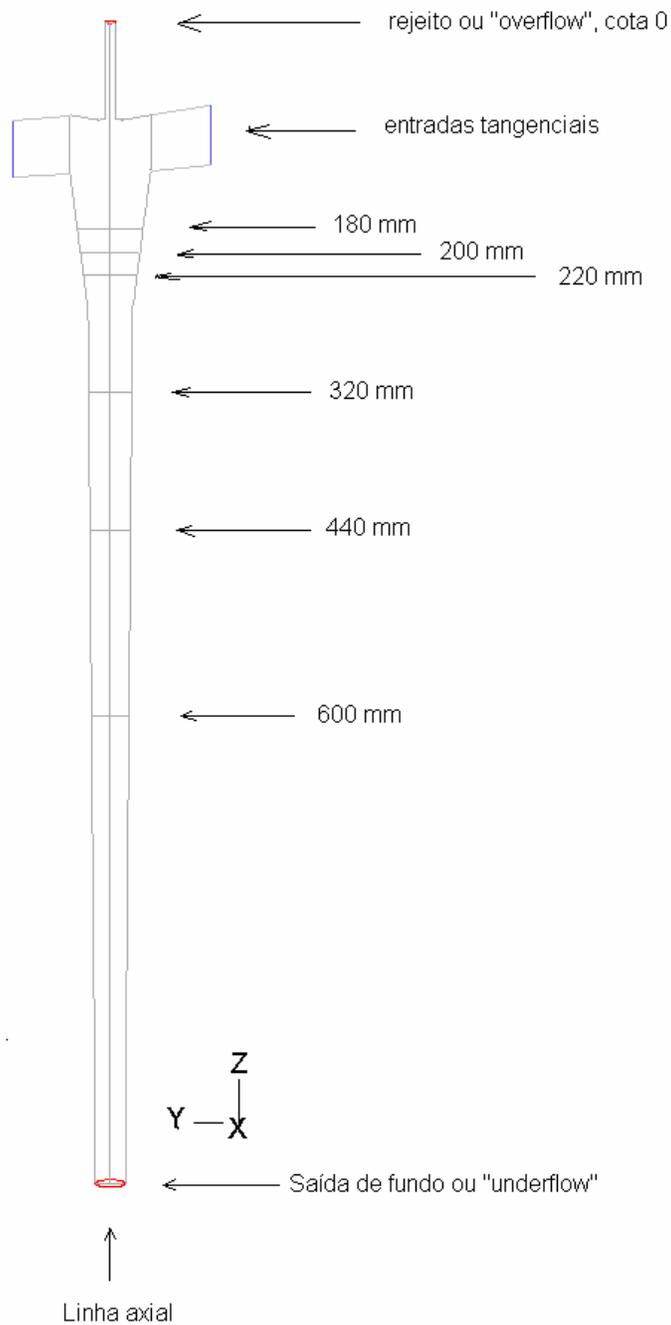


Figura 5.1: Posição das linhas ao longo do hidrociclone onde foram medidos os perfis de velocidade.

Após a comparação dos resultados numéricos com os dados experimentais, serão apresentadas informações adicionais obtidas através da simulação e que não foram medidas na bancada experimental, como as distribuições de produção e dissipação de energia turbulenta, pressões, variação do "swirl number", campos centrífugos, número de Reynolds turbulento, etc.

## 5.1 Influência dos Modelos de Turbulência

A partir da malha selecionada com 1 milhão de volumes de controle, determinou-se o escoamento no interior do hidrociclone utilizando os modelos de turbulência RSM e LES. A solução obtida após atingir o regime estatisticamente permanente foi então comparada com os dados experimentais de Marins (2007). Apesar de Marins ter reportado uma vazão de  $6,5 \text{ m}^3/\text{h}$ , os resultados apresentados a seguir foram obtidos com a vazão de  $6,2 \text{ m}^3/\text{h}$ , pois testes preliminares indicaram valores mais elevados de velocidade do que nessa referência, e como Marins ressaltou incerteza na medida da vazão em seu aparato experimental, no presente trabalho optou-se pela vazão menor como caso base. Outro motivo para a adoção do valor de  $6,2 \text{ m}^3/\text{h}$  foi possibilitar a comparação com os resultados obtidos com CFX conforme reportado em Raposo et al (2008).

A influência do esquema de discretização espacial também foi investigada com o modelo RSM, tendo-se obtido o campo de velocidade e pressão com os esquemas de discretização espacial *Upwind* (esquema de segunda ordem) e QUICK (esquema de segunda ordem). Com o modelo de turbulência LES, também foi utilizado o esquema de interpolação QUICK.

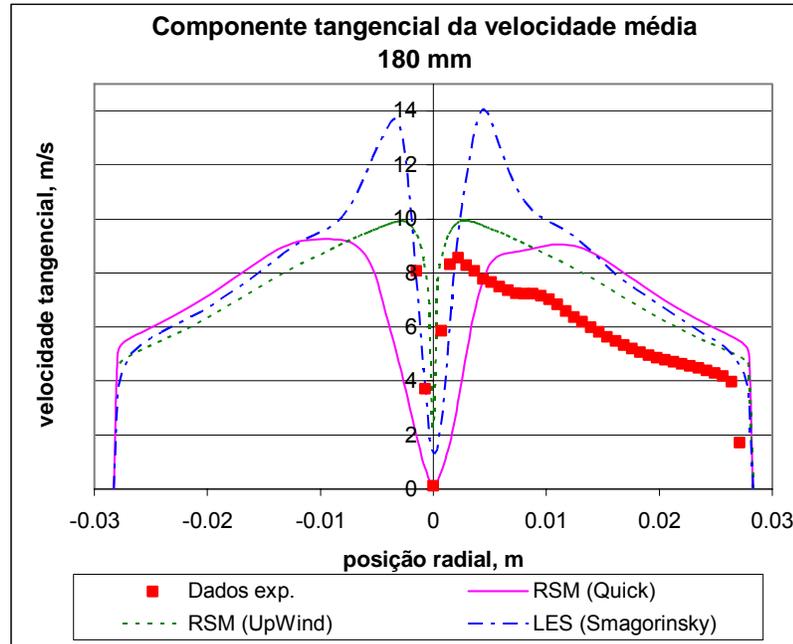
A distribuição da componente tangencial da velocidade média ao longo do raio do hidrociclone, correspondentes as linhas axiais ( $z =$ ) a 180 mm e 220 mm da cota zero (localizada na posição do rejeito) são apresentados nas Fig. 5.2, enquanto os resultados correspondentes às linhas 440 mm e 600 mm encontram-se na Fig. 5.3. A distribuição da componente axial da velocidade média ao longo do raio é apresentada, para as mesmas linhas, nas Fig. 5.4 e 5.5. Nestas figuras foram incluídos os resultados experimentais de Marins (2007) juntamente com os valores obtidos neste trabalho.

Analisando as Figs. 5.2 e 5.3 observa-se um forte aumento do componente tangencial nas imediações do centro do hidrociclone, com o ponto de máximo próximo ao eixo seguido de um gradiente acentuado. Observa-se que, qualitativamente, todos os modelos apresentaram o mesmo comportamento, com aproximadamente a mesma inclinação do perfil de velocidade em direção ao centro, mas em todos os casos o valor da componente tangencial da velocidade foi superestimado. Uma maior discrepância entre os resultados foi obtida na região

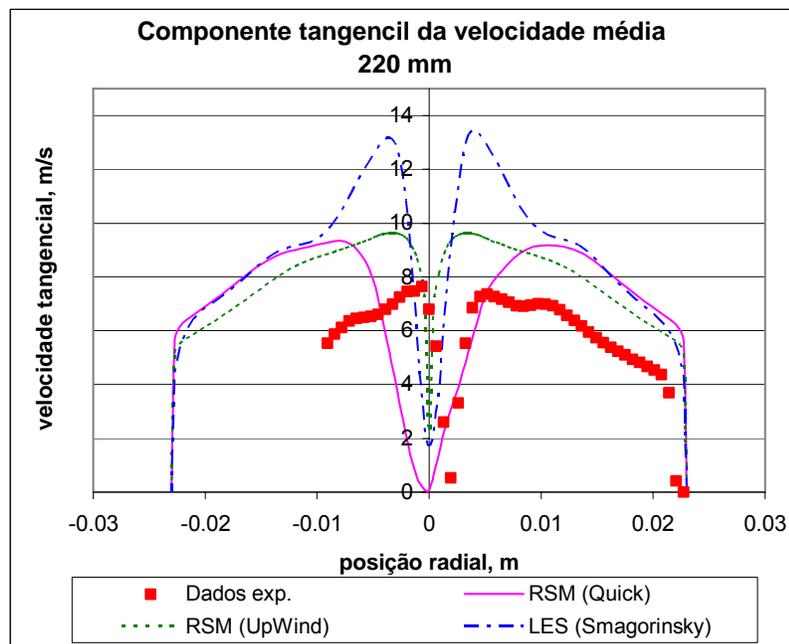
central do cone reverso, o qual possui um diâmetro de aproximadamente 0,02 m. Apesar dos modelos de turbulência LES e RSM com o esquema de ordem superior QUICK terem apresentado valores próximos (discrepância de cerca de 0,2 m/s) em posições radiais maiores que 10 mm, o modelo LES superestimou muito o valor máximo de velocidade atingindo 14 m/s. O trabalho de Delgadillo e Rajamani (2005) também indicou que a componente tangencial obtida com LES foi super estimada em relação a outros modelos. O mesmo trabalho ainda indica que as previsões com LES são piores junto a paredes onde a viscosidade molecular tem um efeito mais significativo, assim como também observado na literatura referente a simulação do escoamento através de outros hidrociclones com o modelo LES. O modelo RSM (com QUICK) apresentou um gradiente de velocidade muito suave na região de rotação de corpo rígido, superestimando levemente a largura do mesmo. Já o modelo RSM com o esquema de segunda ordem *Upwind*, além de superestimar a velocidade tangencial, também superestimou o gradiente de velocidade junto ao eixo central, ou seja, prevê um cone reverso levemente mais fino. Observa-se o mesmo comportamento para todas as posições ao longo do eixo z analisadas (Figs. 5.2 e 5.3).

As Figuras 5.4 e 5.5 ilustram o componente axial da velocidade ao longo do raio nas mesmas coordenadas utilizadas para analisar o componente tangencial de velocidade, onde se pode observar claramente a presença do cone reverso, com uma boa concordância de todas as previsões com relação a largura do cone. Analisando as Figs. 5.4 e 5.5 nota-se que o modelo RSM (com esquema *Upwind*) consegue prever melhor o valor máximo de velocidade no eixo do hidrociclone, porém a concordância se deteriora para as estações mais afastadas da entrada. Observa-se ainda que o componente axial previsto pelo modelo LES se afasta dos dados experimentais à medida que a coordenada axial (z) se aproxima da saída de fundo. É preciso lembrar que, como a proporção entre a vazão de rejeito (*overflow*) e fundo (*underflow*) foi mantida constante, a previsão de maiores velocidades vem acompanhada de menor área efetiva de escoamento, ou, área onde a componente axial da velocidade é positiva. O modelo LES é o menos difusivo, resultando em maiores velocidades próximo à parede do hidrociclone em direção ao *underflow*. Estas velocidades maiores induziram a uma menor área efetiva com escoamento negativo, induzindo um aumento de área do cone reverso e, conseqüentemente, menores velocidades no interior do mesmo. O inverso pode

ser observado para o modelo RSM (esquema *Upwind*). O modelo RSM (esquema QUICK) apresentou resultados intermediários entre LES e RSM (*Upwind*).

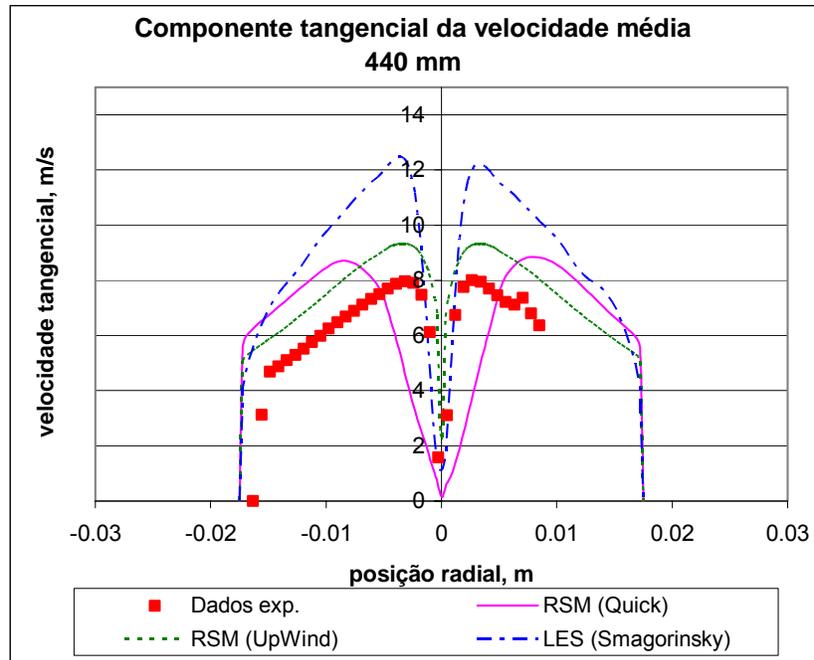


(a) linha 180 mm

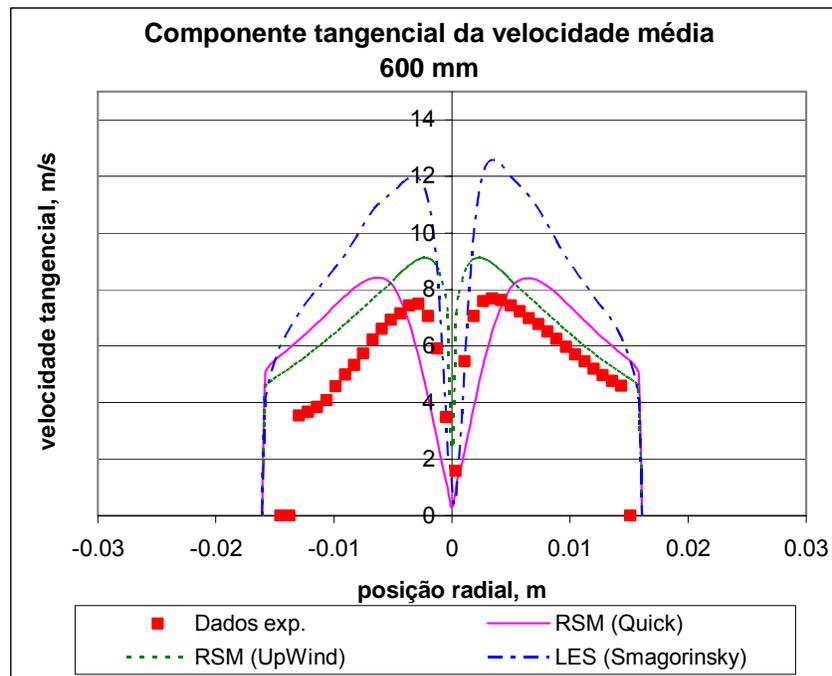


(b) linha 220 mm.

Figura 5.2: Evolução da componente tangencial da velocidade média obtida experimentalmente e com os modelos RSM e LES para  $6,2 \text{ m}^3/\text{h}$ . (a) linha 180 mm (b) linha 220 mm.

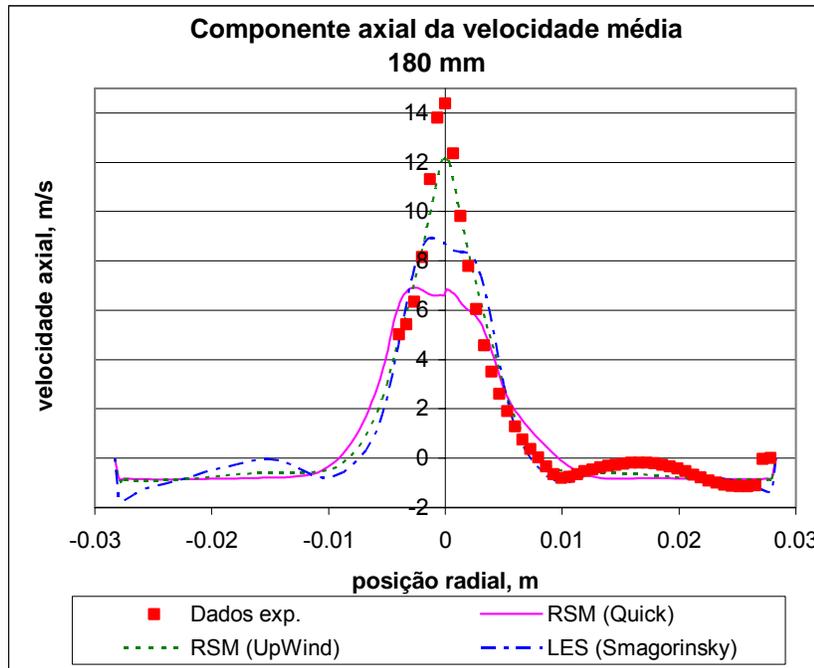


(a) linha 440 mm

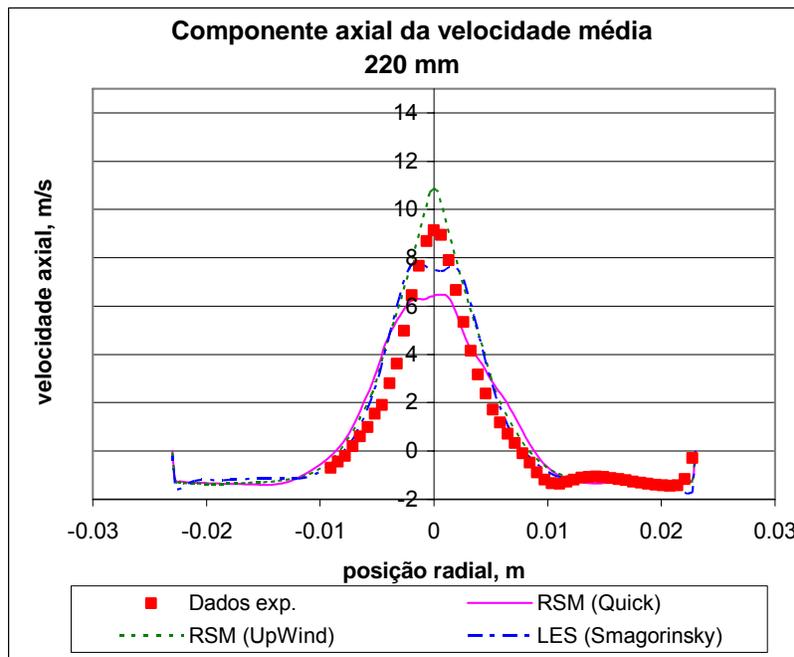


(b) linha 600 mm.

Figura 5.3: Evolução da componente tangencial de velocidade média obtida experimentalmente e com os modelos RSM e LES para  $6,2 \text{ m}^3/\text{h}$ . (a) linha 440 mm (b) linha 600 mm.

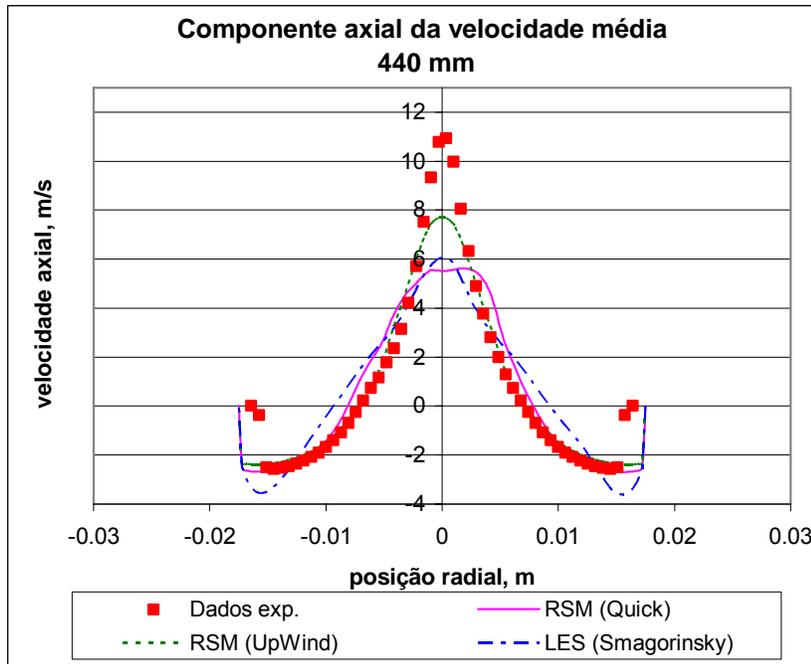


(a) linha 180 mm.

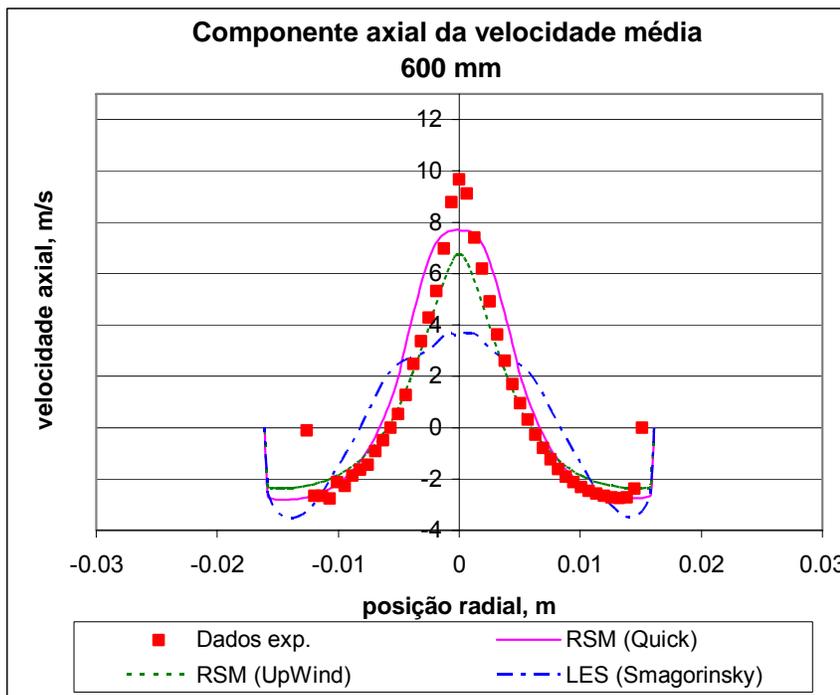


(b) linha 220 mm.

Figura 5.4: Evolução da componente axial da velocidade média obtida experimentalmente e com os modelos RSM e LES para  $6,2 \text{ m}^3/\text{h}$ . (a) linha 180 mm (b) linha 220 mm.



(a) linha 440 mm.



(b) linha 600 mm.

Figura 5.5: Evolução da componente axial da velocidade média obtida experimentalmente e com os modelos RSM e LES para  $6,2 \text{ m}^3/\text{h}$ . (a) linha 440 mm (b) linha 600 mm.

A influência do modelo de turbulência sobre a perda de pressão ao longo do hidrociclone (diferença entre a pressão média na entrada e na saída de fundo) pode ser observada na Tabela 5.1. O modelo LES prevê a maior perda de carga, sendo que os resultados obtidos apresentaram variações de 4% (RSM/*Upwind*) a 10% (RSM/QUICK) em relação à queda de pressão prevista com o modelo LES. Pode-se notar assim, que quanto mais intensos os gradientes de velocidade tangencial maior a perda de pressão no escoamento.

Para prosseguimento das simulações foi utilizado o esquema QUICK, por apresentar em teoria resultado menos difusivo e por ser citado em grande número de referências (Narasimha et al. 2006, Brennan et al. 2007, Delgadillo e Rajamani 2006, Cullivan et al 2004).

Tabela 5.1: Influência dos modelos de turbulência sobre a perda de pressão calculada ao longo do hidrociclone (pressão na entrada – saída de fundo)

<b>Modelo</b>	<b>Perda de Carga (bar)</b>
RSM ( <i>Upwind</i> )	0,654
RSM (QUICK)	0,631
LES	0,687
Experimental	0,97

## 5.2 Influência da Vazão na Entrada

Os resultados apresentados na seção anterior e a informação do trabalho experimental de Marins (2007) de que houve problemas na medição da vazão de água sugerem que uma investigação considerando-se diferentes vazões para estes modelos, visando melhorar a concordância com os dados experimentais. Foi então avaliada, além da vazão de 6,2 m<sup>3</sup>/h (inferior a referência experimental de 6,5 m<sup>3</sup>/h), a vazão de 5,5 m<sup>3</sup>/h. As comparações entre os resultados obtidos para as diferentes vazões, em termos componentes tangenciais e axiais da velocidade média para o modelo RSM (com o método de discretização de momento QUICK) e os dados experimentais de Marins (2007), obtidos utilizando LDV, são apresentadas na Figs. 5.6 e 5.7, enquanto que os resultados obtidos com o modelo LES encontram-se nas Figs. 5.8 e 5.9.

Analisando-se as Figs. 5.6a, 5.6b e 5.6c observa-se que, com a redução da

vazão de entrada, o modelo de turbulência RSM, com o esquema QUICK conseguiu reproduzir o nível de velocidade tangencial medido experimentalmente. No entanto, as previsões da área efetiva do cone reverso se alteraram muito pouco. As Figs. 5.7a, 5.7b e 5.7c para o componente axial corroboram essas observações, com uma redução do valor máximo de velocidade axial na região do cone reverso, mas mantendo aproximadamente a mesma largura do cone.

Note que o resultado previsto pelo modelo RSM (esquema QUICK) para a linha 600 mm, próxima ao fundo do hidrociclone, apresentou um comportamento discrepante para o componente tangencial, como pode ser observado na Fig. 5.6d. Para a mesma coordenada, o componente axial também foi afetado modificando também o diâmetro do cone reverso e não apenas o valor máximo da componente, como seria esperado (Fig. 5.7d). Acredita-se que o resultado discrepante obtido seja devido a problemas numéricos e maiores investigações seriam necessárias. Porém, para o objetivo do presente trabalho, que é comprovar a importância da correta especificação da vazão introduzida no hidrociclone e que uma redução da vazão leva a uma redução do valor da velocidade tangencial, maiores investigações não foram realizadas.

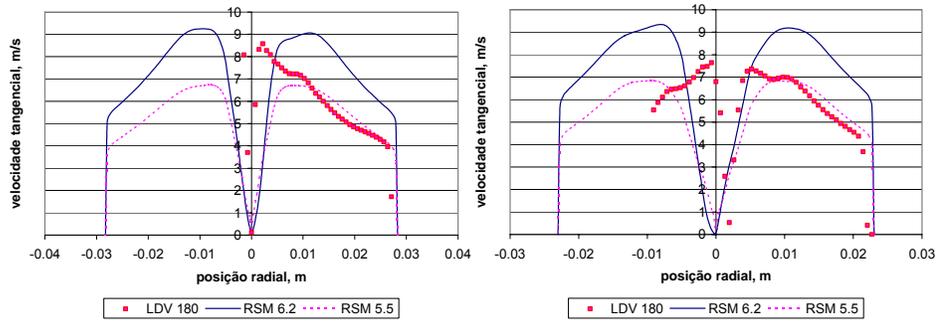
Observando-se as Figuras 5.5 a 5.9 podemos notar que a variação da vazão influenciou de modo mais sensível os resultados obtidos com o modelo RSM do que aqueles obtidos com LES, ou seja, a redução da componente tangencial da velocidade foi mais acentuada, aproximando-se dos pontos experimentais.

No caso da previsão do componente axial pelo modelo LES, Fig. 5.9, nota-se que houve uma redução nos valores máximos de velocidade e manteve-se a forma e diâmetro do cone reverso central, uma vez que a transição entre valores positivos e negativos da velocidade ocorre aproximadamente no mesmo ponto.

A influência da vazão na perda de pressão ao longo do hidrociclone pode ser observada na Tabela 5.2, onde se pode observar a redução na mesma com a diminuição da vazão, com ambos os modelos, corroborando o que seria intuitivo.

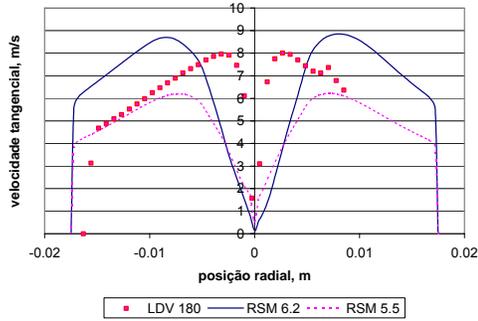
Tabela 5.2: Influência da vazão na perda de pressão ao longo do hidrociclone.

Modelo	Perda de Carga (bar)	
	Vazão (6,2 m <sup>3</sup> /h)	Vazão (5,5 m <sup>3</sup> /h)
RSM (QUICK)	0,631	0,442
LES	0,687	0,578

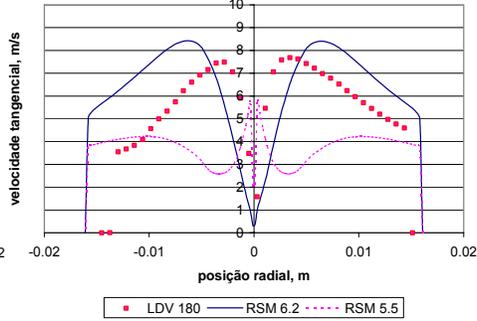


(a) linha 180 mm.

(b) linha 220 mm

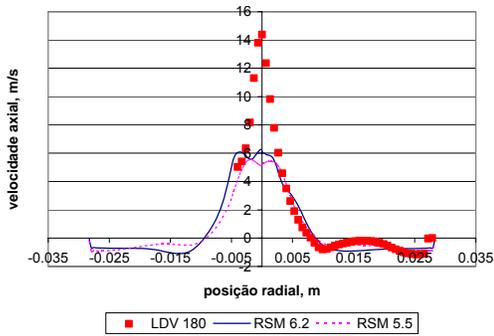


(c) linha 440 mm.

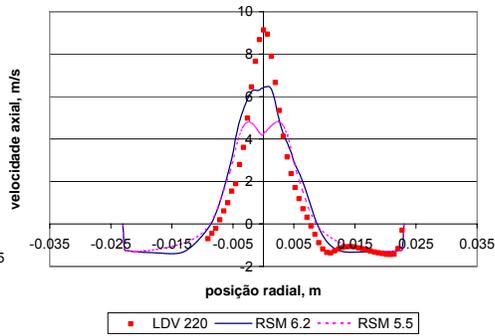


(d) linha 600 mm

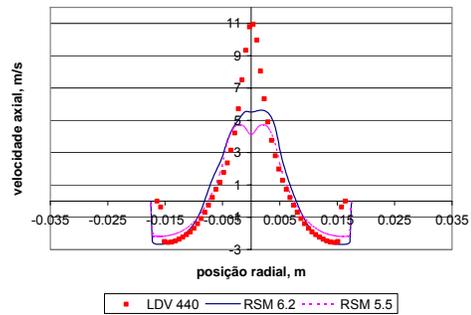
Figura 5.6: Componente tangencial da velocidade para diferentes vazões, modelo RSM, esquema QUICK. (a) linha 180 mm (b) linha 220 mm. (c) linha 440 mm (d) linha 600 mm.



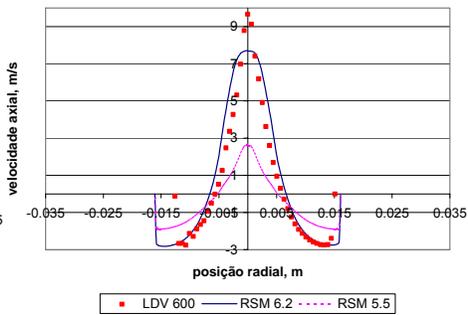
(a) linha 180 mm.



(b) linha 220 mm



(c) linha 440 mm.



(d) linha 600 mm

Figura 5.7: Componente axial da velocidade para diferentes vazões, modelo RSM, esquema QUICK, (a) linha 180 mm (b) linha 220 mm. (c) linha 440 mm (d) linha 600 mm.

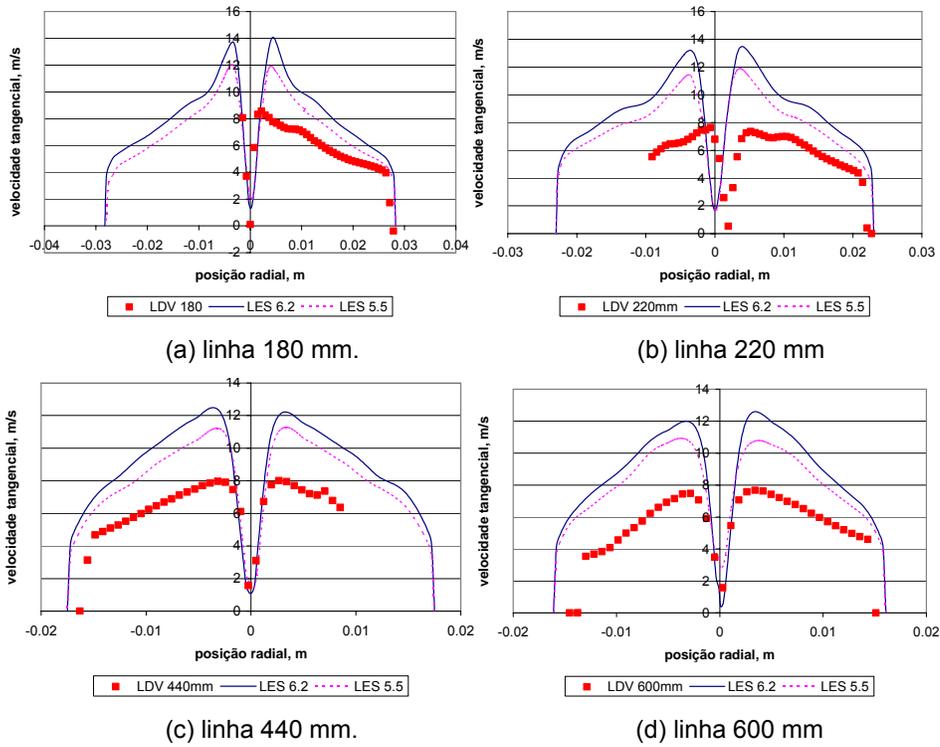


Figura 5.8: Componente tangencial da velocidade para diferentes vazões. Modelo LES. a) linha 180 mm (b) linha 220 mm. (c) linha 440 mm (d) linha 600 mm.

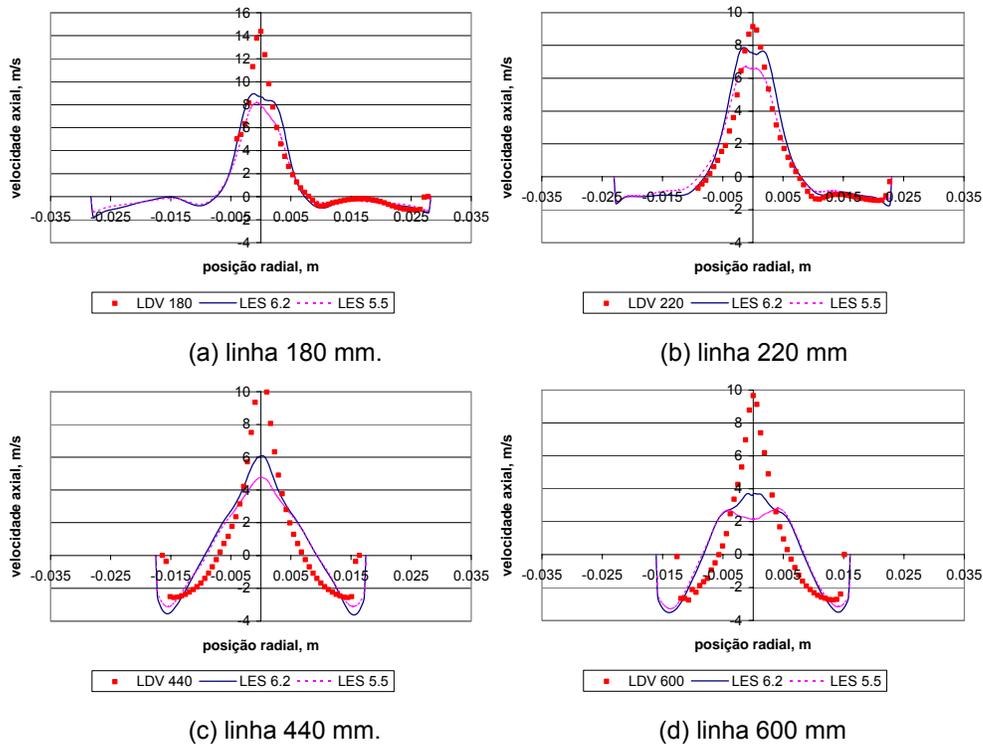


Figura 5.9: Componente axial da velocidade para diferentes vazões, modelo LES (a) linha 180 mm (b) linha 220 mm. (c) linha 440 mm (d) linha 600 mm.

### 5.3 Influência da Rugosidade das Paredes

Uma vez que é sabido que a rugosidade das paredes influencia no atrito, investigou-se a influência deste parâmetro sobre a resposta dos modelos numéricos com relação à previsão do escoamento.

A primeira investigação dos efeitos da rugosidade no escoamento foi realizada utilizando o modelo  $k-\varepsilon$ , com a malha 500 (500.000 volumes), com a vazão de  $6,2 \text{ m}^3/\text{h}$ . Selecionou-se valores altos de rugosidade, em relação aos valores utilizados na indústria para equipamentos (tubo comercial =  $50\mu\text{m}$ ; tubo usinado/ trefilado=  $1,5\mu\text{m}$ ; hidrociclone para tratamento de água oleosa =  $1,2\mu\text{m}$ , Perry 1999), para destacar os resultados. Vale lembrar que a relação entre a rugosidade medida e os valores das constantes do modelo não estão bem estabelecidos (Fluent 2006).

A Figura 5.10 apresenta a comparação da evolução da componente tangencial de velocidade ao longo do raio para a linha 180 mm, para tubo liso e duas rugosidades:  $10 \mu\text{m}$  e  $50 \mu\text{m}$ . Observa-se que o aumento da rugosidade levou a da uma redução desta componente de velocidade. Uma consequência desta redução é a menor perda de pressão (diferença entre a pressão na entrada e a pressão na saída de fundo) ao longo do hidrociclone com o aumento da rugosidade, conforme o apresentado na Tabela 5.3. Este resultado concorda com o reportado na literatura (Cortés e Gil, 2007).

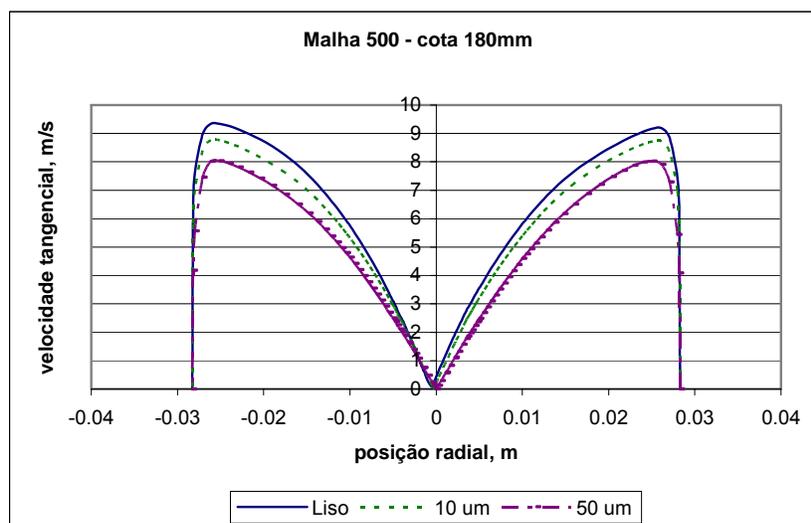


Figura 5.10 : Influência da rugosidade na evolução da componente tangencial de velocidade sobre a linha de 180 mm. Modelo  $k-\varepsilon$ .

Tabela 5.3: Influência da rugosidade na perda de pressão ao longo do hidrociclone com o modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$ .

Rugosidade ( $\mu\text{m}$ )	Perda de Carga (bar)
Liso	0,819
10	0,725
50	0,626

Em virtude da variação observada na componente tangencial da velocidade e na perda de carga utilizando-se o modelo  $\kappa$ - $\varepsilon$ , buscou-se avaliar a influência da rugosidade sobre o escoamento simulado pelo modelo RSM. Na modelagem LES disponível no Fluent, o efeito da rugosidade não é incluído no equacionamento da lei da parede.

A Fig. 5.11 apresenta a evolução da componente tangencial da velocidade ao longo do raio para as quatro seções transversais estudadas anteriormente, utilizando o modelo de turbulência RSM, com vazão de  $6,2 \text{ m}^3/\text{h}$  para um duto liso e um duto com rugosidade de  $50 \mu\text{m}$ . Esta figura compara os resultados da modelagem com as medidas experimentais obtidas com LDA por Marins (2007). Analisando os resultados, nota-se que, com a introdução da rugosidade, o valor da componente tangencial diminui e a previsão numérica se aproximara dos resultados experimentais. No entanto, o mesmo comportamento anômalo observado anteriormente na fig. 5.6 (d), na região central do hidrociclone na linha de  $600 \text{ mm}$ , ao reduzir a vazão pode ser observado agora nas linhas correspondentes a  $220 \text{ mm}$ ,  $400 \text{ mm}$  e  $600 \text{ mm}$ . Este comportamento indica que a lei da parede está influenciando de forma errônea o campo de velocidade, induzindo uma forte oscilação da velocidade tangencial na região do cone reverso, atingindo altos valores próximo ao eixo, reduzindo abruptamente para zero no centro.

A influência da rugosidade na perda de carga prevista com o modelo RSM é apresentada na Tabela 5.4, onde novamente observa-se uma redução na perda de carga com a introdução de uma rugosidade.

Tabela 5.4: Influência da rugosidade na perda de pressão ao longo do hidrociclone com o modelo RSM.

Rugosidade ( $\mu\text{m}$ )	Perda de Carga (bar)
RSM (QUICK) Liso	0,631
RSM (QUICK) 50	0,493

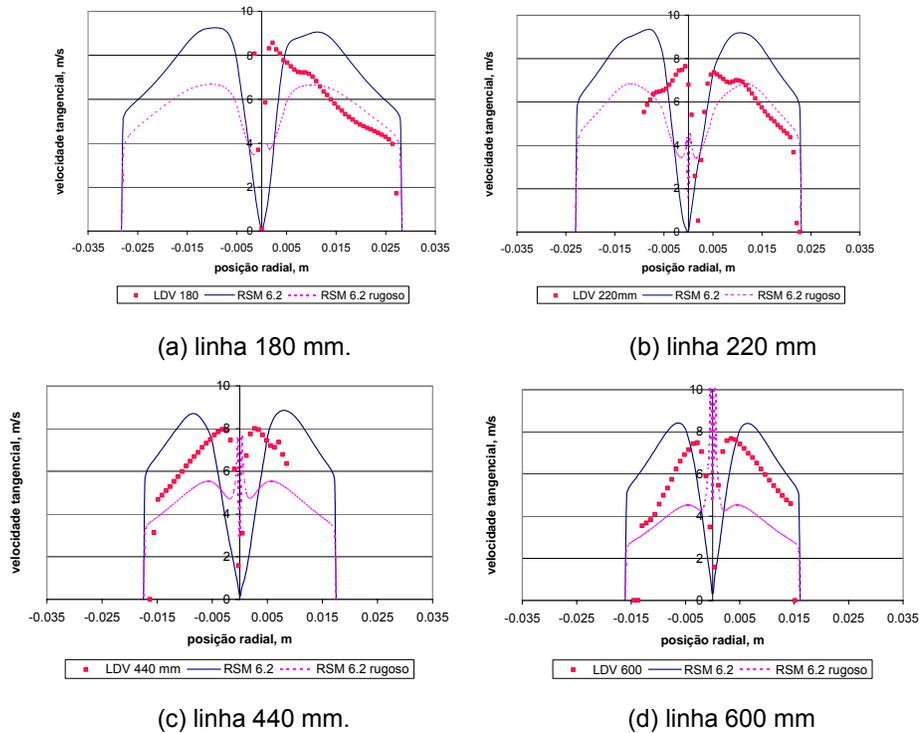


Figura 5.11: Influência da rugosidade na evolução do componente tangencial de velocidade sobre as linhas radiais. Modelo RSM (esquema QUICK). (a) 180 mm, (b) 220 mm, (c) 440 mm, (d) 600 mm

## 5.4 Influência do Comprimento do Hidrociclone

Um outro parâmetro interessante de ser investigado é a influência do comprimento do hidrociclone no escoamento. Para analisar este parâmetro, criou-se uma extensão do trecho cilíndrico final do hidrociclone, de 63,15 mm para 378,90 mm, passando assim de um comprimento cilíndrico  $L$  em relação ao diâmetro do hidrociclone  $D_c$  de 0,9 para  $5,4 L/D_c$ . As simulações foram realizadas com a vazão de  $6,2 \text{ m}^3/\text{h}$  com os modelos LES e RSM com esquema QUICK. A Figura 5.12 ilustra a componente tangencial da velocidade obtida com os dois modelos de turbulência para os dois comprimentos do hidrociclone ao longo da linha radial, nas posições longitudinais de 180 mm e 220 mm. Observa-se, para ambos os modelos, uma redução do valor da velocidade tangencial. Para o modelo LES, a influência do comprimento no perfil de velocidade tangencial (Figs. 5.12c e 5.12d) é muito pequena. Já para o modelo RSM (Figs. 5.12a e 5.12b) observa-se uma variação significativa na componente tangencial da velocidade e, mais uma vez, resultados anômolos foram obtido na região central.

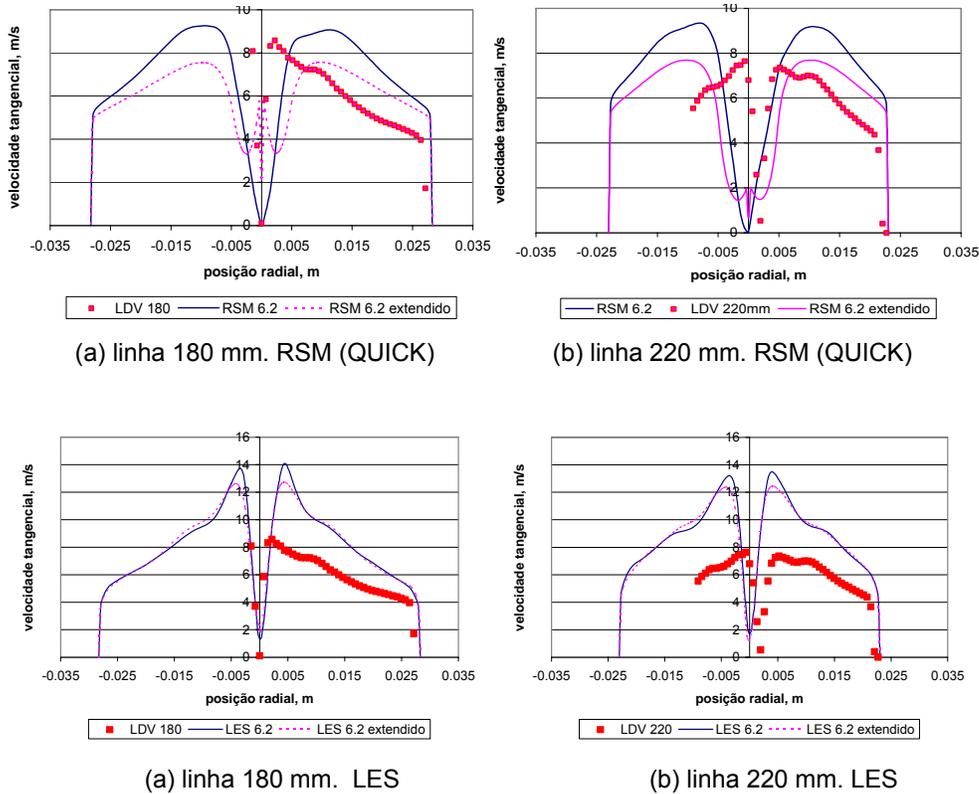


Figura 5.12: Influência da extensão do trecho cilíndrico na componente tangencial de velocidade, nas linhas 180 mm e 220 mm com os modelos RSM e LES.

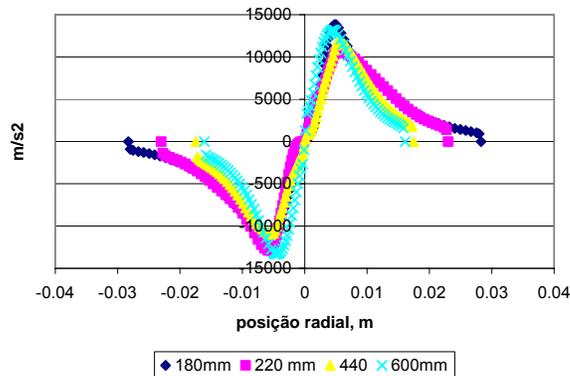
As perdas de carga médias ao longo do hidrociclone são apresentadas na Tabela 5.5. Dos resultados obtidos, nota-se que o incremento do trecho cilíndrico também apresentou reflexo na componente tangencial da velocidade e, novamente, os resultados com o modelo RSM foram bem mais sensíveis à modificação proposta que com LES. A perda de carga foi reduzida no caso RSM com o modelo estendido, uma vez que houve uma redução sensível da velocidade. Com LES, como a evolução da velocidade obtida apresentou-se pouco perturbada, esse efeito não se repetiu, levando a um acréscimo da perda de carga. Ou seja, como não houve uma redução sensível do componente tangencial o aumento da dissipação viscosa junto a parede (devido a maior área de parede do modelo estendido) não foi contrabalançada por uma menor dissipação viscosa junto ao cone reverso central.

Tabela 5.5: Influência do comprimento do hidrociclone na perda de pressão.

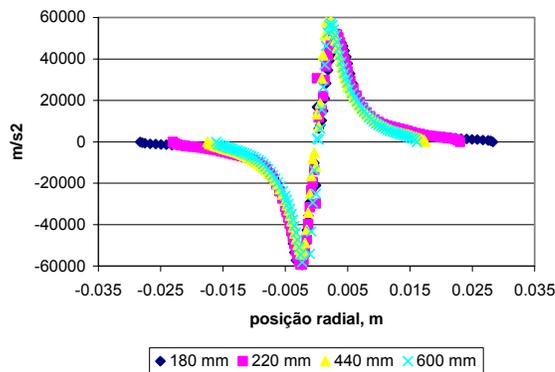
Modelo	Perda de Carga (bar)	
	$L/D_c = 0,9$	$L/D_c = 5,4$
RSM (QUICK)	0,631	0,628
LES	0,687	0,786

## 5.5 Campo de Velocidade e Pressão

Uma informação interessante, relacionada com o campo de velocidade no interior de um hidrociclone, são os campos centrífugos obtidos, pois sua análise auxilia na comparação com separadores gravitacionais, com os quais os hidrociclones de alto teor de óleo competem. A Figura 5.13 apresenta a aceleração centrífuga obtida com os modelos RSM (esquema QUICK) e LES ao longo do raio para as seções transversais utilizadas nas análises anteriores. Ambos os modelos apresentam campos de aceleração centrífuga análogos, porém o pico da aceleração centrífuga prevista pelo modelo LES é 4 vezes maior que o previsto pelo modelo RSM. O modelo RSM prevê uma diminuição da aceleração em direção ao *underflow*, enquanto que no modelo LES prevê uma distribuição de aceleração quase invariante ao longo das diversas seções.



(a) Modelo RSM (QUICK)

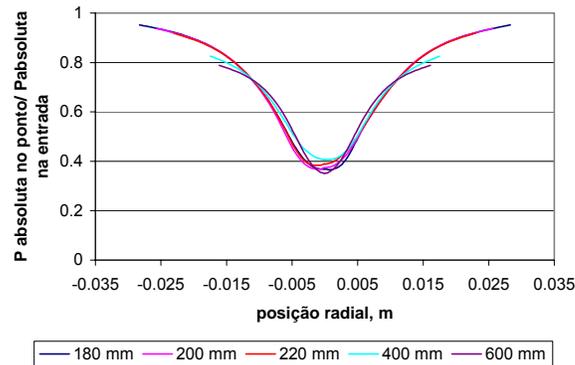


(b) Modelo LES

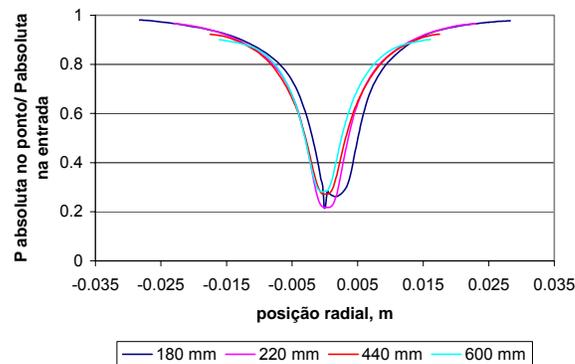
Figura 5.13: Distribuição da aceleração centrífuga em diversos cortes radiais, determinada com RSM e LES a  $6,2\text{m}^3/\text{h}$ .

Aqui se observa porque hidrociclones são equipamentos adequados para instalação em embarcações: as acelerações transmitidas pela oscilação da embarcação (proporcionais a gravidade) são 3 ordens de grandeza inferiores às desenvolvidas pelo escoamento.

Para contrabalançar o campo centrífugo forma-se no fluido um gradiente de pressão, que é apresentado na Fig. 5.14. Nesta figura pode ser constatado que o mínimo de pressão acontece junto ao centro do hidrociclone. Observa-se, ainda, que a previsão do escoamento obtida com o modelo RSM resultou em menores velocidades tangenciais, causando também uma menor depressão junto ao centro, atingindo cerca de 0,4 da pressão de entrada, enquanto que com LES este valor atingiu 0,2.



(a) Modelo RSM (QUICK)



(b) Modelo LES

Figura 5.14: Distribuição da razão entre a pressão absoluta e a pressão na entrada em diferentes linhas radiais com os modelos RSM e LES.

Um detalhe do cone reverso, obtido com o modelo LES, próximo ao fundo do hidrociclone (*underflow*) é apresentado na Fig. 5.15. Nesta figura o cone pode

ser visualizado a partir da iso-superfície da componente axial de velocidade igual a 0,1 m/s obtida em dois instantes de tempo diferentes. Nota-se claramente uma deformação das estruturas do escoamento, manifestada pela variação do diâmetro do cone ao longo do hidrociclone a medida que o tempo evolui.

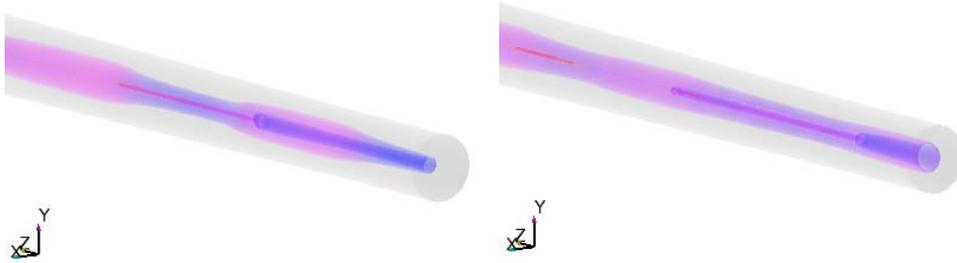


Figura 5.15: Deformação do cone reverso junto à saída do “underflow” materializada pela iso-superfície de velocidade axial 0,1 m/s em dois instantes diferentes, resultados obtidos com LES.

Outro parâmetro interessante de ser analisado é a comparação entre o tempo de residência médio, obtido pela razão entre o volume do equipamento e a vazão volumétrica através do mesmo, e o tempo de residência avaliado acompanhando partículas de mesma densidade que o fluido ao longo das linhas de corrente formadas entre a entrada e a saída de fundo apenas, como é apresentado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Comparação do tempo de residência calculado de diferentes formas para a simulação RSM com diferentes tamanhos de partícula.

Tempo de residência, segundos	
Volume/ vazão	0,64
Partícula de 50 $\mu\text{m}$	0,59
Partícula de 100 $\mu\text{m}$	0,63
Partícula de 150 $\mu\text{m}$	0,69

A diferença nos tempos calculados pode ser explicada pelo caminho espiralado formado no escoamento rotacional exibido na Fig. 5.16.

A intensidade de rotação do fluido é comumente caracterizada pelo número adimensional de “swirl”. Esse parâmetro reflete uma relação entre a quantidade de movimento angular e linear no escoamento, assim, quanto maior o número de

“swirl” maior a intensidade da rotação do fluido.

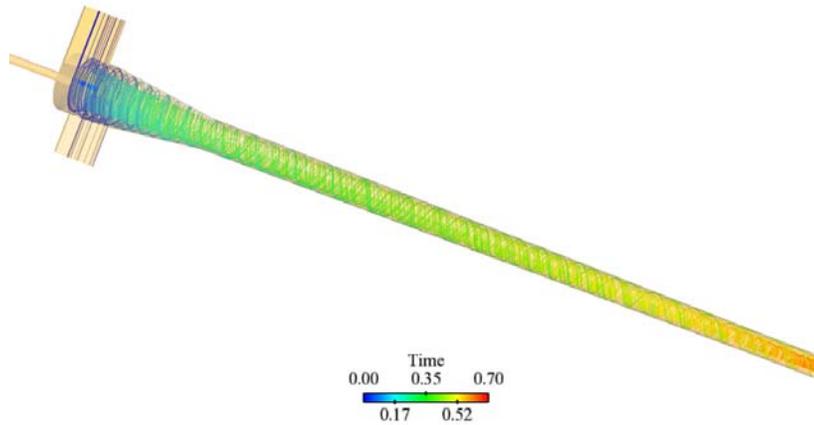


Figura 5.16: Trajetória de partículas lagrangeanas de mesma densidade que a fase contínua.

O número de “swirl”,  $\Omega$ , utilizado neste trabalho foi derivado da equação apresentada por Dirkwager (1996), sendo que,  $U_\theta$ ,  $U_z$  são, respectivamente, as componentes tangencial e axial da velocidade avaliadas para diferentes áreas,  $A$ , de raios,  $R$ , correspondendo a cortes radiais ao longo do hidrociclone:

$$\Omega = \frac{A \int r U_\theta \rho U_z dA}{R \int \rho U_z U_z dA} \quad (5.1)$$

Observa-se na Tabela 5.7 que na vizinhança da entrada tem-se um “swirl” mais intenso e que, conforme ocorre a dissipação do momento angular ao longo do equipamento, os valores decrescem. É interessante destacar que com o modelo LES obteve-se valores um pouco superiores em todos os planos, coerente com com os maiores valores da componente tangencial da velocidade.

Tabela 5.7: Número de “swirl” para diferentes planos radiais ao longo do hidrociclone.

Posição	180 mm	200 mm	220 mm	320mm	440mm	600 mm
RSM	16,6	13,4	12,2	8,0	6,4	4,5
LES	19,3	15,6	14,7	9,2	8,2	5,6

A precessão, citada na literatura (Dirkzwager, 1996) para descrever o movimento oscilatório do cone reverso central pode ser observada qualitativamente na Fig. 5.17 aonde são mostradas isóbaras, obtidas com o modelo LES, em diferentes cortes radiais em diferentes instantes de tempo. Analisando-se a Fig.5.16 pode-se observar que o ponto de mínima pressão oscila ao redor do eixo axial do hidrociclone (marcado por um ponto preto).

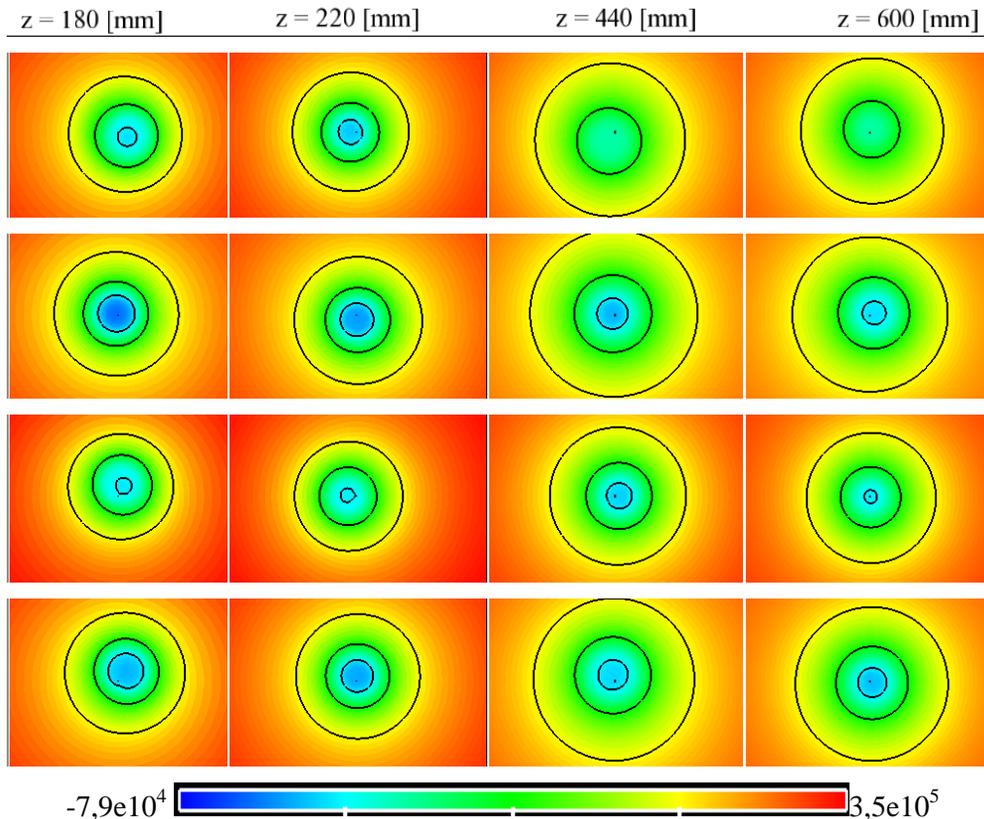
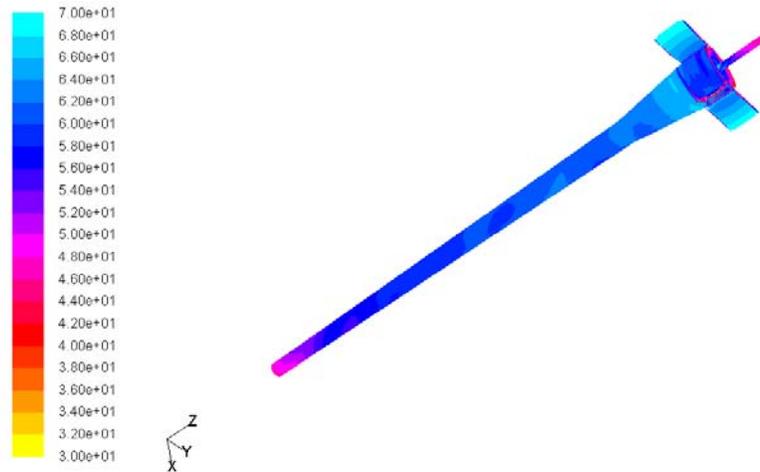


Figura 5.17: Isóbaras (pressão estática, kPa) em diferentes posições axiais, evidenciando a flutuação do cone reverso central, simulação com LES.

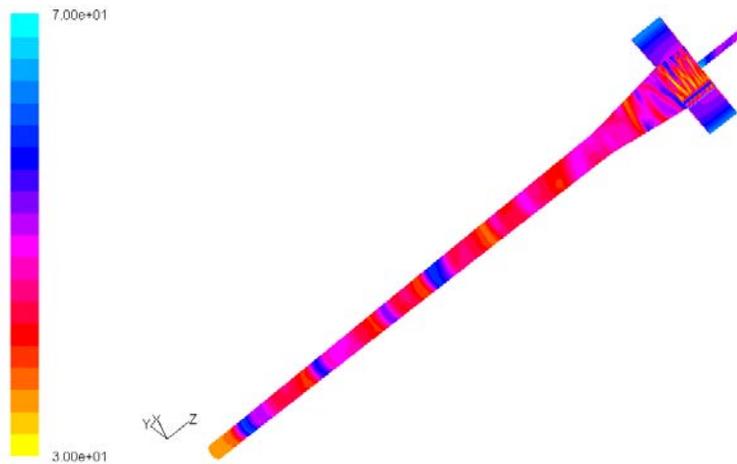
## 5.6 Grandezas Turbulentas

Um parâmetro crítico para se avaliar a aplicação dos modelos de turbulência com relação a seleção da malha utilizada em uma simulação é a altura adimensional  $y^+$  do primeiro ponto nodal interno próximo às paredes. Para a utilização do perfil logarítmico da lei da parede, o valor de  $y^+$  deve ser maior do que 11, sendo o valor 30 mais adequado. Observa-se, na Fig. 5.18, que os valores obtidos para  $y^+$  com os dois modelos de turbulência, RSM e LES, ficaram dentro

da faixa recomendada, indicando que a seleção da malha utilizada é adequada.



(a) Modelo RSM (QUICK)



(b) Modelo LES

Figura 5. 18: Evolução de  $Y^+$  ao longo da parede do hidrociclone. (a)Modelo RSM  
(b) Modelo LES.

Outra avaliação interessante que pode ser obtida através dos resultados com LES é a razão  $Rk$  de energia contida nas escalas submalha em relação a energia contida nas escalas resolvidas, a qual, de acordo com o modelo de Smagorinsky-Lilly, pode ser definida por

$$Rk = \frac{k_{sgs}}{k_{res}} = \frac{[\mu_{sgs} / (L_s \rho C_s)]^2}{\frac{1}{2} (u_1'^2 + u_2'^2 + u_3'^2)}, \quad (5.2)$$

onde  $\mu_{sgs}$  é a viscosidade da sub-malha (Eq. 3.33),  $C_s$  é a constante de Smagorinsky, e  $L_s$  é a dimensão característica definida pela Eq. (3.34).

De acordo com Brennan et al. (2006) os valores desejáveis para  $Rk$ , para que um maior refinamento de malha não seja necessário devem estar abaixo de 10 ou 5%. A Fig. 5.19 ilustra a distribuição de  $Rk$  ao longo do raio para as diferentes seções de teste. Das curvas apresentadas, observa-se que, em praticamente todo o domínio, obteve-se valores inferiores a 5%, a exceção da região junto às paredes onde temos resultados um pouco maiores que 10%. Nessa região foi utilizada uma malha mais grosseira, juntamente com a lei logarítmica de parede para economia de recursos, como já citado anteriormente.

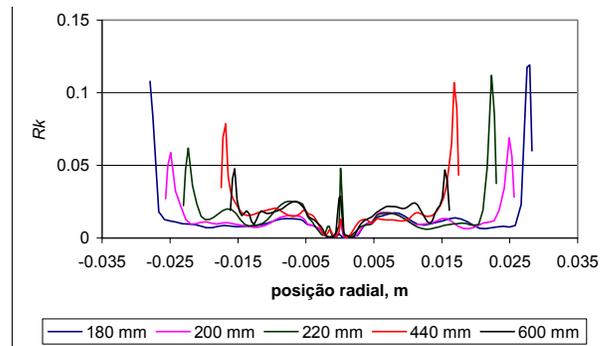


Figura 5.19: Razão de energia contida nas escalas submalha pelas resolvidas

Pode-se também analisar o número de Reynolds turbulento ao longo do hidrociclone. Esta grandeza, que pode ser escrita como uma razão entre a viscosidade turbulenta e a viscosidade molecular, indica o nível de turbulência observado sendo apresentada na Fig. 5.20:

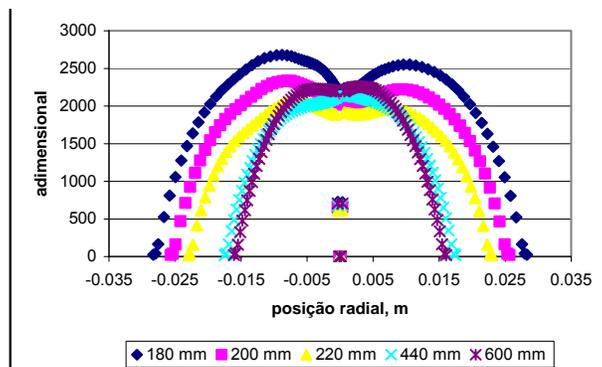


Figura 5.20: Número de Reynolds turbulento avaliado em diferentes posições axiais para o modelo RSM

Observa-se que o transporte turbulento não é máximo junto à parede, mas sim ao redor do cone central reverso. A ordem de grandeza do transporte turbulento é a mesma ao longo de todo o equipamento. Isso indicava que a condição de contorno das propriedades turbulentas nas entradas tem, provavelmente, pouca influência nos resultados. O valor utilizado de 10%, foi dissipado no canal de entrada. A produção turbulenta se dá com mais intensidade nas vizinhanças do cone central. A Fig. 5.21 apresenta contornos de produção de energia turbulenta em um corte radial, região das entradas. A distribuição obtida evidencia como a turbulência da entrada é logo dissipada e só novamente gerada junto ao centro axial.

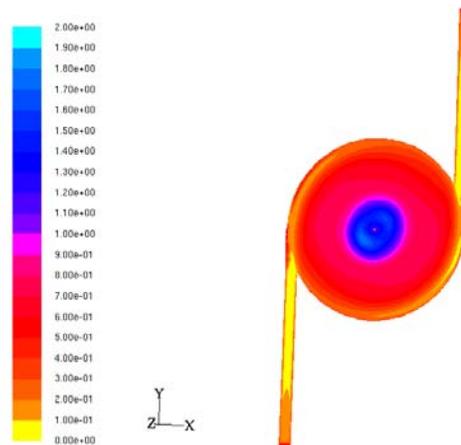


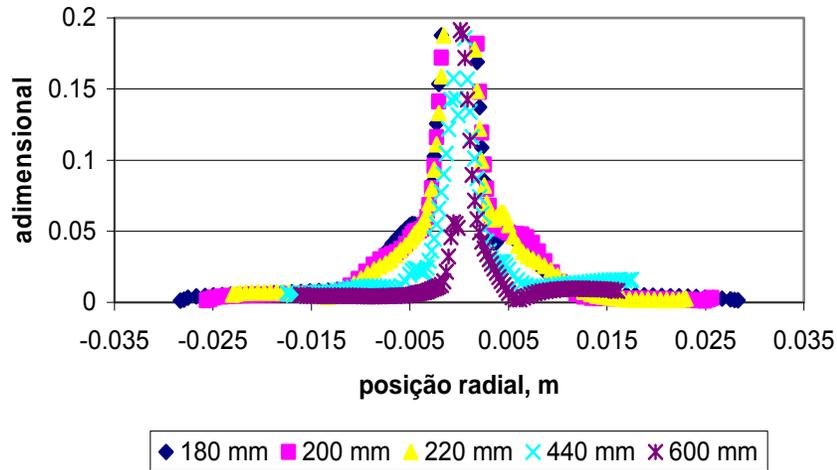
Figura 5.21: Contornos de produção turbulenta ( $m^2/s^2$ ) para o modelo RSM na posição axial de 105 mm.

Outro parâmetro interessante de ser avaliado é a intensidade turbulenta, ou seja, a razão da flutuação de velocidade pela velocidade média. A Fig. 5.22 apresenta o componente tangencial da intensidade turbulenta, correspondente aos modelos RSM e LES para as diversas seções de teste, enquanto que a Figura 5.23 corresponde ao componente axial da intensidade turbulenta.

Os resultados mostram uma grande diferença na previsão da intensidade turbulenta, sendo aquelas obtidas com LES cerca de 2,5 vezes superiores às calculadas com RSM. Entretanto, a evolução radial é qualitativamente semelhante para ambos os modelos. Na região do cone reverso vemos valores extremos de intensidade turbulenta, coerente com os grandes gradientes de velocidades ali encontrados.

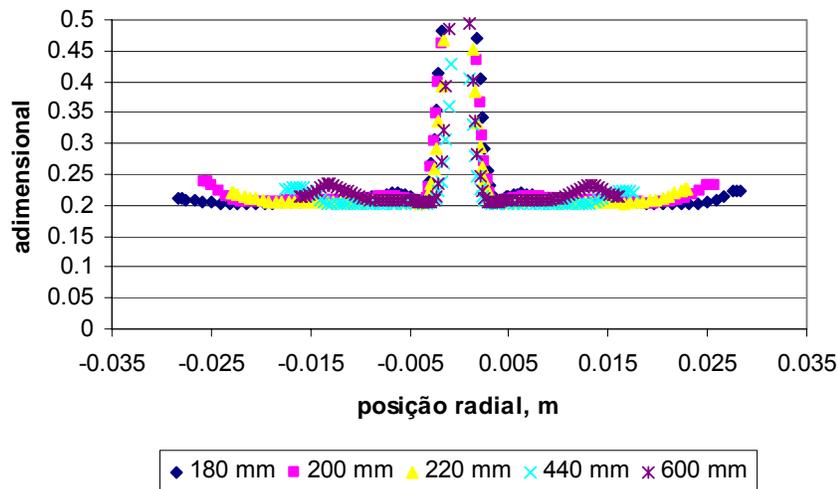
O trabalho experimental de Marins (2007) aponta flutuações de velocidades, medidas na posição axial de 440 mm e radial de 11,9 mm, de cerca de 30 e 10% para as componentes axial e tangencial da velocidade respectivamente. Vê-se que dos modelos de turbulência utilizados, o LES apresentou resultados mais próximos aos experimentais.

### RSM - intensidades turbulentas tangenciais



(a) Modelo RSM (QUICK)

### LES - Intensidades turbulentas tangenciais



(b) Modelo LES

Figura 5.22: Intensidades turbulentas tangenciais obtidas com os modelos RSM e LES

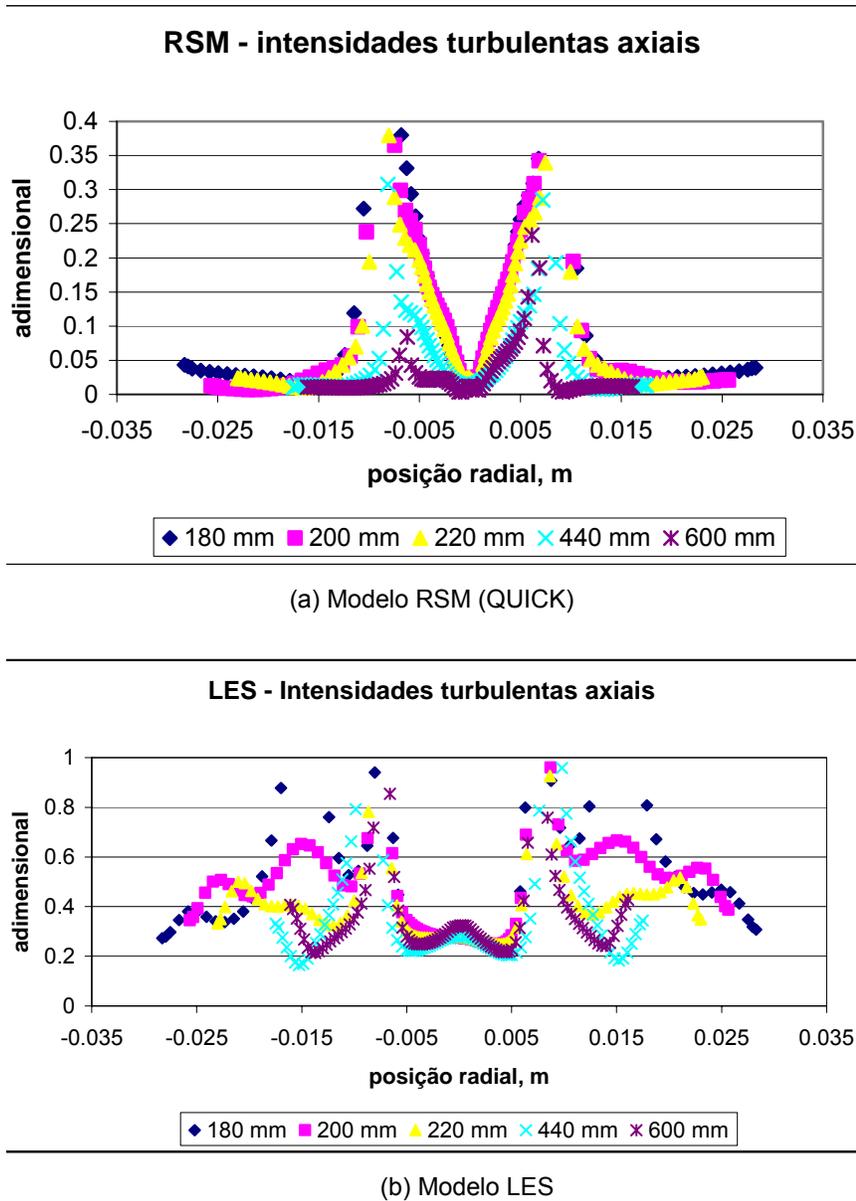


Figura 5.23: Intensidades turbulentas axiais obtidas com os modelos RSM e LES

Analisando esses resultados observa-se que os componentes radiais de velocidade (Fig. 5.24) possuem a mesma ordem de grandeza da flutuação turbulenta. Este resultado está de acordo com as observações experimentais, e por esta razão existe uma grande dificuldade de medir experimentalmente o componente radial de velocidade, o qual apresenta a mesma tendência de distribuição radial que aceleração centrífuga (Fig. 5.13)..

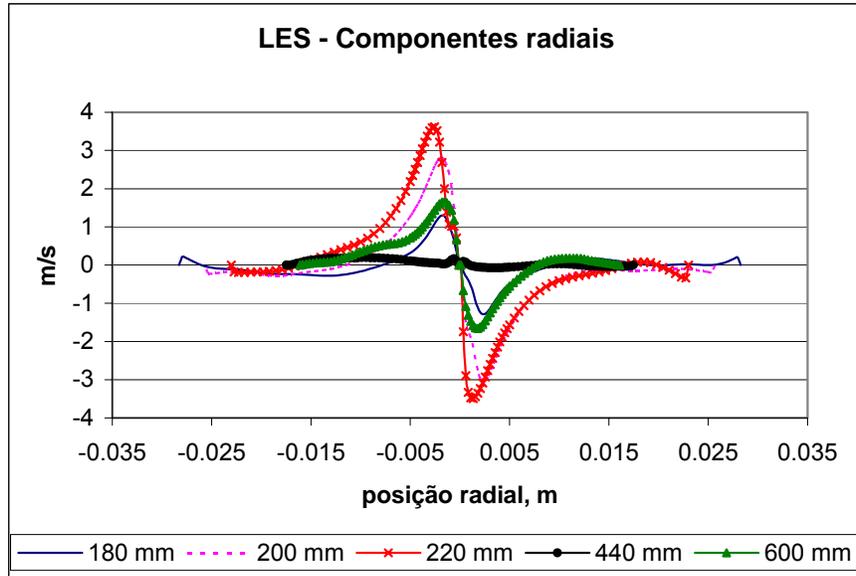


Figura 5.24: Perfis de velocidade radial em diferentes posições axiais.