5 Resultados

Os resultados obtidos nas simulações numéricas serão apresentados neste capítulo. Inicialmente serão apresentados os resultados das simulações realizadas para o regime laminar considerando só o mecanismo de deposição por difusão molecular. Compara-se os resultados obtidos com os dados experimentais de Leiroz (2004) e com os dados numéricos obtidos por Romero (2005), que utilizou um modelo de difusão molecular simplificado, obtido ao impor um campo parabólico de velocidade na seção transversal do canal. Na seção seguinte, ainda para o regime laminar, analisa-se a influência da consideração dos dois mecanismos de deposição: difusão molecular e difusão browniana. Na seção final apresenta-se os dados obtidos com as simulações para o regime turbulento (Re=4000), na presença do mecanismo de difusão molecular.

Visando comparar os resultados das simulações realizadas utilizando os dois modelos com os dados experimentais obtidos por Leiroz (2004) para o regime laminar de escoamento, utilizou-se exatamente as mesmas configurações e condições que as utilizadas no aparato experimental.

Como descrito no Capítulo 3, considerou-se um domínio computacional bidimensional, o qual encontra-se ilustrado na Fig. 3.1a. Para a mistura considerada a TIAC é igual a 36,0 °C. Como condição inicial, determinou-se o campo de velocidade e temperatura ao ingressar uma mistura com concentração de 0,1 de parafina dissolvida, com perfil de velocidade uniforme e temperatura de 40^oC, sendo a parede de cobre igual aos mesmos quarenta graus. A análise do processo de deposição se inicia ao reduzir abruptamente a temperatura da parede de cobre para 15^oC. Para o regime de escoamento laminar, investigou-se quatro números de Reynolds diferentes: 366, 516, 688 e 856.

Após a realização de um teste de malha, utilizou-se uma malha de 116×108 nas direções transversal e axial, respectivamente. A malha foi selecionada de forma a atender um compromisso entre precisão e tempo de processamento. Para a malha selecionada, o passo de tempo foi definido de forma a obter solução independente do mesmo. O passo de tempo utilizado foi igual a 6×10^{-4} segundos.

5.1. Modelo de Difusão Molecular

A Figura 5.1 apresenta a distribuição espacial e temporal do depósito de parafina, considerando o número de Reynolds igual a 366. A ordenada representa a espessura do depósito de parafina normalizada pela altura do canal *a*. A abscissa representa a coordenada axial do canal adimensionalizada pelo comprimento *L* da seção de teste (parede de cobre). A origem de coordenadas do canal encontra-se no início da parede de cobre. Devido a esta escolha a parede adiabática, que representa a parede do acrílico, é posicionada antes da parede de cobre, iniciando na coordenada negativa de -0,14. As linhas contínuas correspondem aos dados numéricos e os símbolos aos dados experimentais de Leiroz (2004). Os símbolos e as linhas contínuas representados em cores, correspondem a diferentes instantes de tempo, após o resfriamento da parede de cobre.

Analisando a Fig. 5.1, observa-se razoável concordância entre os dados medidos e os previstos para o depósito de parafina, no regime permanente. Esta concordância pode ser considerada boa, principalmente ao levar-se em conta as incertezas experimentais reportadas no trabalho de Leiroz (2004). No entanto, para o regime transiente, o mesmo nível de concordância entre os dados numéricos e experimentais não é obtido. De fato, a discrepância é grande para os primeiros instantes de tempo após início do resfriamento. Observa-se que para cada um dos instantes de tempo mostrados na figura a tendência da curva é semelhante. Isto é, observa-se um forte aumento da espessura do depósito no começo da placa de cobre, assintotizando para um valor constante ao longo do canal. Porém, para atingir o valor assintótico, observa-se que um aumento gradativo dos dados medidos, enquanto que as previsões indicam que após o incremento na entrada, ocorre uma diminuição na espessura do depósito na direção da saída do canal. Próximo à entrada, os dados experimentais são inferiores à previsão numérica, porém a situação se inverte no final do canal. Observa-se que o ponto onde os dados numéricos cruzam a curva experimental ocorre mais a jusante à medida que o tempo aumenta. É interessante que as discrepâncias entre os valores assintóticos do depósito no final do canal diminuem com o aumento do tempo. Como já comentado, observa-se a melhor concordância entre os dados para a condição de regime permanente.



Figura 5.1: Espessura da deposição de parafina no regime transiente para **Re**=366

Ao analisar a Fig. 5.1, observa-se que a tendência mostrada pelos perfis de deposição preditos pela simulação numérica tem coerência física e concorda com o comportamento esperado para o mecanismo de deposição por difusão molecular adotado. De fato, é esperado que depois do início do processo de resfriamento, um forte gradiente transversal de temperatura prevaleça na posição axial onde se inicia a parede de cobre (x = 0,0). Isto ocorre, devido a fina camada limite térmica existente naquela posição. Como a solubilidade é uma função decrescente da temperatura, um alto gradiente da concentração também ocorre na posição inicial, induzindo a um alto fluxo de parafina em direção à parede. Conforme a mistura escoa ao longo do canal, os gradientes de temperatura e concentração diminuem, produzindo uma diminuição no fluxo de parafina em direção à parede, conseqüentemente, a quantidade de depósito é menor, resultando em uma menor espessura de parafina depositada em relação ao começo do canal. Esta tendência pode ser verificada ao analisar os perfis de temperatura apresentados na Fig. 5.2. Nesta figura os perfis de temperatura são apresentados para três posições axiais (x/L=0,2; x/L=0,53; x/L=0,87) superpostos no perfil de deposição de parafina. As Figs. 5.2a a 5.2d correspondem aos instantes de tempo iguais a 1, 3 e 5 minutos após iniciar o resfriamento da parede de cobre e para o regime permanente, respectivamente. Juntamente com cada um dos perfis o valor da temperatura inicial de aparecimento de cristais de parafina (TIAC) encontra-se indicado. Observa-se que para cada instante de tempo, o gradiente de temperatura diminui a medida que se caminha em direção a saída do canal. Observa-se ainda através de uma comparação da magnitude relativa dos gradientes de temperatura para as mesmas posições axiais e instantes de tempo diferentes, que os gradientes são menos acentuados a medida que se aproxima do regime permanente. Quando a temperatura da interface atinge a TIAC, o regime permanente é obtido, pois a espessura da deposição não cresce mais.

A redução no gradiente de temperatura induz a uma redução no fluxo de massa em direção à parede, como pode ser observado pelo gradiente de concentração apresentado na Fig. 5.3, para os mesmos instantes de tempo e coordenadas axiais que os perfis de temperatura da Fig. 5.2. A medida que tempo aumenta, o gradiente de concentração da mistura diminui, i.e., ocorre um decréscimo do fluxo mássico na interface, até não haver mais depósito e o regime permanente ser então obtido. Os perfis de concentração apresentam as mesmas tendências mostradas nos perfis de temperatura.



(d) regime permanente

Figura 5.2: Perfil de temperatura para três diferentes posições axiais no canal e para quatro intervalos de tempo diferentes após iniciar o resfriamento, para **Re**=366. (a) 1 minuto, (b) 3 minutos, (c) 5 minutos e (d) regime permanente.



Figura 5.3: Perfil de concentração da mistura para três diferentes posições axiais no canal e para quatro intervalos de tempo diferentes após iniciar o resfriamento, para
Re=366. (a) 1 minuto, (b) 3 minutos, (c) 5 minutos e (d) regime permanente.

O fato de que os perfis de deposição medidos e previstos se afastam uns dos outros a partir de um certo valor da coordenada axial, apesar das predições parecerem fisicamente plausíveis como discutido no parágrafo anterior, pode ser uma indicação de que a difusão molecular como mecanismo base para a predição da deposição não é muito adequado. De fato, pode-se observar que a espessura de deposição medida é sempre maior que a prevista nas simulações. Isto pode indicar a ausência da ação de outro mecanismo de deposição além da difusão molecular.

Uma segunda análise dos perfis de temperatura da Fig. 5.2 dá suporte a esta afirmação. Em cada perfil de temperatura apresentado, uma linha auxiliar vertical foi traçada no valor de 36,0°C, representando a temperatura inicial de aparecimento de cristais de parafina (TIAC). Para o caso de 1 minuto após o início do resfriamento da parede mostrada na Fig. 5.2a, pode verificar-se que uma parte do fluido perto da interface da deposição de parafina encontra-se embaixo da TIAC, conforme a posição axial aumenta ficando perto da saída do canal, a temperatura da interface encontra-se a uma temperatura menor ainda da TIAC. Para grandes intervalos de tempo após o início do resfriamento a região de temperatura embaixo da TIAC é menos pronunciada, como pode ser analisado na Figs. 5.2b e 5.2c. No regime permanente, Fig. 5.2d, não se encontra nenhuma região de temperatura embaixo da TIAC. Analisando os perfis de espessura de depósito, Fig. 5.1, percebe-se que deve existir uma relação entre a magnitude das regiões da temperatura embaixo da TIAC e o afastamento dos dados experimentos dos dados da predição. É razoável admitir que o grau de subresfriamento necessário para a nucleação dos cristais de parafina na solução é atingido nestas regiões próximas da superfície de deposição, levando a formação de cristais na forma de cristais sólidos suspensos que podem ser agregados ao depósito devido a um mecanismo de transporte lateral como a difusão browniana.

As soluções numéricas obtidas também fornecem informações do campo da velocidade ao longo do canal. Estes dados são apresentados na Fig. 5.4a a 5.4d, sendo a velocidade adimensionalizada com a velocidade uniforme da entrada no canal. Uma análise cuidadosa das quatro figuras permite observar uma aceleração do perfil de velocidade induzido pelo decréscimo da área na seção transversal devido à deposição, que inviabiliza a obtenção do regime totalmente desenvolvido. Esta aceleração é mais evidente no regime permanente onde a camada de deposição de parafina é maior.



(d) regime permanente

Figura 5.4: Perfil de velocidade para três diferentes posições axiais no canal e para quatro intervalos de tempo diferentes após iniciar o resfriamento, para **Re**=366. (a) 1 minuto, (b) 3 minutos, (c) 5 minutos e (d) regime permanente.

A Figura 5.5 ilustra o campo de temperatura no domínio, para o caso de número de Reynolds igual a 366, para o instante igual a 3 minutos e para o regime permanente. O campo de temperatura da mistura é praticamente uniforme. Já na camada de depósito, o perfil de temperatura é governado pela condução através da parafina sólida. Para facilitar a visualização a escala vertical foi ampliada por um fator igual a 10.

As linhas de corrente são ilustradas ao longo do domínio computacional na Fig. 5.6. Observe que as linhas de corrente encontram-se uniformemente distribuídas, logo, próximo ao centro do canal, devido a proximidade de duas linhas consecutivas, a velocidade axial é maior. Note também, a existência de um componente de velocidade na direção, uma vez que as linhas de corrente apresentam curvatura acompanhando a fronteira do depósito.





Figura 5.5: Campo de temperatura, **Re**=366. (a) 3 minutos, (b) regime permanente.





Figura 5.6: Linhas de corrente, **Re**=366. (a) 3 minutos, (b) regime permanente.

Pode-se observar nos resultados apresentados anteriormente, que um pequeno depósito foi obtido, numericamente, em posições axiais anteriores ao início do resfriamento (x < 0), em discordância com os dados experimentais. Esta discrepância pode ser atribuída a um erro numérico de difusão artificial, devido a forte curvatura da interface do depósito no início do mesmo. Vale ressaltar no

entanto, que a espessura do depósito para x < 0 é muito pequena, não compromentendo a análise.

Para o caso do número de Reynolds de 516, a evolução da espessura de depósito ao longo do canal é ilustrada na Fig. 5.7. Observa-se um comportamento análogo ao discutido para o número de Reynolds mais baixo. Neste caso, observa-se um maior espalhamento dos dados experimentais, com pontos de descontinuidade da espessura do depósito, especialmente após 1 minuto do início do resfriamento. Observa-se também para o regime permanente, um aumento significativo da espessura de depósito medida para x=0,25. A predição não acompanha esta tendência, apresentando uma curva suave, com uma discrepância maior com relação aos dados experimentais. Observa-se também que a espessura de depósito obtida numericamente é mais uniforme ao longo do canal.



Figura 5.7: Espessura da deposição de parafinas no regime transiente para Re=516.

As Figuras 5.8, 5.9 e 5.10 apresentam os perfis de temperatura, concentração e velocidade, respectivamente, para **Re**=516, para diferentes posições axiais e instantes de tempo. Observa-se as mesmas tendências dos gráficos para o regime laminar do escoamento com Reynolds de 366. O regime permanente é obtido quando a temperatura da interface atinge o valor da TIAC. A espessura do depósito é menor nas regiões de sub-resfriamento.



Figura 5.8: Perfil de temperatura para três diferentes posições axiais no canal e para quatro intervalos de tempo diferentes após iniciar o resfriamento, para Re=516.
(a) 1 minuto, (b) 3 minutos, (c) 5 minutos e (d) regime permanente.



Figura 5.9: Perfil de concentração da mistura para três diferentes posições axiais no canal e para quatro intervalos de tempo diferentes após iniciar o resfriamento, para
Re=516. (a) 1 minuto, (b) 3 minutos, (c) 5 minutos e (d) regime permanente.



(d) regime permanente

Figura 5.10: Perfil de velocidade para três diferentes posições axiais no canal e para quatro intervalos de tempo diferentes após iniciar o resfriamento, para Re=516.
(a) 1 minuto, (b) 3 minutos, (c) 5 minutos e (d) regime permanente.

Para o caso do número de Reynolds de 688, os gráficos ilustrados nas Figuras 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14 apresentam as mesmas tendências para a espessura de depósito, perfis de temperatura, concentração e velocidade que no caso do número de Reynolds de 366.



Figura 5.11: Espessura da deposição de parafinas no regime transiente para Re=688.



Figura 5.12: Perfil de temperatura para três diferentes posições axiais no canal e para quatro intervalos de tempo diferentes após iniciar o resfriamento, para Re=688.
(a) 1 minuto, (b) 3 minutos, (c) 5 minutos e (d) regime permanente.



Figura 5.13: Perfil de concentração da mistura para três diferentes posições axiais no canal e para quatro intervalos de tempo diferentes após iniciar o resfriamento, para **Re**=688. (a) 1 minuto, (b) 3 minutos, (c) 5 minutos e (d) regime permanente.





Já para o caso do número de Reynolds de 856, as predições apresentam uma deposição maior que a dos experimentos, como mostra a Fig. 5.15, devido ao efeito do cisalhamento, que com o número de Reynolds mais elevado torna-se

importante. As Figs. 5.16, 5.17 e 5.18 apresentam os perfis de temperatura, concentração e velocidade, para **Re**=856, para diferentes posições axiais e instantes de tempo. Observa-se as mesmas tendências apresentadas e discutidas para o caso do número de Reynolds de 366.



Figura 5.15: Espessura da deposição de parafinas no regime transiente para Re=856 .







Figura 5.17: Perfil de concentração da mistura para três diferentes posições axiais no canal e para quatro intervalos de tempo diferentes após iniciar o resfriamento, para **Re**=856. (a) 1 minuto, (b) 3 minutos, (c) 5 minutos e (d) regime permanente.



Figura 5.18: Perfil de velocidade para três diferentes posições axiais no canal e para quatro intervalos de tempo diferentes após iniciar o resfriamento, para Re=856.
(a) 1 minuto, (b) 3 minutos, (c) 5 minutos e (d) regime permanente.

A Fig. 5.19 apresenta uma comparação do perfil do depósito para os diferentes números de Reynolds. Observa-se que conforme aumenta o número de

Reynolds a quantidade de parafina depositada diminui, isto é, quando há maior movimentação nos fluidos, o Reynolds é maior, levando as partículas de parafina que estão por depositar-se para longe da interface. A mesma tendência apresenta os dados experimentais. Para o regime permanente de Re=856 a deposição predita é maior que a deposição experimental, neste caso deve existir um mecanismo de remoção por cisalhamento.



Figura 5.19: Comparação experimental e numérica, da espessura da deposição da parafina no regime permanente, para diferentes Reynolds.

A Figura 5.20 ilustra uma comparação entre o presente modelo e o modelo utilizado por Romero (2005), para **Re**=516. Observa-se uma grande diferença entre as espessuras previstas de depósito durante o transiente, indicando que a utilização de um perfil parabólico ao longo da seção transversal não é satisfatório. Uma significativa melhora foi obtida com o presente modelo que resolve as equações de conservação de massa e quantidade de movimento juntamente com a equação de conservação de energia e conservação da parafina dissolvida.



(a) Modelo de difusão molecular, com campo de velocidade imposto (Romero, 2005)



(b) Campo de velocidade determinado

Figura 5.20: Comparação experimental e numérica, da espessura da deposição da parafina no regime permanente, para diferentes Reynolds. (a) Campo de velocidade imposto (Romero, 2005). (b) Campo de velocidade determinado.

5.2. Modelo do Movimento Browniano com a Difusão Molecular

As Figuras 5.21 e 5.22 apresentam os resultados obtidos para a deposição da parafina considerando o mecanismo de difusão molecular juntamente com o mecanismo de difusão browniana, para o número de Reynolds igual 366. A Figura 5.21 apresenta o perfil do depósito ao longo do eixo axial, para diferentes instantes de tempo. Observa-se pequena influência no perfil do depósito, o que pode ser explicado pelo fato de que o coeficiente de difusão browniano é muito pequeno, sendo 5000 vezes menor (o diâmetro da partícula criada é de 1µm) que o coeficiente de difusão molecular.



Figura 5.21: Espessura da deposição de parafinas para o mecanismo de deposição de difusão molecular e para o mecanismo de difusão browniano e difusão molecular, para **Re**=366

Os perfis de velocidade, concentração da mistura e temperatura são muito semelhantes aos perfis apresentados para quando atua somente a difusão molecular, Figs. 5.2 a 5.4.

A Fig. 5.22 apresenta os perfis da concentração da parafina sólida fora da

solução, em percentagem de massa (kgsoluto/kgsolução). Os resultados obtidos apresentam o mesmo comportamento que os resultados obtidos por Burger(1981), onde a concentração máxima encontra-se numa região entre o eixo de simetria do duto e a interface de deposição.

Como já mencionado, uma condição para a formação de cristais é que a temperatura se encontre abaixo da TIAC. Para os instantes de tempo iniciais, Fig. 5.22a, o fluido que escoa perto da interface encontra-se a uma temperatura muito baixa, induzindo uma maior supersaturação do meio, criando maior quantidade de cristais sólidos fora da solução. Observa-se também que à medida que o tempo passa, a temperatura da mistura próxima a superfície aumenta, reduzindo a taxa de formação de cristais sólidos fora da solução. Após 3 minutos do início do resfriamento (Fig. 5.22b) observa-se que na coordenada próxima a entrada do canal, quase não existe formação de cristais de parafina fora da solução porque a temperatura do fluido perto da interface encontra-se perto da temperatura da TIAC, não existindo possibilidade de formação de mais cristais. O mesmo acontece na Fig. 5.22c. Quando a temperatura da interface se iguala a TIAC, Fig. 5.22d, o regime permanente se estabelece, não ocorre mais formação de cristais, nem deposição. Observa-se para todos os instantes de tempo que, como a região com temperatura abaixo da TIAC cresce em direção a saída do canal, existe um aumento da concentração de partículas nesta direção.

Uma vez que os resultados obtidos com a combinação do mecanismo de difusão browniana e molecular são muito semelhantes aos resultados obtidos na ausência da difusão browniana, pode-se concluir que este mecanismo não é muito importante.

O valor da difusão browniana depende de diversos fatores, entre eles o diâmetro da partícula, o qual não é fácil de ser estimado. Conseqüentemente existe uma incerteza muito grande na determinação deste coeficiente. Visando investigar a influência do coeficiente de difusão browniana na solução, apresenta-se na Fig. 5.23 a evolução da frente de depósito utilizando um coeficiente de difusão de partículas 500 vezes maior. Observa-se um aumento na espessura do depósito para as coordenadas axiais maiores, quando se compara com o caso sem difusão browniana. Para o instante de tempo igual a 1 min, a tendência da curva prevista numericamente se aproxima bastante dos dados experimentais.



(d) regime permanente

Figura 5.22: Perfil de concentração da parafina fora da solução para três diferentes posições axiais no canal e para quatro intervalos de tempo diferentes após iniciar o resfriamento, para **Re**=856. (a) 1 minuto, (b) 3 minutos, (c) 5 minutos e (d) regime permanente.



Figura 5.23: Espessura da deposição de parafinas para o mecanismo de deposição de difusão molecular e para o mecanismo de difusão browniano e difusão molecular, para **Re**=366. Com o coeficiente de difusão browniano aumentado.

5.3. Modelo de Deposição por Difusão para o Regime Turbulento

A influência do regime de escoamento na taxa de deposição da parafina é investigada utilizando-se o número de Reynolds igual a 4000. Neste caso, considerou-se somente o mecanismo de difusão molecular.

A Fig. 5.24 apresenta a distribuição espacial e temporal da deposição de parafina. Pode-se verificar que o regime permanente é mais rapidamente alcançado. Adicionalmente, o perfil de deposição ao longo do canal é mais uniforme para todos os instantes de tempo. Diferentemente do caso em regime laminar, não se observa uma diminuição na espessura de deposição próximo a saída do canal. O perfil mais uniforme de depósito ao longo do canal pode ser atribuído à maior quantidade de movimento do regime turbulento, pois os cristais que iriam ser depositados na interface são levados pelo fluido, sendo depositados mais a jusante.





Os perfis de temperatura e concentração de parafina dissolvida na solução são apresentados nas Figs. 5.25 e 5.26, para as mesmas coordenadas axiais utilizadas para analisar os resultados anteriores. Observa-se que a região com temperatura abaixo da TIAC é muito pequena, como conseqüência pouco depósito é formado. Observa-se também que rapidamente o regime permanente é obtido com a temperatura da interface igual a TIAC e com concentração na interface igual a 0,1.



Figura 5.25: Perfil de temperatura para três diferentes posições axiais no canal e para quatro intervalos de tempo diferentes após iniciar o resfriamento, para Re=4000.
(a) 1 minuto, (b) 3 minutos, (c) regime permanente.



Figura 5.26: Perfil de concentração da mistura para três diferentes posições axiais no canal e para três intervalos de tempo diferentes após iniciar o resfriamento, para Re=4000. (a) 1 minuto, (b) 3 minutos, (c) regime permanente.

Resultados

A Fig. 5.27 apresenta os perfis da velocidade axial ao longo da seção transversal nas mesmas três coordenadas axiais utilizadas anteriormente. Nota-se claramente, que o perfil obtido é mais achatado que para o regime de escoamento laminar. O gradiente de velocidade é acentuado próximo à interface e aproximadamente uniforme na região central do canal. Como mencionado as altas velocidades encontradas próximo à interface induzem a temperaturas mais altas, próximas à TIAC, inibindo a deposição.



(c) regime permanente

Figura 5.27: Perfil de velocidade para três diferentes posições axiais no canal e para quatro intervalos de tempo diferentes após iniciar o resfriamento, para Re=4000.
(a) 1 minuto, (b) 3 minutos, (c) regime permanente.

As Figs. 5.28 e 5.29 apresentam a distribuição de grandezas turbulentas ao longo do canal. A Fig. 5.28 corresponde aos perfis de energia cinética turbulenta e a Fig. 5.29 corresponde a sua taxa de dissipação. Observa-se como esperado um aumento significativo da energia cinética turbulenta, assim como de sua taxa de dissipação próximo à superfície sólida, i.e., interface do depósito da parafina, onde as taxas de cisalhamento são mais elevadas.



(c) regime permanente

Figura 5.28: Perfil da energia cinética turbulenta para três diferentes posições axiais no canal e para três intervalos de tempo diferentes após iniciar o resfriamento, para Re=4000. (a) 1 minuto, (b) 3 minutos, (c) regime permanente.





Figura 5.29: Perfil da dissipação de energia para três diferentes posições axiais no canal e para três intervalos de tempo diferentes após iniciar o resfriamento, para Re=4000.
(a) 1 minuto, (b) 3 minutos, (c) regime permanente.

Visando complementar as informações já analisadas, apresenta-se nas Figs. 5.30 a 5.33 os campos de temperatura, linhas de corrente, energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação para **Re**=4000, para 1 minuto após o início do resfriamento e após atingir o regime permanente. Assim como no caso laminar, observa-se que a temperatura da mistura é praticamente uniforme, Fig. 5.30, sendo que no regime turbulento, devido aos gradientes mais elevados junto a interface do depósito, o gradiente no fluido é ainda menor. Como mencionado a espessura

final do depósito é bem pequena. Devido a pequena espessura do depósito, as linhas de corrente são quase paralelas (Fig. 5.31), desde o início do resfriamento até atingir o regime permanente.

As Figs. 5.32 e 5.33 correspondem as grandezas turbulentas, energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação. Para facilitar a visualização a escala vertical foi ampliada por um fator igual a 10. Os campos das duas grandezas são análogos. Observa-se altos valores das duas grandezas próximo à entrada devido ao desenvolvimento do escoamento, uma vez que a velocidade na entrada é uniforme. Altos valores também são observados junto a superfície sólida da parafina, onde existe geração de turbulência devido ao atrito viscoso.



(b) regime permanente

Figura 5.30: Campo de temperatura, **Re**=4000. (a) 1 minuto, (b) regime permanente.









Figura 5.32: Campo de energia cinética turbulenta, **Re**=4000. (a) 1 minuto, (b) regime permanente.



(b) regime permanente

Figura 5.33: Campo de dissipação de energia cinética turbulenta, **Re**=4000. (a) 1 minuto, (b) regime permanente.