

## 5 Resultados

Neste capítulo o fenômeno de deposição é avaliado na presença do escoamento turbulento. Conforme descrito anteriormente, o presente estudo é realizado concomitantemente a um estudo experimental em condições análogas pelo Grupo de Engenharia de Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Dessa forma, é possível avaliar a qualidade dos modelos propostos, tanto para modelar o fenômeno da deposição quanto para a turbulência.

No Capítulo 1 foram descritos detalhes do aparato experimental desenvolvido por Veiga (2017), o qual foi reproduzido numericamente. A Tabela 5.1 resume as principais dimensões da seção de testes simulada.

Tabela 5.1: dimensões da bancada de ensaios.

	<b>Dimensão (mm)</b>
Raio interno do setor anular – $R_{in}$	9,525
Raio externo do setor anular – $R_e$	20,000
Espessura da parede de acrílico, $e_{acr}$	0,300
Comprimento da seção de testes	1050

Dois fluidos diferentes foram utilizados.

- 1) Uma solução de 80% de parafina comercial com 20% em massa de parafina comercial, o mesmo utilizado por Souza (2014), que passaremos a chamar de “querosene com parafina”, e
- 2) uma solução de 80% em massa de dodecano ( $C_{12}$ ) com 20% em massa de parafina purificada ( $C_{22}$  a  $C_{39}$ ), que passaremos a chamar de “fluido puro”.

As propriedades de ambos os fluidos são dadas pelas características físicas e térmicas de cada um dos seus componentes. O Apêndice A1 do presente trabalho resume em tabelas a composição e os dados dos constituintes de cada um dos fluidos, apresentando detalhes específicos referentes às propriedades de cada fluido, as quais são necessárias para as simulações. As rugosidades das superfícies da parede de acrílico e da parede cobre foram

estimadas em 0,005 mm de altura.

Conforme apresentado no Capítulo 4, a presente modelagem foi introduzida no código desenvolvido pelo Grupo de Dinâmica dos Fluidos Computacional do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio (Souza, 2014) correspondendo ao modelo Entalpia-Porosidade. Como o programa original foi desenvolvido para resolver as equações de conservação em coordenadas cartesianas e em regime laminar, a primeira etapa deste trabalho, consistiu em uma etapa de validação, a qual pode ser encontrada no Apêndice A2. A etapa de validação consistiu de três fases:

(1) validação da solução das equações de conservação sem deposição no regime laminar em coordenadas cilíndricas. Comparação com solução exata na região de escoamento desenvolvido;

(2) validação da solução das equações de conservação sem deposição no regime turbulento em coordenadas cilíndricas. Comparação com resultados do *software* comercial FLUENT; e

(3) validação da solução das equações de conservação com deposição no regime laminar em coordenadas cilíndricas. Comparação com dados experimentais obtidos no Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Outra etapa fundamental que foi realizada e encontra-se descrita no Apêndice A3 corresponde ao teste de malha e de passo de tempo. Estes testes foram realizados tanto para o escoamento no regime laminar quanto para o regime turbulento, na presença do fenômeno de deposição. Em ambos os casos uma malha com distribuição axial x radial de 77 x 62 pontos distribuídos de forma não uniforme foi selecionada, uma vez que convergência de malha foi obtida. A variável utilizada para este estudo foi a distribuição axial e temporal do depósito. Com relação ao passo de tempo, verificou-se que para o querosene com parafina a 20%, o passo de tempo 0,02 s é adequado. Para o fluido puro, o passo de tempo foi fixado em 0,01 s.

Uma vez que as etapas anteriores foram realizadas com sucesso, apresenta-se a seguir resultados de simulações na presença do regime turbulento.

Inicialmente, a comparação dos resultados numéricos e experimentais da evolução espacial e temporal do depósito é realizada. Neste caso, somente uma experiência encontrava-se disponível, a qual foi realizada com o fluido puro. Três modelagens da turbulência na região do depósito foram consideradas: na primeira, utilizou-se a proposta de Pedras & Lemos (2001), na segunda considerou-se os termos adicionais nas equações de  $\kappa$  e  $\omega$  derivados do

escoamento em meio poroso (Apêndice A4) e na terceira seguiu-se a recomendação de Antohe & Lages (1997), i.e., desprezou-se a turbulência na região do depósito.

Como etapa seguinte, avalia-se a influência do número de Reynolds no processo de deposição, comparando-se a solução obtida com diferentes números de Reynolds no regime turbulento, e com os dados de regime laminar.

Uma das vantagens da solução numérica é a disponibilidade dos campos de todas as grandezas envolvidas no processo de interesse. A visualização dos campos de temperatura, velocidade, concentração das espécies, etc. auxilia a interpretar o escoamento. Uma vez que a seção de testes possui razão de aspecto baixa, para apresentar o campo de qualquer grandeza no interior do domínio, a escala foi alterada de forma a facilitar a avaliação da variável de interesse. Define-se ainda a altura do canal  $y=R-R_{in}$ .

## 5.1 Comparação com Dados Experimentais

Com três descrições possíveis para representar a turbulência do escoamento na região do depósito, faz-se necessário confrontar as previsões obtidas para a espessura do depósito com dados experimentais de forma a decidir qual dos modelos representa melhor o escoamento. Um experimento foi realizado utilizando como fluido de trabalhado o fluido puro.

Conforme apresentado no Capítulo 3, a permeabilidade do meio  $K$  depende da constante  $C$ , Eq. (3.7), a qual depende da morfologia do meio. Esta constante pode ser ajustada com os dados experimentais para permitir representar melhor a sua influência no escoamento. Para todos os casos analisados nesta seção, a constante  $C$  foi mantida igual  $10^9 \text{ m}^{-2}$ , dado que permitia o melhor ajuste para espessura do depósito em ensaios laminares. Para o modelo III, que despreza a turbulência dentro do gel, adotou-se como depósito aquelas regiões do domínio cuja saturação de sólido é igual ou superior a 2%.

A avaliação da espessura do depósito obtida a partir das simulações numéricas utilizando as três modelagens de turbulência para a região do depósito, foi realizada utilizando-se uma vazão de bomba igual a  $3,22 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ , cujo número de Reynolds equivale a 4098. As temperaturas na entrada e na parede externa de acrílico foram mantidas iguais a  $38^\circ\text{C}$ .

Visando reproduzir o procedimento experimental, para iniciar a simulação, primeiro determinam-se numericamente os campos de velocidade, pressão,

temperatura e espécies escoando em regime permanente, com toda a seção de teste aquecida, de forma análoga ao procedimento experimental. O experimento começa com o resfriamento do tubo de cobre (duto interno da seção de testes) através do bombeio de água fria. A temperatura da parede de cobre,  $r = R_{in}$ , foi medida experimentalmente. Observou-se uniformidade ao longo do comprimento axial do duto, porém, a parede de cobre não resfria instantaneamente; a temperatura decai ao longo do tempo conforme a água fria escoar pelo tubo. A variação temporal da parede fria,  $T_s(t)$ , é uma função do tempo cuja expressão pode ser obtida através da regressão de dados experimentais, Eq. 5.1, sendo a temperatura em Kelvin e o tempo em segundos. A Fig. 5.1 apresenta a evolução temporal da temperatura na parede interna medida experimentalmente, juntamente com a rampa utilizada para a simulação do escoamento, indicando a boa qualidade do ajuste.

$$T_s(t) = \begin{cases} 311,15 - 1,467 t & 0 \leq t \leq 12 s \\ 293,59 - 0,002985 t & 12 \leq t \leq 900 s \\ 291,52 - 0,000685 t & 900 \leq t \leq 2520 s \\ 290,64 - 0,000337 t & 2520 \leq t \leq 4300 s \end{cases} \quad (5.1)$$

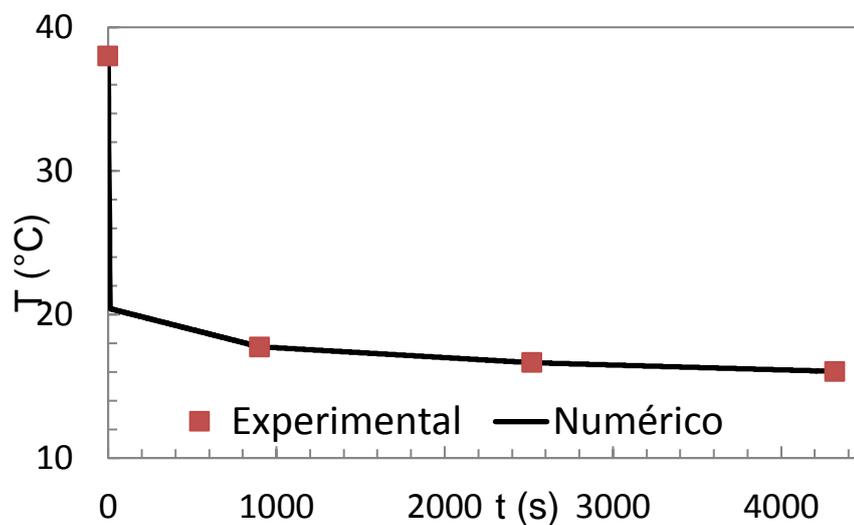


Figura 5.1: Variação da temperatura da parede de cobre com o tempo,  $T_s(t)$ . Ensaio com fluido puro e  $Re = 4098$ .

As Figs. 5.2 e 5.3 apresentam a evolução temporal e espacial da espessura do depósito ao longo do tubo de cobre. Na Fig. 5.2, as medidas experimentais são comparadas com os resultados numéricos obtidos com os modelos I e II de turbulência para a região do depósito. O modelo I corresponde a proposta de Pedras & Lemos (2001) e o modelo II corresponde ao modelo

desenvolvido neste trabalho para a região do depósito. Já a Fig. 5.3 apresenta a comparação com os dados experimentais do modelo III, no qual a turbulência na região do depósito é desprezada.

Analisando a Fig. 5.2, observa-se que os resultados das previsões numéricas obtidas com os modelos I e II apresentam um comportamento análogo e divergem dos dados experimentais. Por outro lado, observa-se na Fig. 5,3 que os resultados obtidos com o modelo III apresentam boa concordância com os dados experimentais. Note que os resultados dos modelos I e II não coincidem com nenhuma observação que tenha sido publicada, enquanto que bons resultados foram obtidos com o modelo III. Dessa forma, ambas as descrições matemáticas considerando a turbulência dentro do depósito (modelos I e II) foram descartadas.

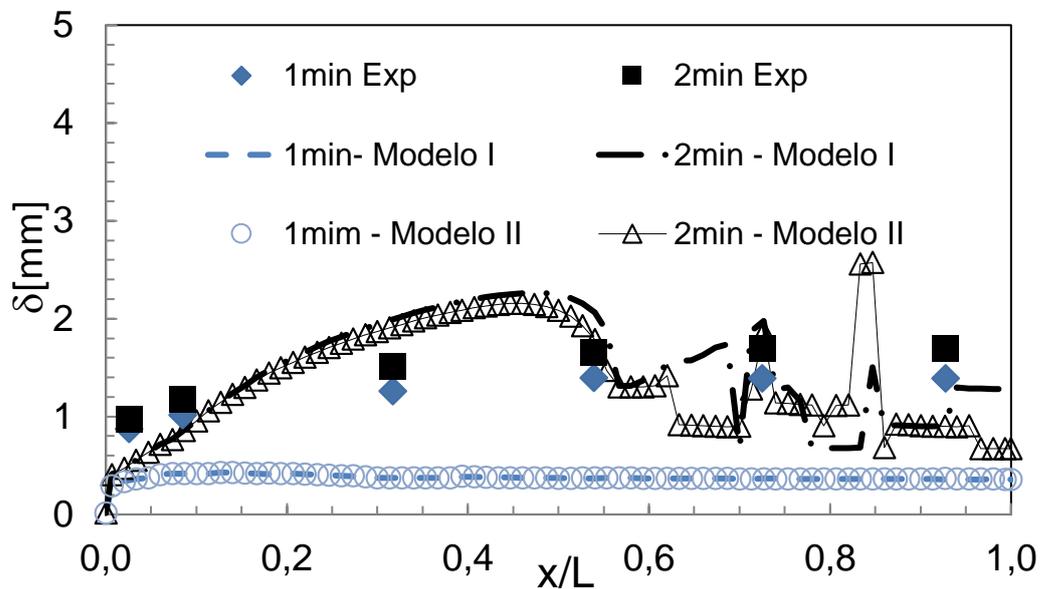


Figura 5.2: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito de parafina na parede de cobre após 1 min e 2 min de resfriamento. Comparação dos modelos de turbulência I e II com dados experimentais.

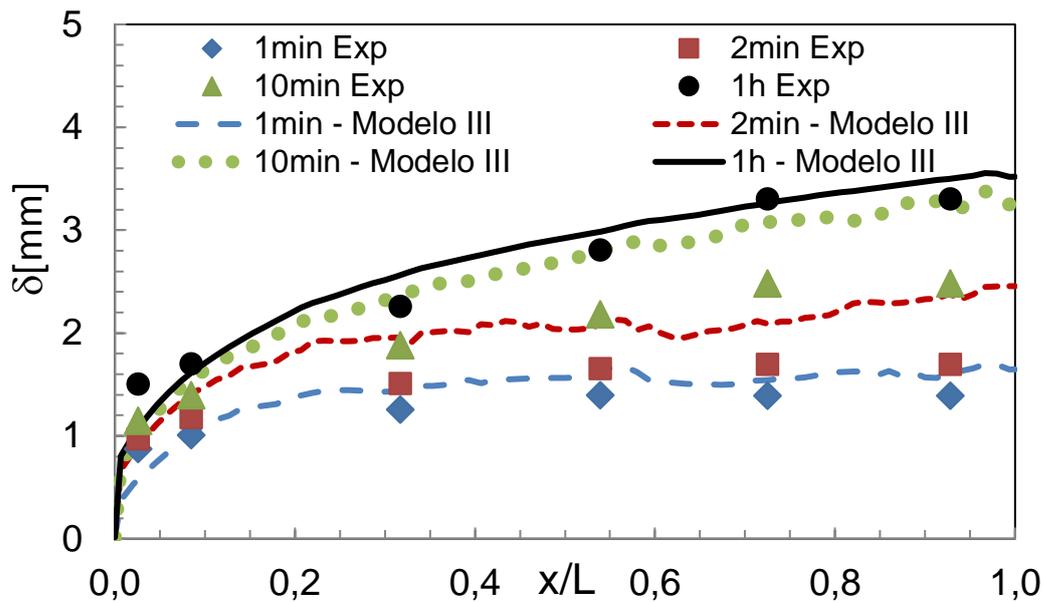


Figura 5.3: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito de parafina o tubo de cobre após 1 min, 2 min, 10 min e 1 h de resfriamento. Comparação do modelo de turbulência III com dados experimentais.

Analisando a Fig. 5.3, que apresenta dados correspondentes a 1 min, 2 min, 10 min e 1 h após o início do resfriamento, verifica-se que o modelo III, apesar dos resultados razoáveis, apresenta um transiente mais rápido, prevendo depósitos maiores que aqueles verificados experimentalmente. Já no regime permanente (aproximadamente após 1 h de resfriamento), uma boa concordância é obtida. Este tipo de comportamento tem sido observado sistematicamente nas análises de escoamento em regime laminar, quando o mecanismo de deposição é somente devido a difusão molecular. Este resultado indica que algum mecanismo significativo está faltando no modelo durante a fase transiente do processo.

Uma vez que os resultados obtidos podem ser considerados satisfatórios para o regime permanente, na seção seguinte, uma análise da influência do número de Reynolds na espessura do depósito no regime permanente é apresentada.

## 5.2 Influência do Número de Reynolds no Regime Permanente

Visando avaliar a influência do número de Reynolds no escoamento, três casos foram selecionados:  $Re=1260$ , correspondendo ao regime laminar, e  $Re=3500$  e  $6000$ , correspondendo ao regime turbulento.

Neste caso, utilizou-se como fluido de trabalho querosene com parafina a 20%, cuja solução para regime laminar vai validada com dados experimentais no Apêndice A2.3. A partir da análise apresentada na seção anterior, como modelo de turbulência para a região do depósito, utilizou-se o modelo III, isto é, desprezando a turbulência no depósito, considerando como tal a região do domínio com saturação de sólido acima de 2%.

As propriedades referentes ao querosene com parafina a 20% encontram-se detalhadas no Apêndice A1. O valor adotado para a constante C referente a morfologia do depósito foi  $C = 10^6 \text{ m}^{-2}$ , mesmo valor utilizado na etapa de validação com dados referentes ao regime laminar ( $Re=1260$ ).

As condições de contorno na entrada de velocidade, temperatura e a intensidade turbulenta (para os dois casos turbulentos) são resumidas na Tabela 5.2. Conforme já descrito, a temperatura da parede externa do acrílico é igual a temperatura da entrada do querosene com parafina a 20%. O mesmo procedimento para a obtenção da condição inicial hidrodinamicamente desenvolvida e isotérmica, descrita na seção anterior, foi empregada em todos os casos.

Tabela 5.2: Condição de contorno na entrada.

<b>Reynolds</b>	<b><math>U_{in}</math> (m/s)</b>	<b><math>T_{in}</math> (°C)</b>	<b>Intensidade Turbulenta</b>
1260	0,1496	37	-
3500	0,4152	37	5,8%
6000	0,7121	37	5,4%

Como descrito na seção anterior, a parede de cobre não resfria instantaneamente, mas sua temperatura depende de quanto tempo a água fria está escoando no tubo interno. A variação da temperatura da parede de cobre com o tempo  $T_s(t)$  utilizada para os três casos apresentados nesta seção, foi a mesma, tendo sido obtida a partir da regressão de dados experimentais, para o caso laminar, que serviu para a validação e foi apresentado no Apêndice A2. A Fig. 5.4 apresenta uma comparação da curva ajustada, dada pela Eq. 5.2, empregada no programa com os dados experimentais, mostrando que um bom ajuste foi obtido.

$$T_s(t) = \begin{cases} 311,15 - 1,467 t & 0 \leq t \leq 12 \text{ s} \\ 293,59 - 0,002985 t & 12 \leq t \leq 900 \text{ s} \\ 291,52 - 0,000685 t & 900 \leq t \leq 2520 \text{ s} \\ 290,64 - 0,000337 t & 2520 \leq t \leq 4300 \text{ s} \end{cases} \quad (5.2)$$

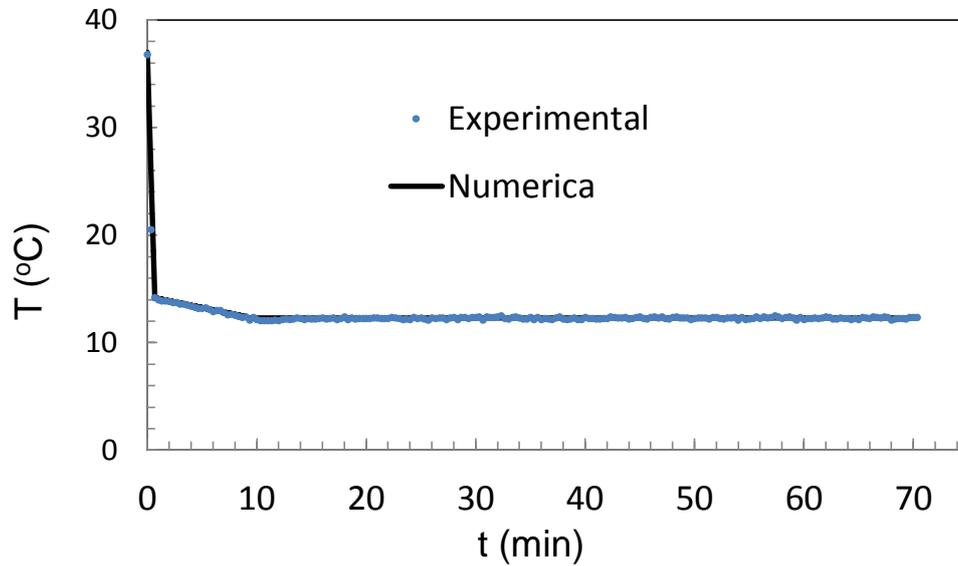


Figura 5.4: Variação da temperatura da parede de cobre com o tempo,  $T_s(t)$ . Querosene com parafina a 20%.

O primeiro aspecto a se comparar na Fig. 5.5 é a variação de espessura do depósito ao longo da seção de teste no regime permanente, com o número de Reynolds. Observa-se que a espessura do depósito em regime permanente decresce com o aumento do número de Reynolds, fato discutido exhaustivamente na Revisão Bibliográfica. Observa-se também que a espessura do depósito se torna mais uniforme axialmente à medida que o número de Reynolds aumenta.

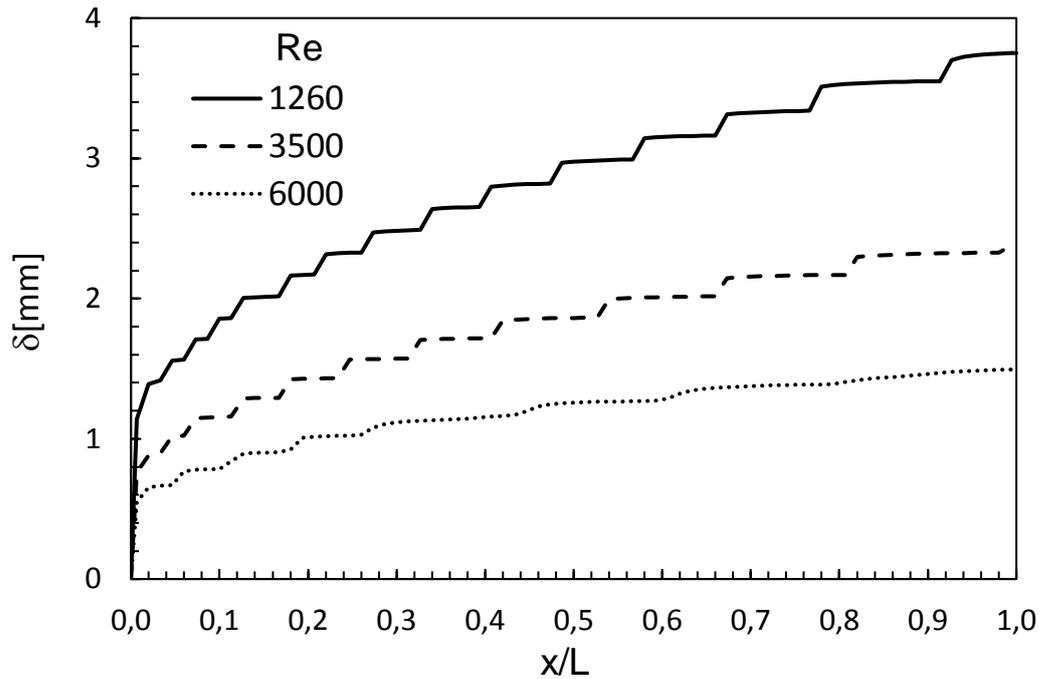


Figura 5.5: Espessura do depósito em regime permanente. Re= 1260, 3500 e 6000.

O comportamento da variação da espessura com o regime de escoamento pode ser compreendido ao se observar o campo térmico para cada um dos casos na Fig. 5.6. Verifica-se que a isoterma correspondente a TIAC deste fluido (TIAC≈33°C) é mais próxima da superfície de cobre, para o ensaio com maior número de Reynolds, i.e., a região do domínio resfriada é menor para escoamentos com número de Reynolds maiores, resultando em depósitos menos espessos.

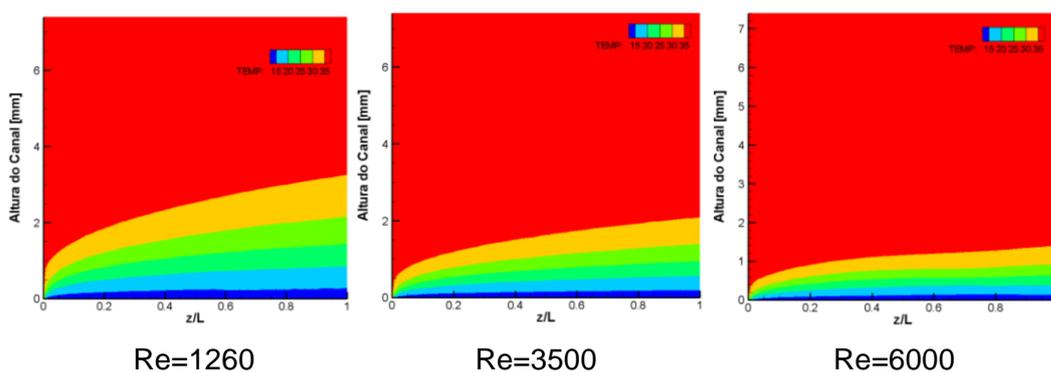


Figura 5.6: Campo de temperatura. Regime permanente. Re=1260, 3500 e 6000.

A composição e a porosidade fornecem insumos para compreender o comportamento do envelhecimento do depósito. A Fig. 5.7 apresenta o campo de saturação de sólido em regime permanente para os três números de Reynolds. Observa-se que o depósito é mais compacto próximo a parede fria,

onde há uma pequena região com saturação de sólido acima de 40%. A espessura desta região de 40% de saturação de sólido é reduzida significativamente com o aumento do número de Reynolds. Observa-se ainda, que para os três casos, a maior parte da espessura do depósito possui saturação de sólido entre 10 e 30%. Embora se comente normalmente que o envelhecimento do depósito seja mais acentuado em regimes turbulentos, regiões com saturações de sólidos maiores, i.e., regiões mais duras ocorrem em uma altura maior do depósito no regime laminar. Isso significa, em última análise, que remover completamente o depósito de uma tubulação escoando em regime laminar pode requerer mais força que a de uma tubulação cujo fluxo esteja em regime turbulento. Ainda analisando a Fig. 5.7, observa-se uma redução do valor da saturação de sólido na região de saída da seção de teste, para o caso de número de Reynolds mais elevado ( $Re=6000$ ).

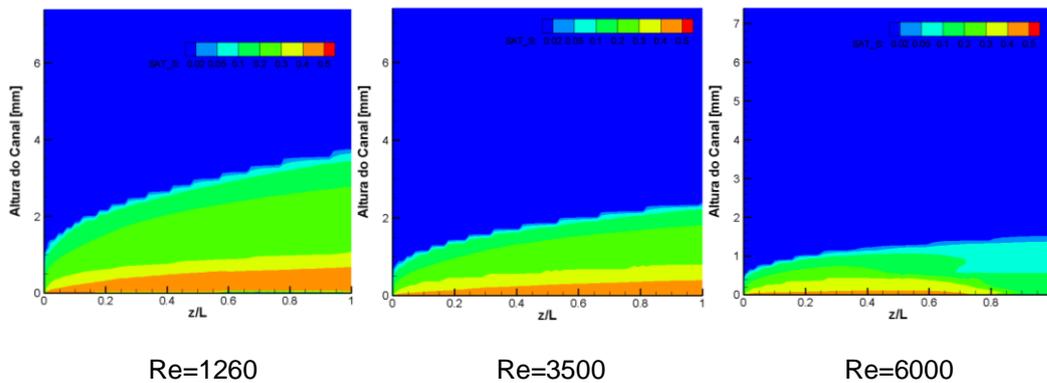


Figura 5.7: Perfil de saturação de sólido. Regime permanente.  $Re=1260$ ,  $3500$  e  $6000$ .

A Fig. 5.8 apresenta o mapa de concentração das espécies para os três ensaios simulados. Quatro espécies foram selecionadas para a análise: 3, 6, 9 e 12, as quais encontram-se descritas no Apêndice A1. Observa-se que o campo de concentração das espécies leves e pesadas para  $Re=3500$  (turbulento) e  $Re=1260$  (laminar) é muito semelhante. Como se esperava, as espécies mais leves (3, 6 e 9) possuem maior concentração na região exterior ao depósito. Para a espécie pesada (12), contudo a situação se inverte, sendo a concentração mais alta no interior do depósito.

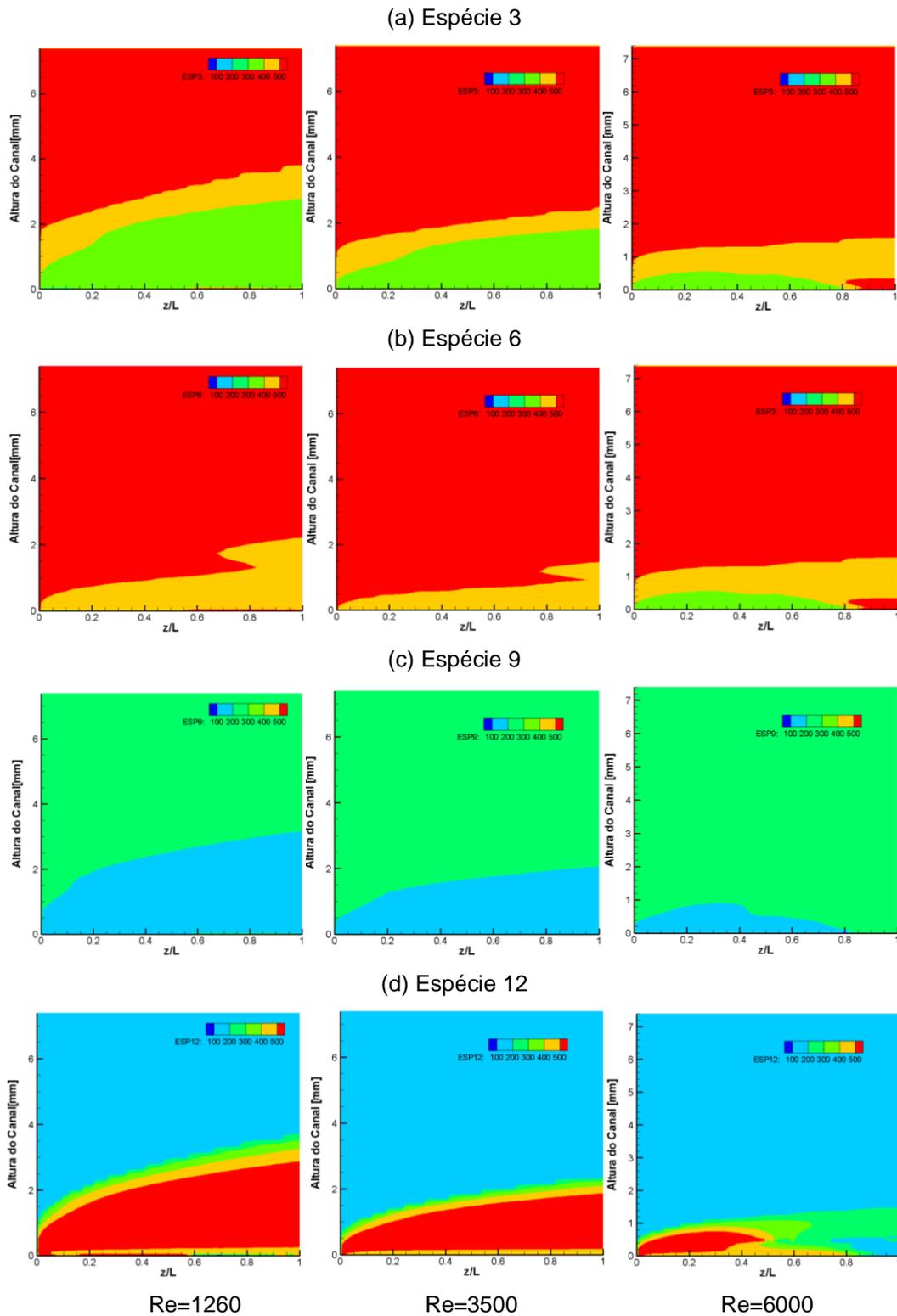


Figura 5.8: Campo de concentração das espécies 3, 6, 9 e 12. Reynolds= 1260, 3500 e 6000.

Para o ensaio turbulento, com  $Re = 6000$ , verifica-se que na região próxima à saída, a qual apresenta valores mais baixos de saturação de sólido, todas as espécies apresentam uma região de alta concentração próximo da

superfície do cobre. Com exceção desta pequena região próxima à saída, a distribuição de concentração das espécies 3, 6 e 9 é análoga a dos outros dois Reynolds, i.e., maior concentração na região externa do depósito. Porém, para a espécie 12 (mais pesada), observa-se um núcleo de alta concentração no início do depósito, com baixa concentração próxima ao cobre na região da saída.

Na Fig. 5.9 é possível observar o perfil de velocidade radial do componente axial adimensionalizado pela velocidade média da entrada, para a posição adimensional  $z/L = 0,6$  para os três números de Reynolds. Conforme se incrementa a vazão, mais homogêneo tende a ser o perfil no escoamento fora do depósito (para  $Re = 6000$  a velocidade adimensional –  $u/u_{in}$  – máxima é de 1,3 enquanto para  $Re = 1260$  esta corresponda a 1,65), pois como é sabido, devido a uma maior quantidade de movimento, o perfil de velocidade no escoamento turbulento é mais achatado do que no regime laminar. Dentro do depósito o perfil de velocidade apresenta variação suave para todos os números de Reynolds, uma vez que a turbulência não é considerada. Observa-se que devido ao baixo valor da constante  $C$  da permeabilidade, a desaceleração do escoamento devido ao termo de Darcy na equação de quantidade de movimento é muito pequena. Souza (2014) já havia observado este fenômeno ao simular o experimento em escoamento empregando a constante associada a morfologia como  $C = 10^6 \text{ m}^{-2}$ .

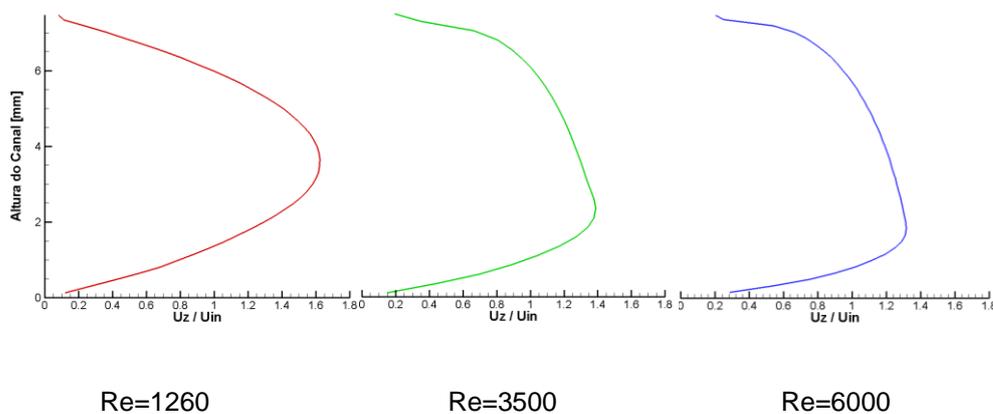


Figura 5.9: Perfil radial do componente axial de velocidade em  $z/L = 0,6$ . Regime permanente.  $Re=1260, 3500$  e  $6000$ .

A Fig. 5.10 apresenta o perfil radial de temperatura para os três ensaios na mesma coordenada  $z/L=0,6$  para o regime permanente. Verifica-se a menor espessura de camada limite conforme se aumenta o número de Reynolds. Dentro do depósito a distribuição de temperatura deveria ser logarítmica, se a velocidade fosse muito baixa (correspondendo a somente condução de calor). O resultado apresentado na Fig. 5.10 corresponde diretamente ao resultado dos

campos apresentado na Fig. 5.6.

Nos casos de escoamento turbulento, mais duas variáveis merecem ser avaliadas: energia cinética turbulenta  $\kappa$  e a dissipação específica  $\omega$ . Conforme apresentado no Capítulo 3, a energia cinética é nula nas superfícies sólidas e a dissipação específica possui valor que depende do número de Reynolds e da rugosidade da superfície. No modelo III selecionado a turbulência foi desprezada no depósito, desta forma, a energia cinética foi arbitrada como nula nesta região. Já com relação a dissipação específica, a interface entre o gel e o líquido é tratada como se fosse uma parede ao longo da qual o fluido escoava, dessa forma, o valor da dissipação específica reinante sob uma parede com rugosidade arbitrada (igual a do cobre) é imposto na interface. O valor reinante no interior do depósito não possui significado. Esta representação é visível nas Figs. 5.11 e 5.12, correspondentes aos campos de energia cinética e dissipação específica, respectivamente.

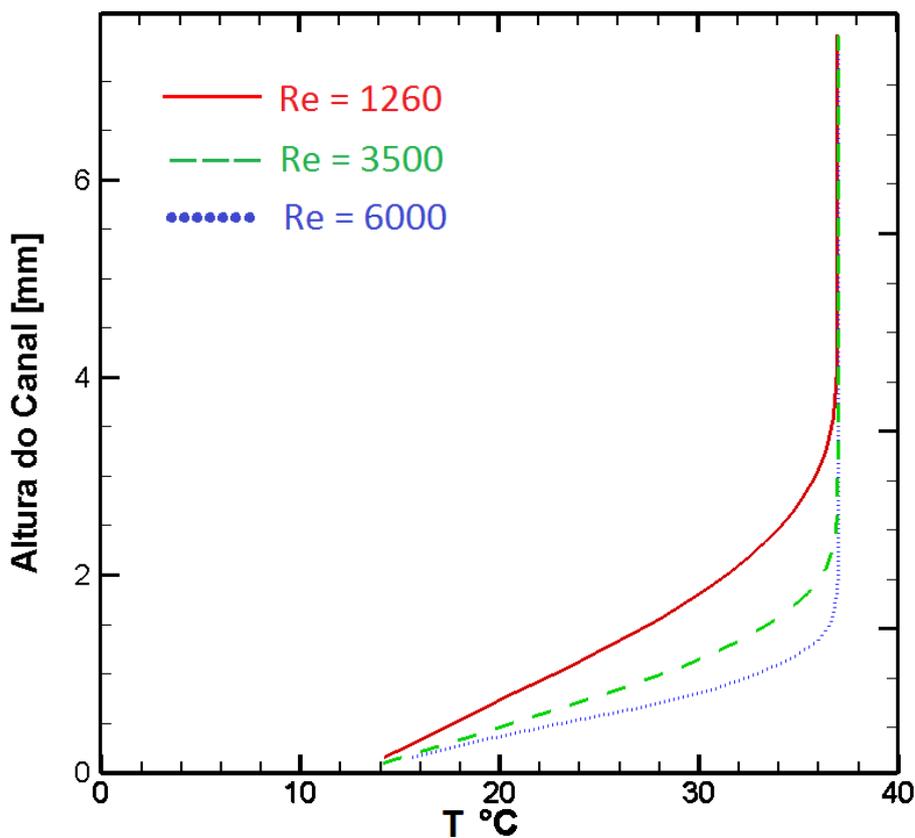


Figura 5.10: Perfil radial de temperatura em  $z/L=0,6$ . Regime permanente.  $Re=1260$ , 3500 e 6000.

Observe na Fig. 5.11 que a energia cinética é mínima na região do gel e aumenta conforme se afasta dele. Note que para a modelagem da turbulência utilizada, como o depósito é tratado como um sólido sobre o qual o solvente flui, a dissipação no interior do depósito é máxima (Fig. 5.12), reflexo dos valores estimados para a rugosidade do depósito. Este valor decai rapidamente para o meio do canal, onde o fluxo é livre e a dissipação específica é quase nula, crescendo novamente, a medida que se aproxima da parede de acrílico. É interessante reparar que a dissipação imposta pelo acrílico é inferior àquela gerada pelo depósito, o que é coerente, pois como vimos na Fig. 5.9, a derivada do perfil de velocidade é mais acentuada abaixo e, sendo a tensão cisalhante maior, isto se reflete em maior dissipação. Estes fenômenos ficam ainda mais evidentes quando os analisamos na Fig. 5.13, o perfil radial dessas grandezas para uma coordenada axial fixa ( $z/L=0,6$ ). Analisando as figuras, é possível perceber a queda da energia cinética pela dissipação no depósito e o valor da dissipação que só existe nas regiões de parede. Fica visível também a diferença de dissipação no depósito e no acrílico.

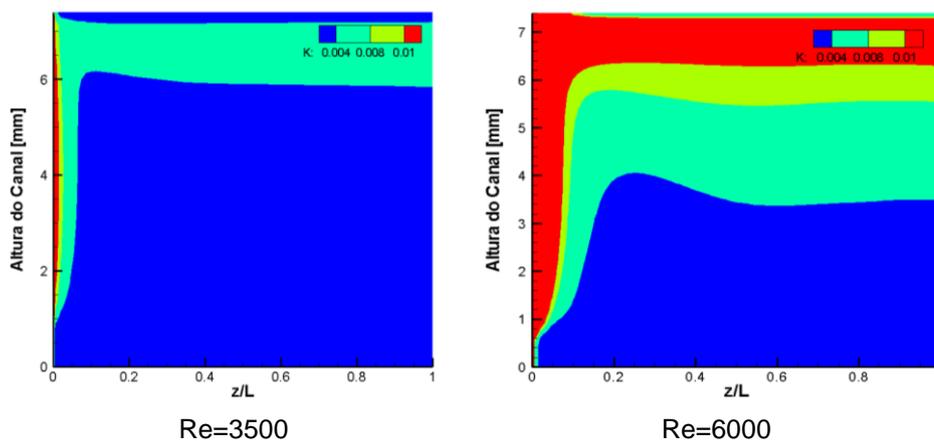


Figura 5.11: Campo de energia cinética turbulenta expressa em  $(m/s)^2$ . Regime permanente.  $Re=3500$  e  $6000$ .

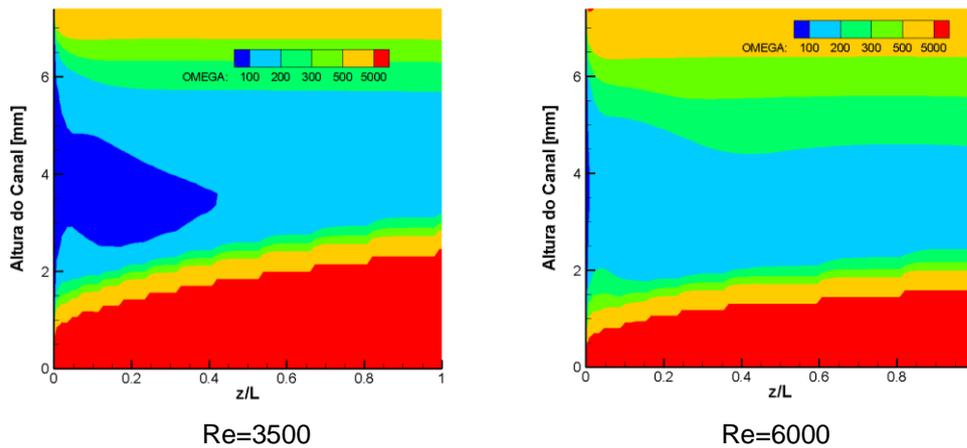


Figura 5.12: Campo da dissipação específica expressa em 1/s. Regime permanente, Re=s 3500 e 6000.

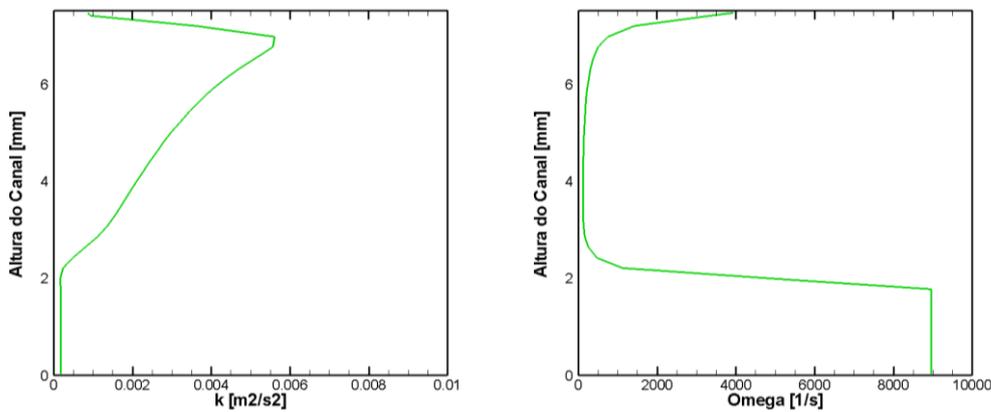


Figura 5.13: Perfil radial da energia cinética turbulenta e dissipação específica em  $z/L=0,6$ . Regime permanente. Re = 3500.

### 5.3 Análise do Escoamento Durante o Regime Transiente para Re=3500

Para avaliar a evolução temporal das grandezas características do escoamento turbulento com deposição, selecionou-se o número de Reynolds igual a 3500 (o mesmo ensaio da seção anterior), porém, agora as variações das grandezas relevantes para o escoamento são analisadas para diversos instantes. A simulação foi realizada com solução de parafina em querosene e com o modelo III, que despreza a turbulência no depósito. Neste caso, como já explicado, é necessário definir *a priori*, o que é depósito, pois o modelo de turbulência depende desta informação. Mais uma vez, o valor típico utilizado na literatura de 2% de sólido foi arbitrado. Arbitrou-se a constante referente a morfologia como  $C = 10^6 m^{-2}$ . As propriedades do querosene encontram-se no

Apêndice A1 e velocidade e intensidade de turbulência na entrada são  $U_{in}=0,4152$  m/s e intensidade de turbulência = 5,8%, respectivamente. A temperatura na entrada e na parede externa do acrílico são  $T_{in}= 37$  °C. A temperatura da superfície do cobre foi especificada variando no tempo, pela Eq. 5.2.

A Fig. 5.14 apresenta a distribuição axial do depósito para 5 instantes de tempo após o início do resfriamento: 30s, 2 mim, 5 mim, 30 min e regime permanente. Pode-se observar, em todos os instantes de tempo, um rápido crescimento do depósito próximo a entrada, com crescimento mais suave ao longo da seção de teste. Nota-se ainda que após somente 2 mim de resfriamento, o depósito já apresenta uma espessura próxima a metade da espessura de regime permanente.

O processo apresenta um rápido transiente, pois a curva de depósito após 30 minutos do início do processo praticamente coincide com a curva de regime permanente. Após aproximadamente 30 minutos do início do resfriamento, já é possível considerar que o regime permanente foi obtido. Uma comparação do transiente previsto no regime turbulento com o obtido no regime laminar (Apêndice A2.3), mostra que o regime permanente foi obtido tão rápido no regime turbulento quanto no regime laminar.

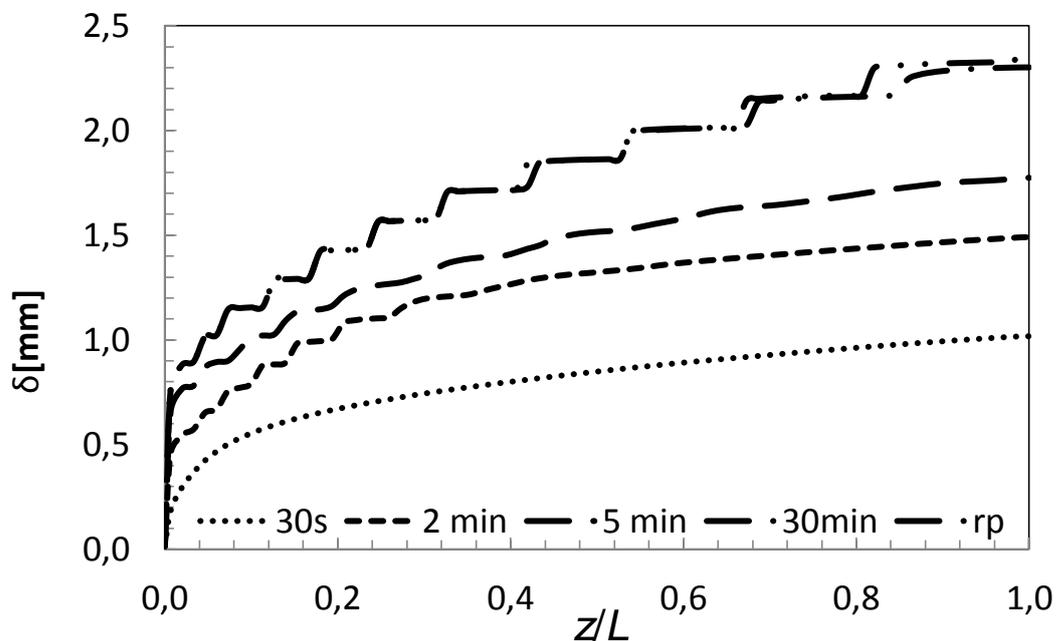


Figura 5.14: Evolução da espessura do depósito com o tempo.  $Re=3500$ .

Outro parâmetro importante com relação ao depósito de parafina é sua saturação de sólido. A Fig. 5.15 apresenta o campo de saturação de sólido nos

mesmos instantes de tempo já selecionados. No início do processo, após 30 s do resfriamento, o depósito possui aproximadamente 1 mm, porém a concentração de sólido é muito baixa. O depósito é formado por estruturas com saturação de sólido pequenas de 2% a 5%. À medida que o tempo passa, não só a espessura do depósito cresce, mas este se torna mais denso, i.e., conforme o fluido resfria, a porosidade diminui. Em temperaturas baixas, mais espécies saem de solução. Este fenômeno explica também porque a saturação de sólido é maior mais próximo da parede, uma vez que ali a temperatura é inferior a qualquer outro ponto do domínio. Após 5 minutos do resfriamento, observa-se uma região de saturação de sólido mais elevada (40% a 50%) concentrada na entrada da seção de teste. O surgimento do depósito no início do domínio evidencia a relevância dos gradientes de temperatura e concentração, pois é nesta região que eles são mais acentuados. Após 30 min de resfriamento, o depósito praticamente já atingiu a condição de regime permanente, com uma camada de aproximadamente 1 mm com saturação mais elevada (40%) ao longo de toda a seção de teste, e com quase a metade da espessura do depósito com saturação de sólido com 20% em média.

Os resultados obtidos mostraram que neste caso, a espessura do depósito, assim com o seu envelhecimento (sua distribuição de saturação de sólido) atingiram o regime permanente rapidamente, após cerca de 30 minutos do resfriamento. Comparando este resultado com informações de Souza (2014), pode-se concluir que o envelhecimento do depósito também é um fenômeno que ocorre mais rapidamente em regimes turbulentos.

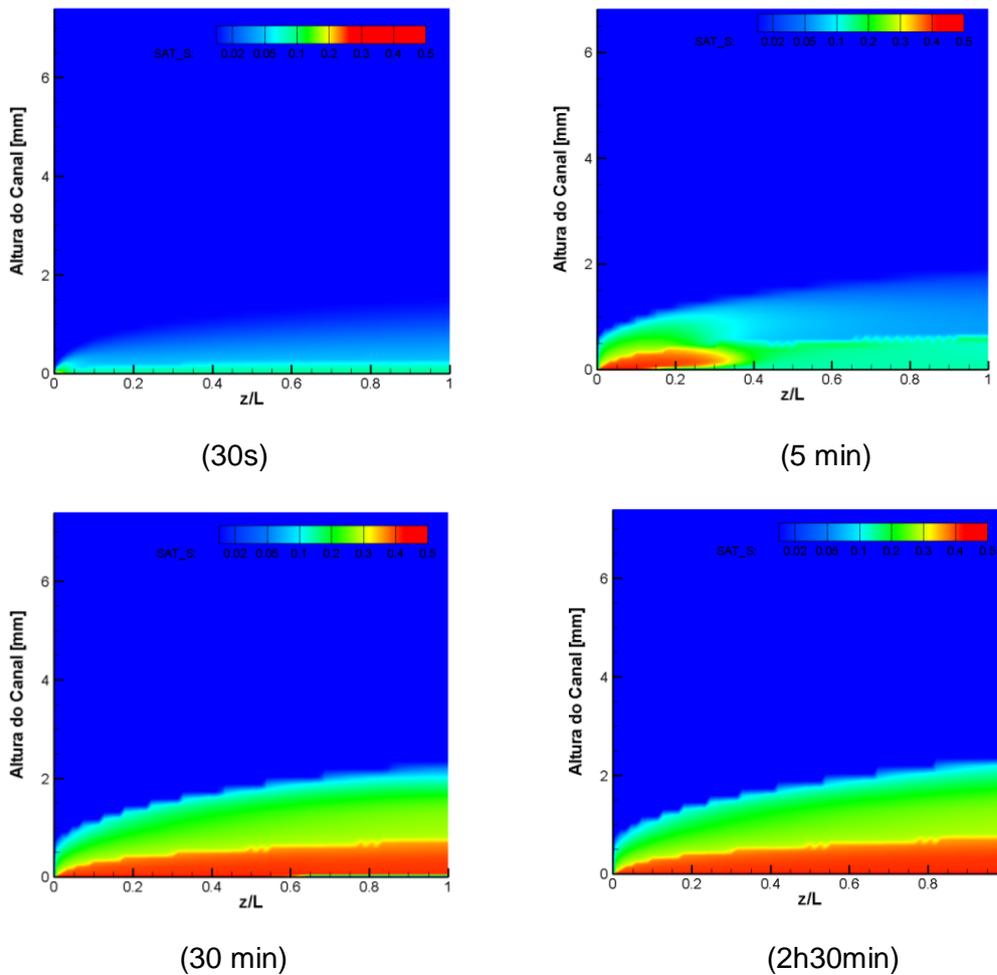


Figura 5.15: Evolução do envelhecimento do depósito. Campo de saturação de sólido.  $Re=3500$ .

Uma forma mais aprofundada de se compreender o envelhecimento do depósito é através do estudo de sua composição. As Figs. 5.16 a 5.18 apresentam a evolução temporal para a concentração das espécies 3, 6 e 12 (descritas no Apêndice A1). Analisando as figuras, verifica-se que, à medida que o fluido esfria, a região do domínio com temperaturas menores é empobrecida em espécies leves (Fig. 5.16). A espécie 6 é depositada na entrada da seção de testes e à medida que o fluido esfria vai se distribuindo de forma uniforme ao longo do depósito (Fig. 5.17).

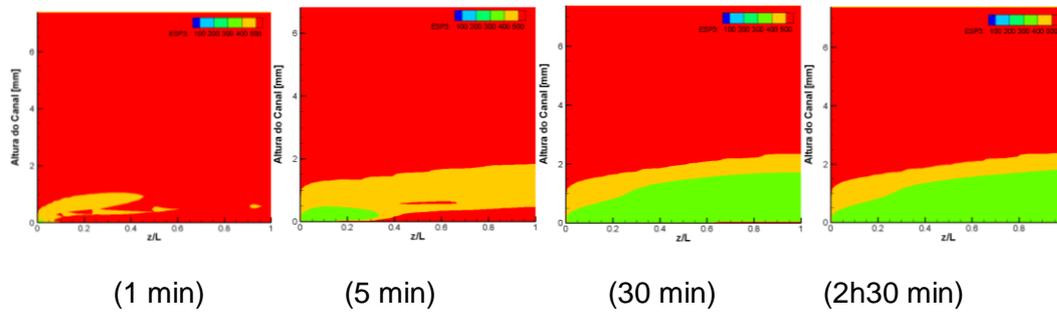


Figura 5.16: Evolução temporal da concentração da espécie 3.

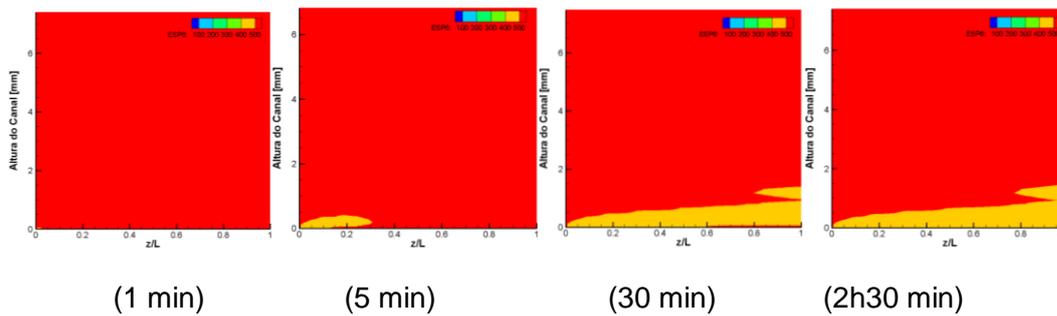


Figura 5.17: Evolução temporal da concentração da espécie 6.

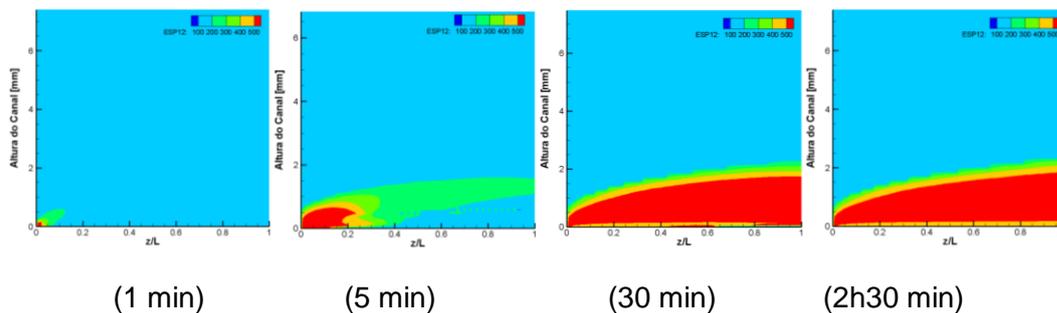


Figura 5.18: Evolução temporal da concentração da espécie 12.

Note na Fig. 5.18, que a espécie mais pesada não é uniformemente distribuída, apresentando um núcleo no centro da espessura do depósito com concentração mais elevada. Tal fenômeno está de acordo com o previsto qualitativamente por Souza (2014) para o regime laminar, onde as espécies mais pesadas são conduzidas para a região mais fria pela saída destas de solução. Deve-se destacar também que os resultados demonstram que o regime permanente de crescimento de espessura é também o regime permanente para o transporte das espécies e, portanto, para o envelhecimento.

A Fig. 5.19 demonstra a influência da evolução do depósito no perfil radial do componente de velocidade axial. Selecionou-se a coordenada axial  $z/L=0,6$  para analisar os perfis. Note que, conforme a espessura aumenta, a largura do

canal diminui, incrementando a velocidade na área aberta ao escoamento.

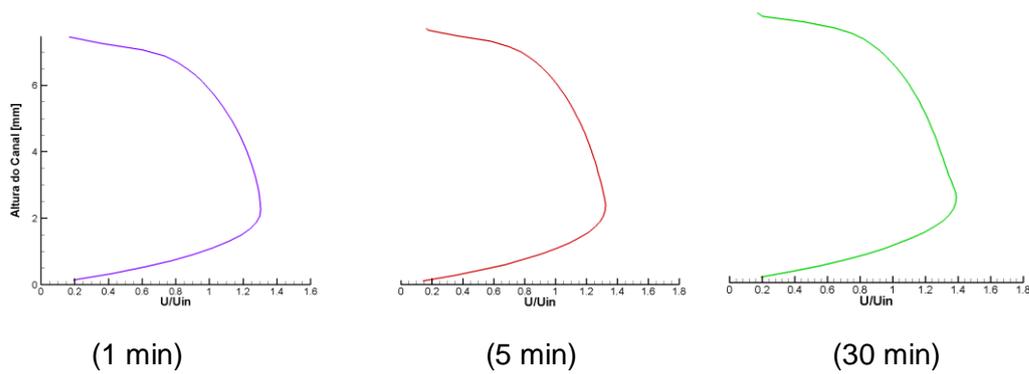


Figura 5.19: Evolução temporal da velocidade na coordenada  $z/L = 0,6$  para três instantes de tempo.

A Fig. 5.20 apresenta a evolução temporal da temperatura. O resfriamento ocorre rapidamente, de tal forma que aos 5 minutos o perfil de temperatura é próximo do perfil final. Com 30 minutos o perfil de temperatura já não se modifica coincidindo com aquele obtido após 2 h e 30 minutos de experimento.

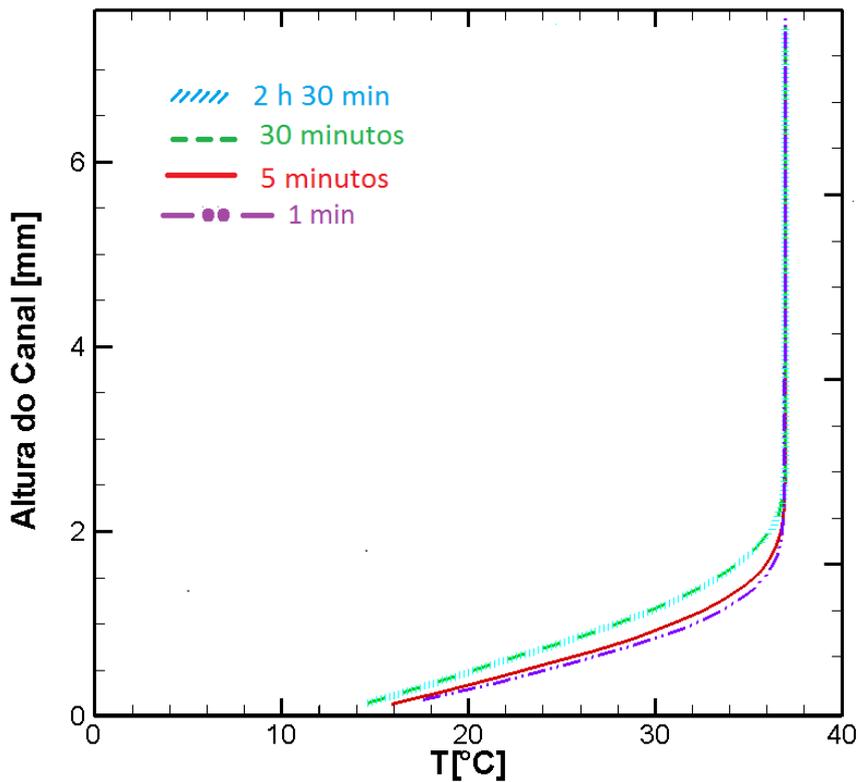


Figura 5.20: Evolução temporal da temperatura na coordenada  $z/L = 0,6$  para três instantes de tempo.

A evolução no tempo das grandezas turbulentas (energia cinética

turbulenta e a dissipação específica) pode ser apreciada nas Figs. 5.21 e 5.22. Observa-se na Fig. 5.21, que a região de entrada apresenta os maiores níveis de turbulência (energia cinética turbulenta), e que a mesma decai ao longo do domínio. Sua distribuição é praticamente desenvolvida a partir de 25% do comprimento da seção de teste. Nas paredes a energia cinética é nula, e com o atual modelo, dentro do depósito também.

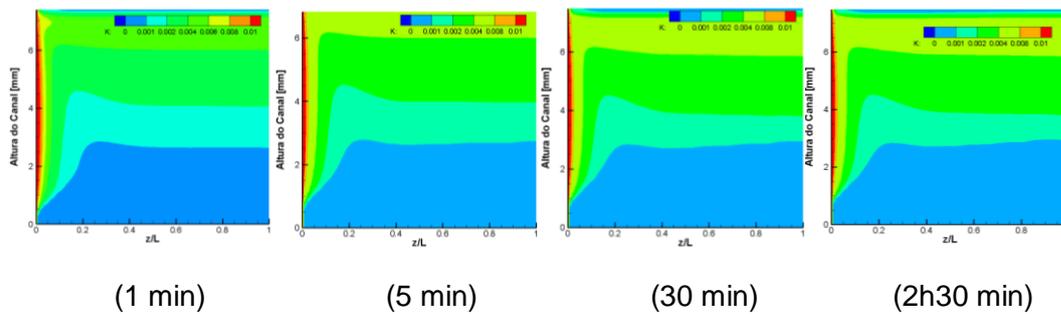


Figura 5.21: Evolução temporal da energia cinética turbulenta.

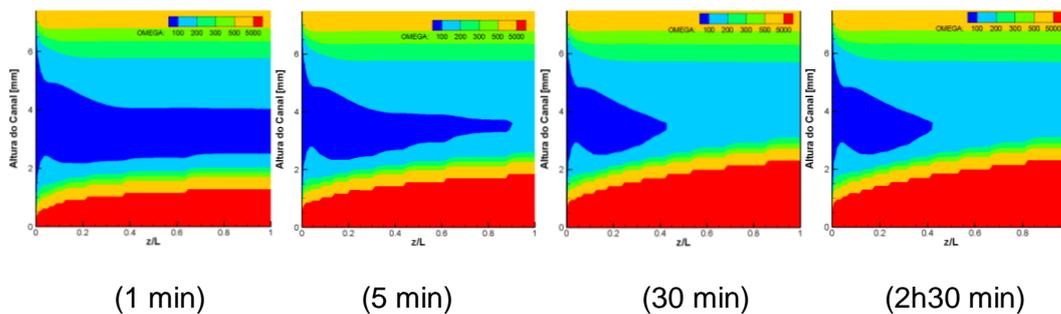


Figura 5.22: Evolução temporal da dissipação específica.

Analisando a Fig. 5.22 para a dissipação específica, observa-se que a dissipação é mais acentuada próximo das paredes (superfícies sólidas, e no presente caso, depósito com saturação acima de 2%) e praticamente nula na região de fluxo livre. A geração da turbulência se dá devido ao atrito viscoso com as superfícies sólidas. Podemos perceber que a dissipação avança no domínio conforme cresce o depósito: aos 5 minutos, no centro do domínio ela possui valor inferior a  $100 \text{ s}^{-1}$ , mas adquire valor superior a partir de 30 minutos em diante. Outro fato que demonstra a relação entre a dissipação e o crescimento do depósito é que aos 30 minutos o mapa da dissipação praticamente coincide com o de 2h e 30 minutos; igualmente a Fig. 5.14 demonstrou que a espessura do gel era a mesma quando comparados estes dois instantes de tempo.