

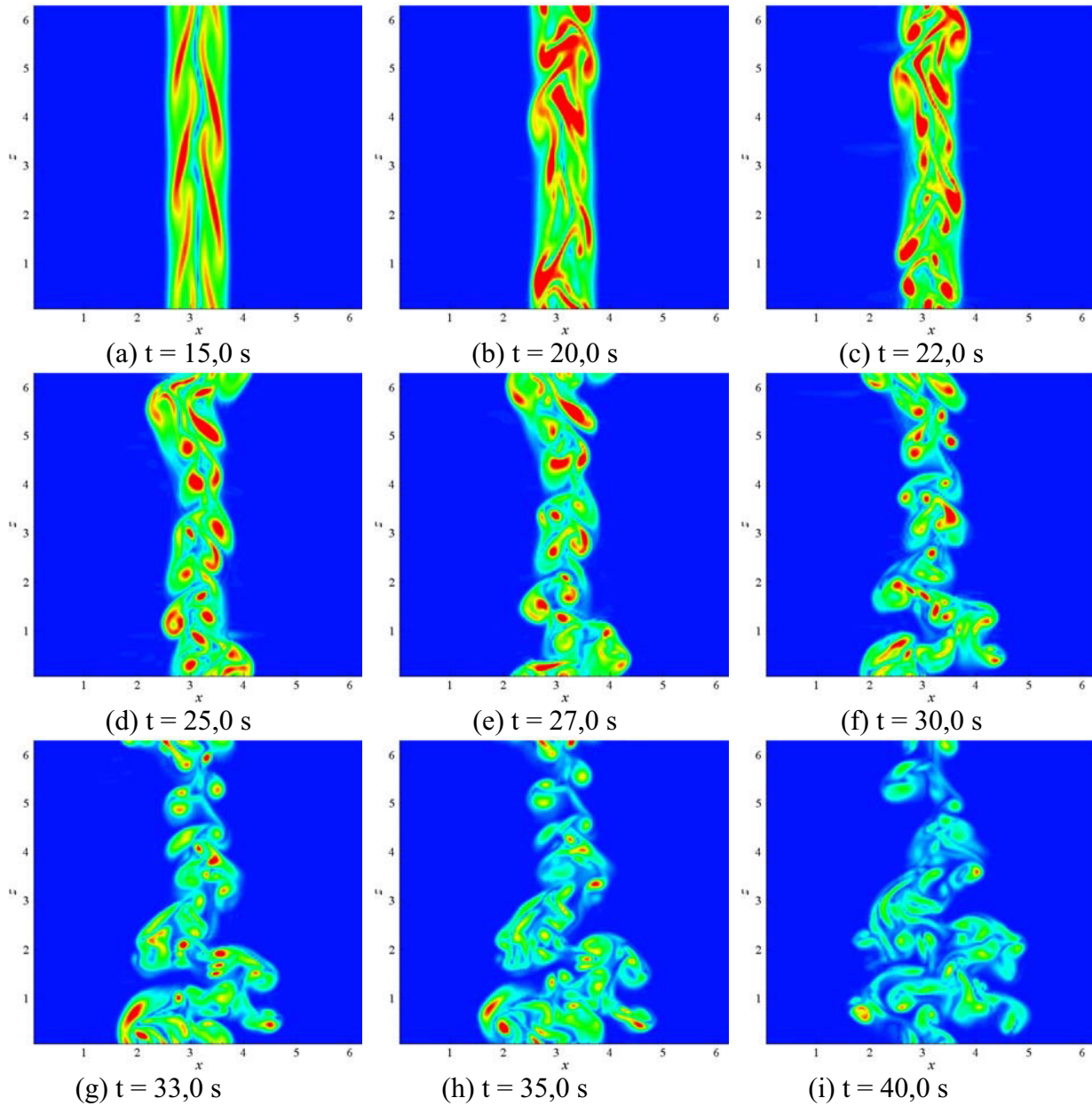


Figura 5.16 Evolução temporal do Módulo de Vorticidade $\|\vec{w}\|$ no plano xz ($y = \pi$) para $Re=5000$ e malha de 128^3 .

No plano xy extraído na posição $z = \pi$ (Figura 5.15) são apresentados os campos do módulo de vorticidade. Verifica-se o início da deformação do toróide na Figura 5.15 (a) e (b). A partir do instante de 22 s até 27 s pode-se identificar vórtices contra-rotativos. A partir de 30 s o sistema já apresenta uma grande desordem e uma expansão nas direções transversais pode ser observada.

No plano xz extraído na posição $y = \pi$ na Figura 5.16(a) podem-se identificar as instabilidades primárias de “Kelvin-Helmholtz”. Elas se desenvolvem nos instantes seguintes.

No tempo de 20 s, Figura 5.16 (b), até 25 s, Figura 5.16 (c), observa-se uma grande interação entre estruturas de diferentes tamanhos formando novos filamentos de vórtices, que podem ser observados nas Figura 5.16 (e) e (f). Destaca-se mais uma vez a variedade de tamanho de estruturas interagindo entre si, que representa a troca de energia entre as escalas. A partir do tempo de 33 s (Figura 5.15 (g)) observa-se um maior grau de desordem do sistema e logo em seguida o sistema já entra em decaimento.

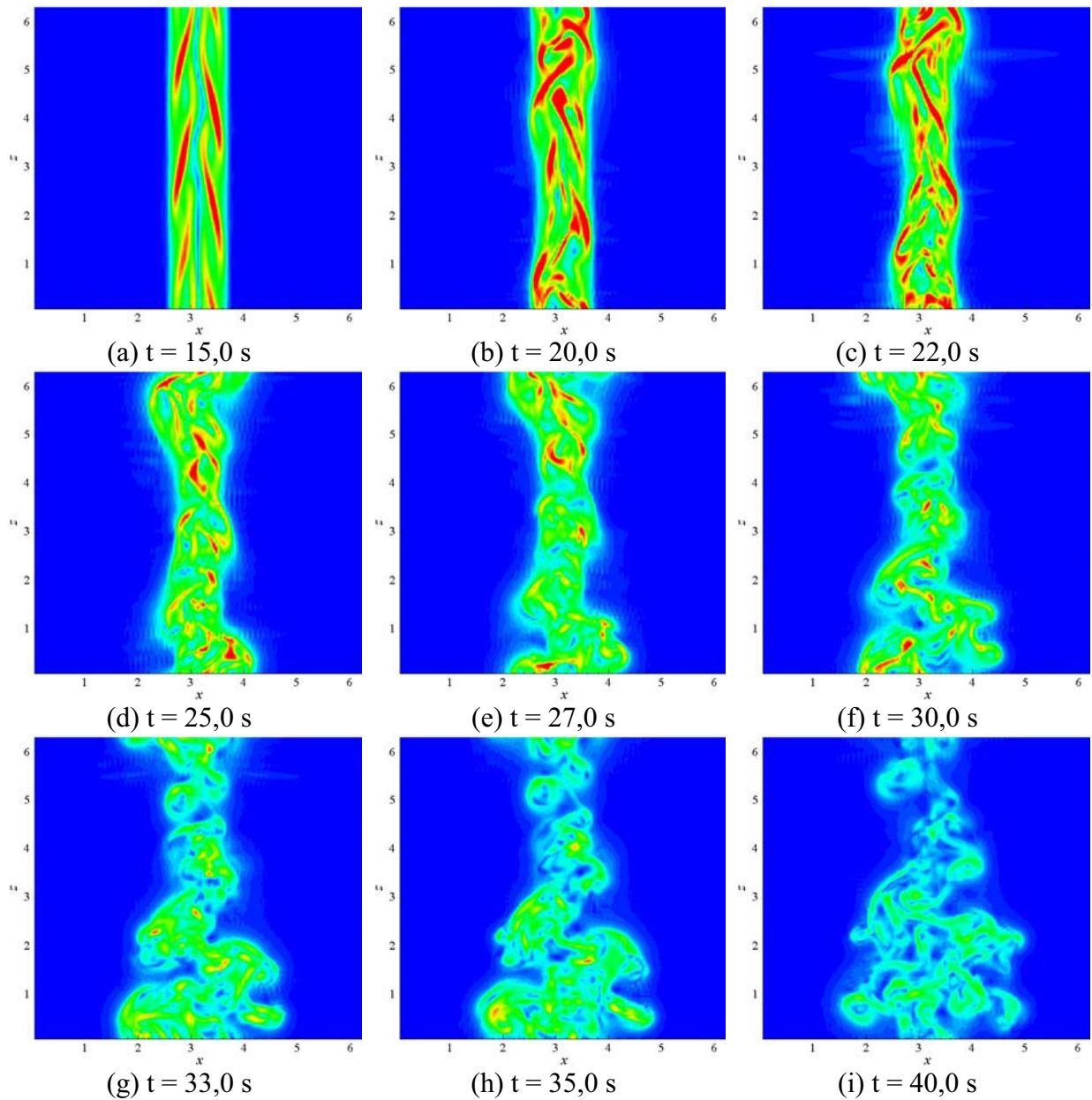


Figura 5.17 Evolução temporal da relação entre a viscosidade efetiva e molecular no plano xz ($\gamma = \pi$) para $Re=5000$ e malha de 128^3 .

A Figura 5.17 ilustra a evolução da relação entre a viscosidade efetiva e molecular, em que nas regiões onde existe uma grande concentração de vorticidade existe também uma forte viscosidade efetiva.

A Figura 5.18 apresenta o espectro de energia cinética turbulenta de um jato natural em decaimento temporal em diferentes instantes de tempo. É possível verificar que no tempo de 20 s há uma “grande” quantidade de energia nas grandes escalas (pequenos números de onda) em comparação com os diferentes instantes de tempo. No decorrer da simulação essa energia é transmitida para as menores escalas (altos números de ondas). Para tempos acima de 30 s o espectro tem uma aproximação com a reta de inclinação igual a $-5/3$, na faixa de números de onda $\log(k)=3$ a $\log(k)=12$, o que indica que nestes instantes o jato já está em um estado de turbulência desenvolvida e nos tempos seguintes entra em decaimento.

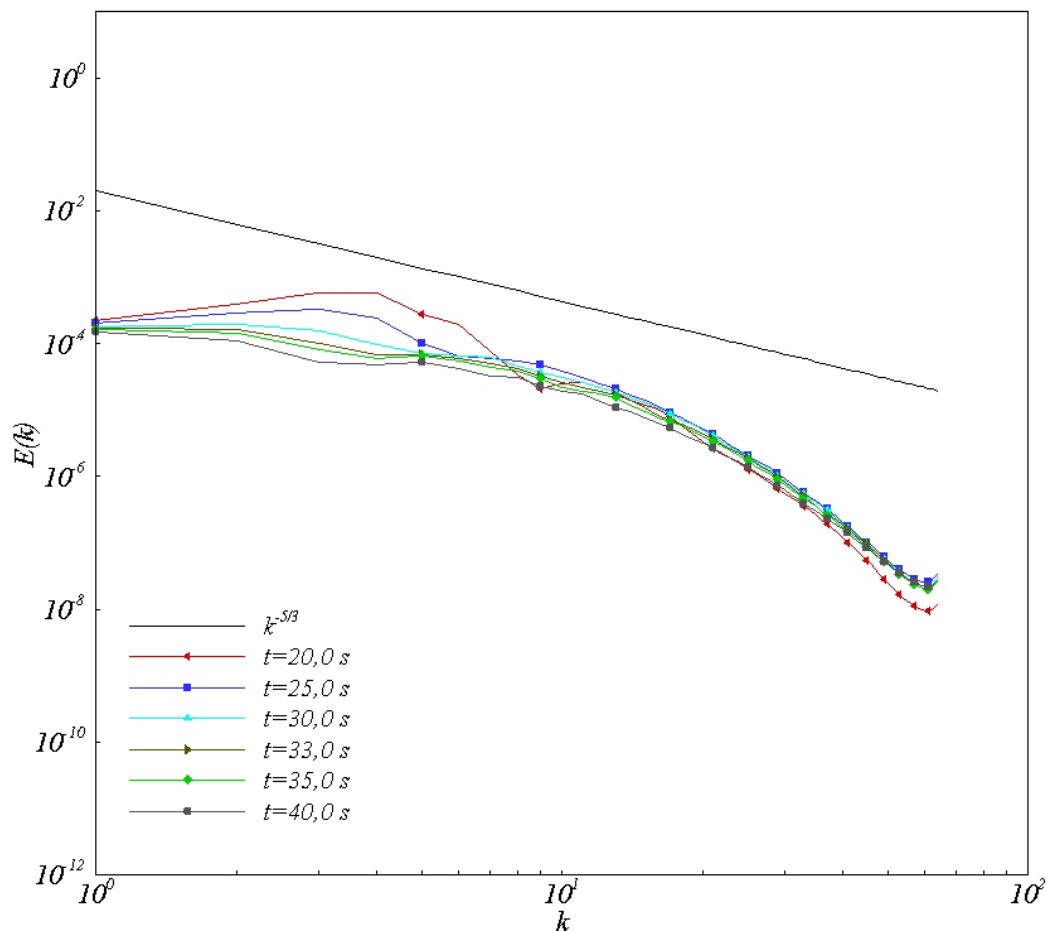


Figura 5.18 Evolução do espectro de energia cinética turbulenta para um jato em desenvolvimento temporal.

Neste ponto, cabe comentar sobre o custo computacional da metodologia. Todas as simulações foram feitas em um computador Intel Pentium(R) D com 3,4Ghz, 3.0 GByte de RAM, no sistema operacional Linux usando como compilador o Intel Fortran Compiler versão 9.1.0.036.

Nesta simulação utilizou-se aproximadamente 2 milhões de pontos de colocação, o tempo de processamento gasto foi de aproximadamente 18 horas. Mariano (2007) realizou comparações entre o custo computacional desta metodologia e as metodologias tradicionais. É importante ser ressaltado que a maior parte do custo computacional do código desenvolvido está no cálculo das FFTs.

5.2.2 Influência da constante do modelo sub-malha de Smagorinsky

A Figura 5.19 ilustra a evolução do módulo da vorticidade para três valores da constante de Smagorinsky em três diferentes tempos, com um número de Reynolds igual a 5.000, que foi definido como um caso teste para ajustar à constante.

A constante foi ajustada de forma que, a inclinação do espectro de energia cinética turbulenta da região inercial aproximasse da reta de inclinação igual a $-5/3$, e que nos instantes seguintes o jato entrasse em decaimento. Cabe ressaltar que a constante ajustada é dependente do número de Reynolds. A constante encontrada foi 0,27, para a qual o jato, no instante de 15 s (Figura 5.19 (b)), apresenta estruturas coerentes. No instante de 25 s pode-se notar uma grande interação entre estruturas de diferentes escalas. Em um tempo de 40 s o jato já apresenta um alto grau de desorganização, não podendo ser esperando qualquer comportamento determinístico. Para a constante igual a 0,24 simulou-se até o tempo onde as primeiras instabilidades numéricas são notadas. Para os demais casos simulou-se até 40 s. Para tempos iguais 25 s nota-se que na medida em que aumenta o valor da constante, o modelo de Smagorinsky é mais dissipativo e uma quantidade menor de estruturas em pequenas escalas são notadas.

A Figura 5.20 ilustra a evolução temporal da relação entre a viscosidade efetiva e a viscosidade molecular. Para uma constante de 0,24 e tempos acima 25 s essa relação apresenta oscilações numéricas, pois com essa constante o modelo não foi capaz de trocar energia de forma adequada entre as escalas resolvidas com as escalas modeladas (não resolvidas) do espectro de energia cinética turbulenta. Por outro lado, para casos onde esta constante é muito alta o modelo torna-se demasiadamente dissipativo retardando a transição.

Na Figura 5.20 (a), para $t=26$ s, é possível notar instabilidades numéricas. Por outro lado, na Figura 5.20 (c) observa-se que a transição torna-se mais lenta, devido ao elevado valor da constante de Smagorinsky. Assim, o valor $C_s=0,27$ foi considerado o melhor valor, entre os testados, para este número de Reynolds.

A Figura 5.21 ilustra evolução do critério Q . Esta grandeza permite melhor visualizar as estruturas turbulentas do escoamento. Novamente, vê-se que as oscilações numéricas para $C_s=0,24$ são evidenciadas, e a inibição da transição a turbulência para $C_s=0,30$. O mesmo comportamento pode ser observado nas Figura 5.22 e Figura 5.23, que apresentam o módulo da vorticidade extraídos nos planos xy em $z = \pi$ e xz em $y = \pi$ respectivamente.

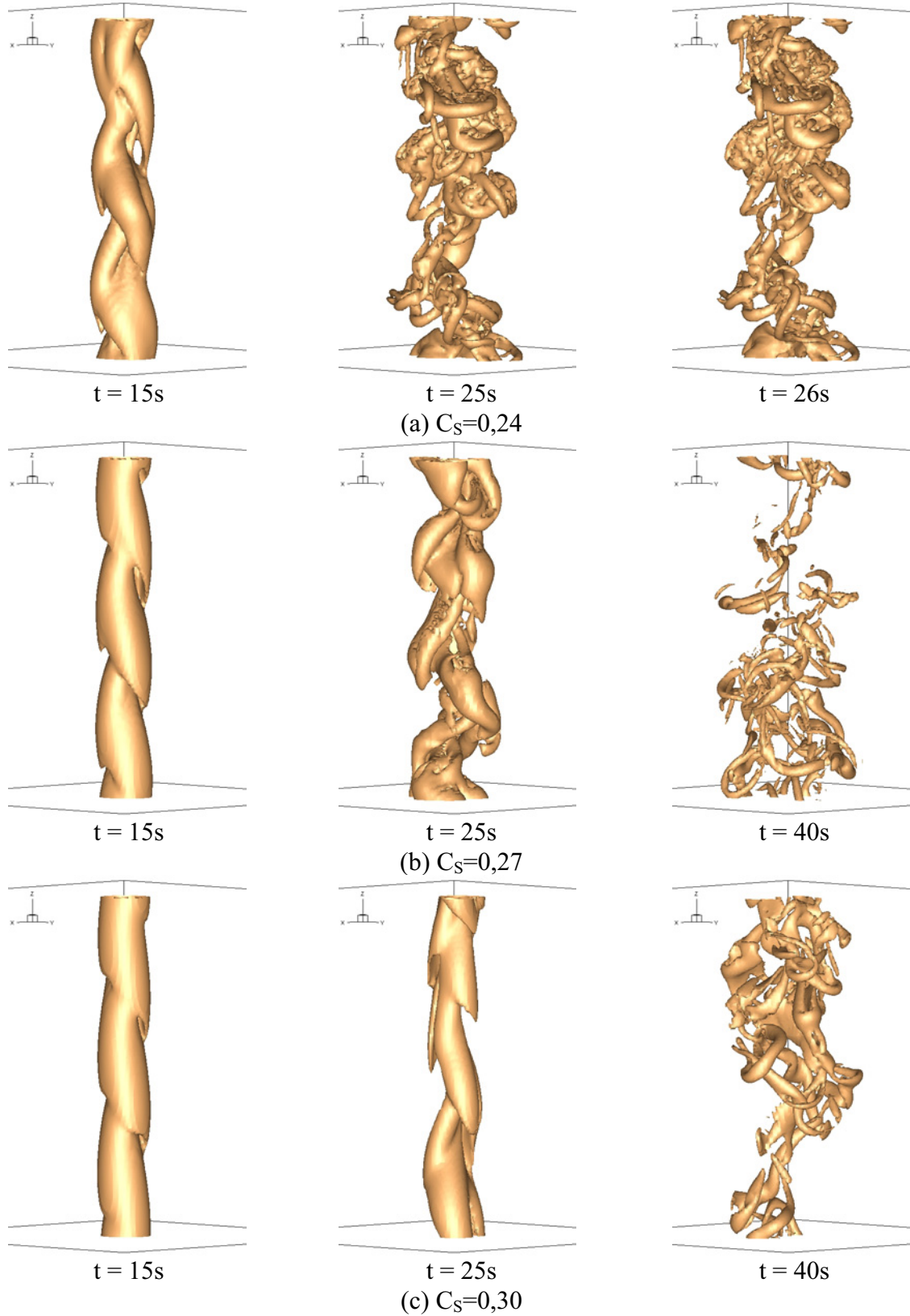


Figura 5.19 Evolução temporal do Módulo de Vorticidade $\|w\|$ (isosuperfície Nível $1,6 \text{ s}^{-1}$). para diferentes constantes de Smagorinsky.

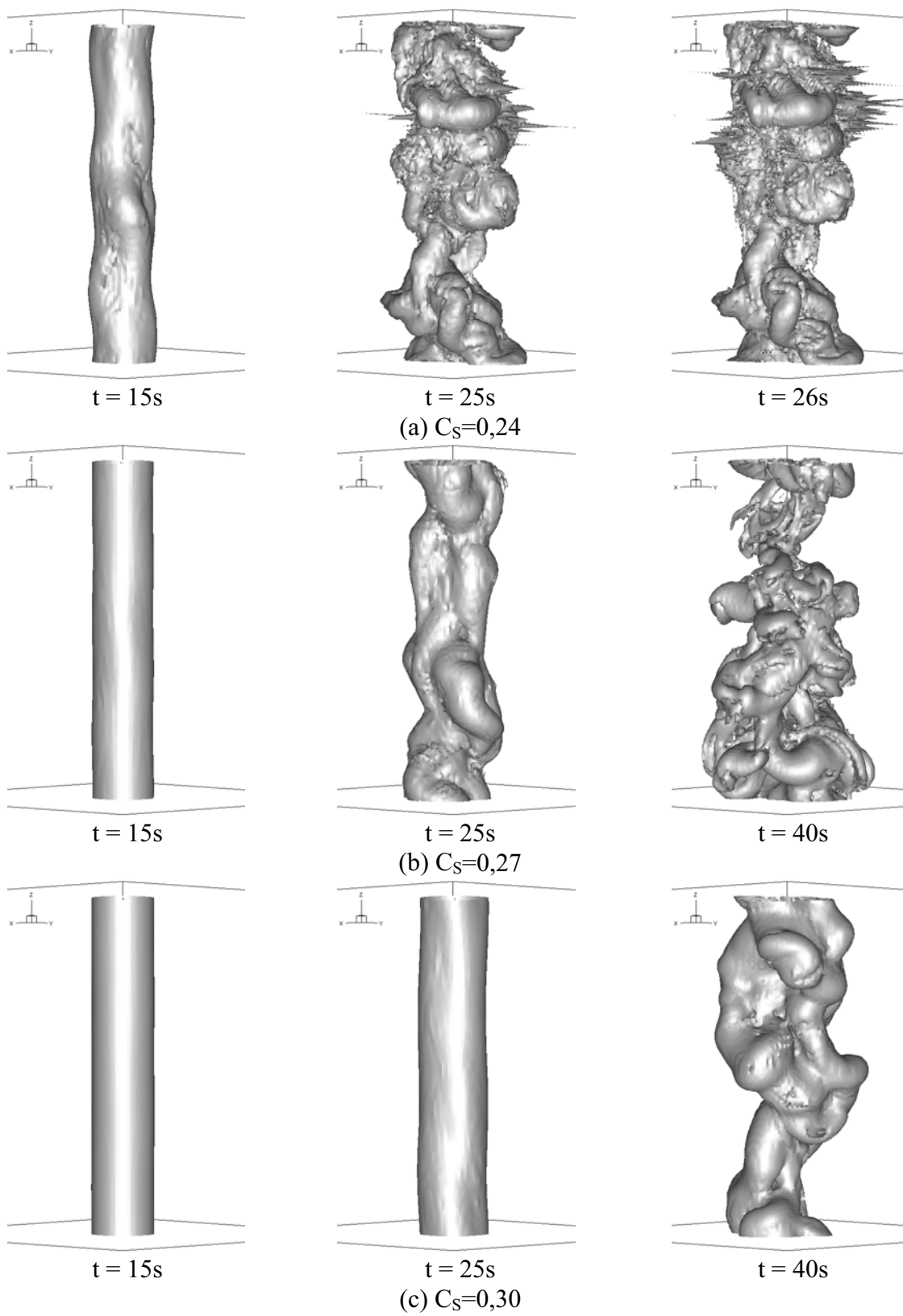


Figura 5.20 Evolução temporal relação entre a viscosidade efetiva e molecular (isosuperfície nível 2,0).para diferentes constantes de Smagorinsky.

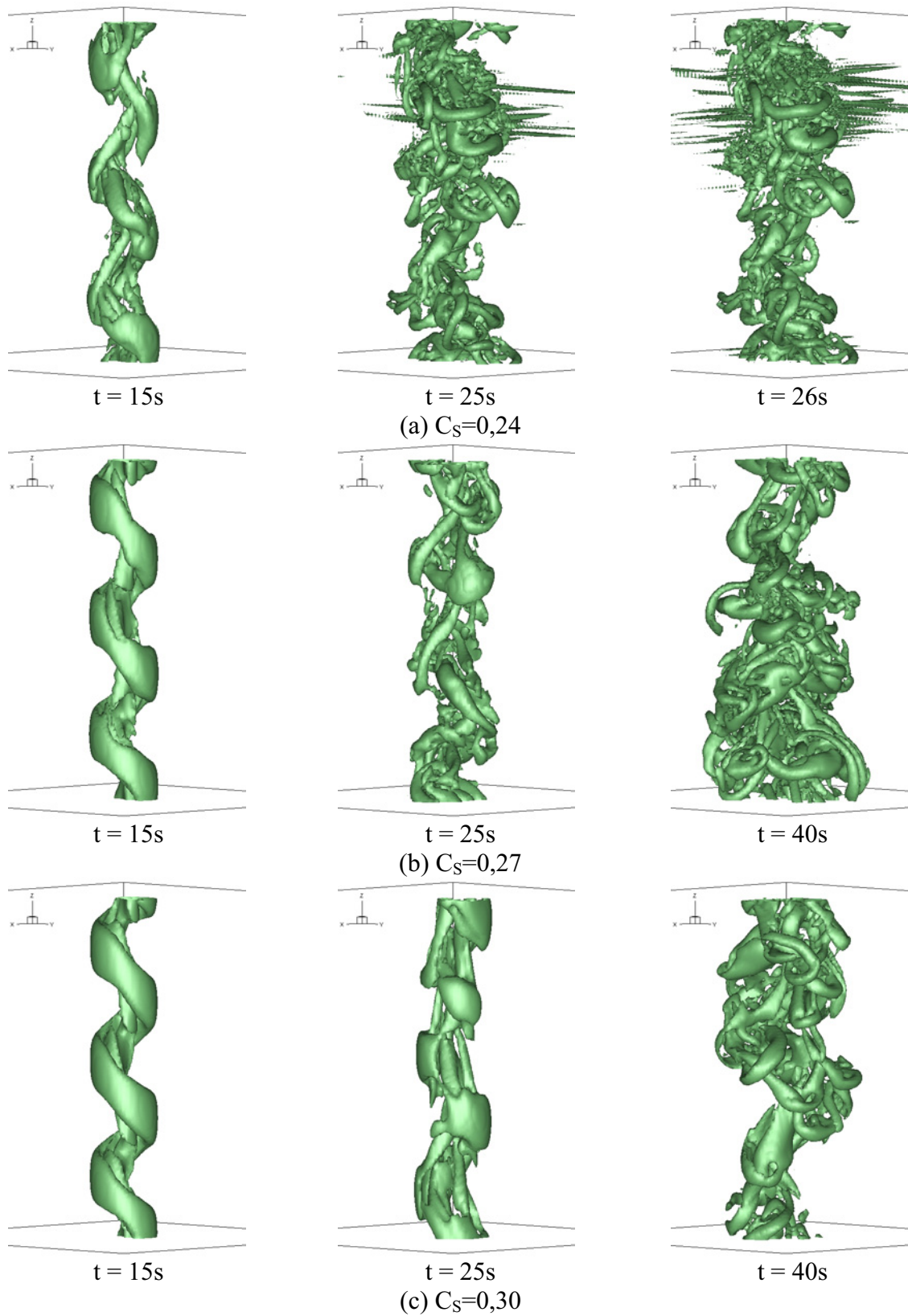


Figura 5.21 Evolução temporal do critério Q (isovalores nível 0.01 s^{-2}) para diferentes constantes de Smagorinsky.

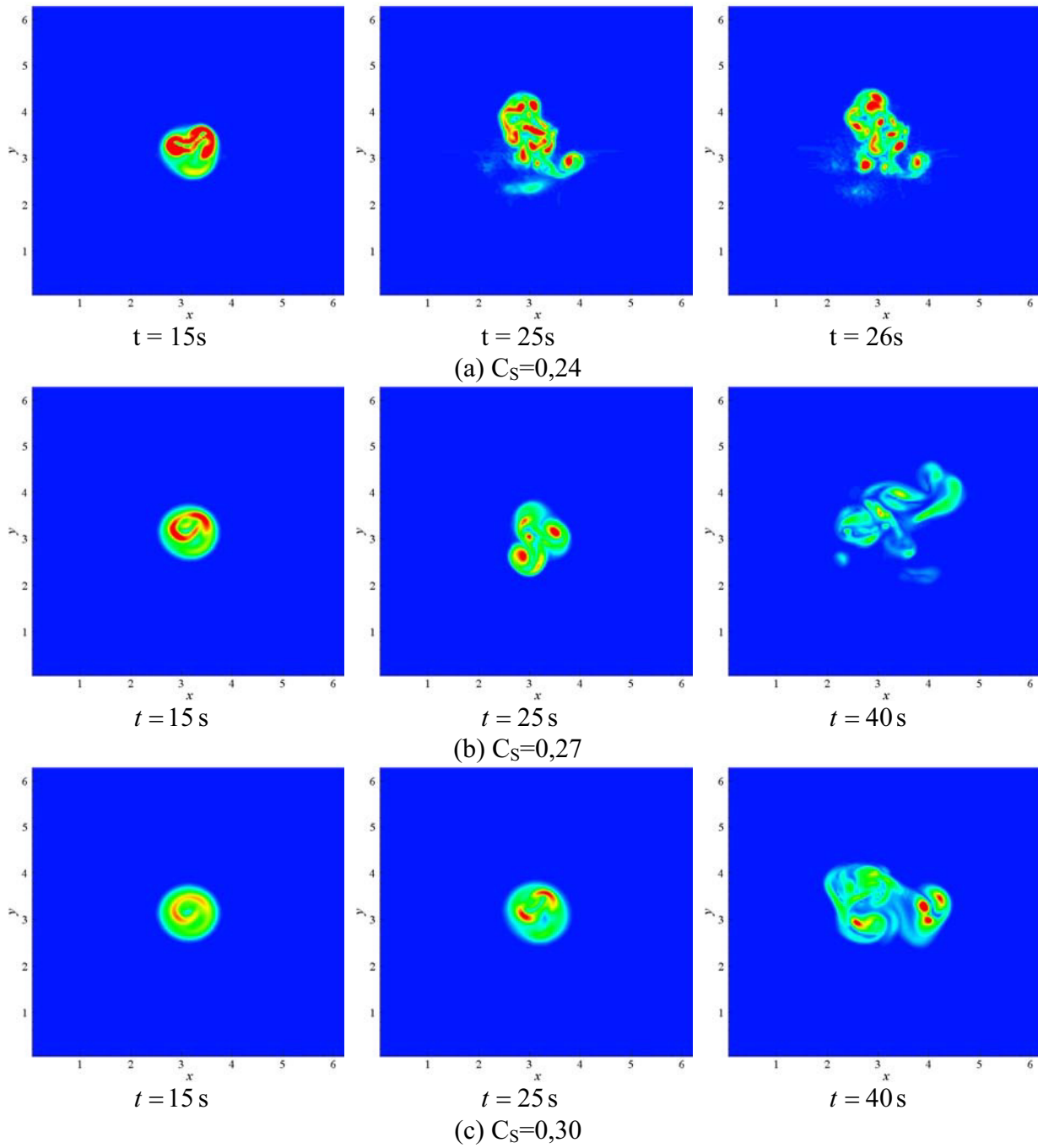


Figura 5.22 Evolução temporal do Módulo de Vorticidade $\|\vec{\omega}\|$ no plano xy ($z = \pi$) para diferentes constantes de Smagorinsky.

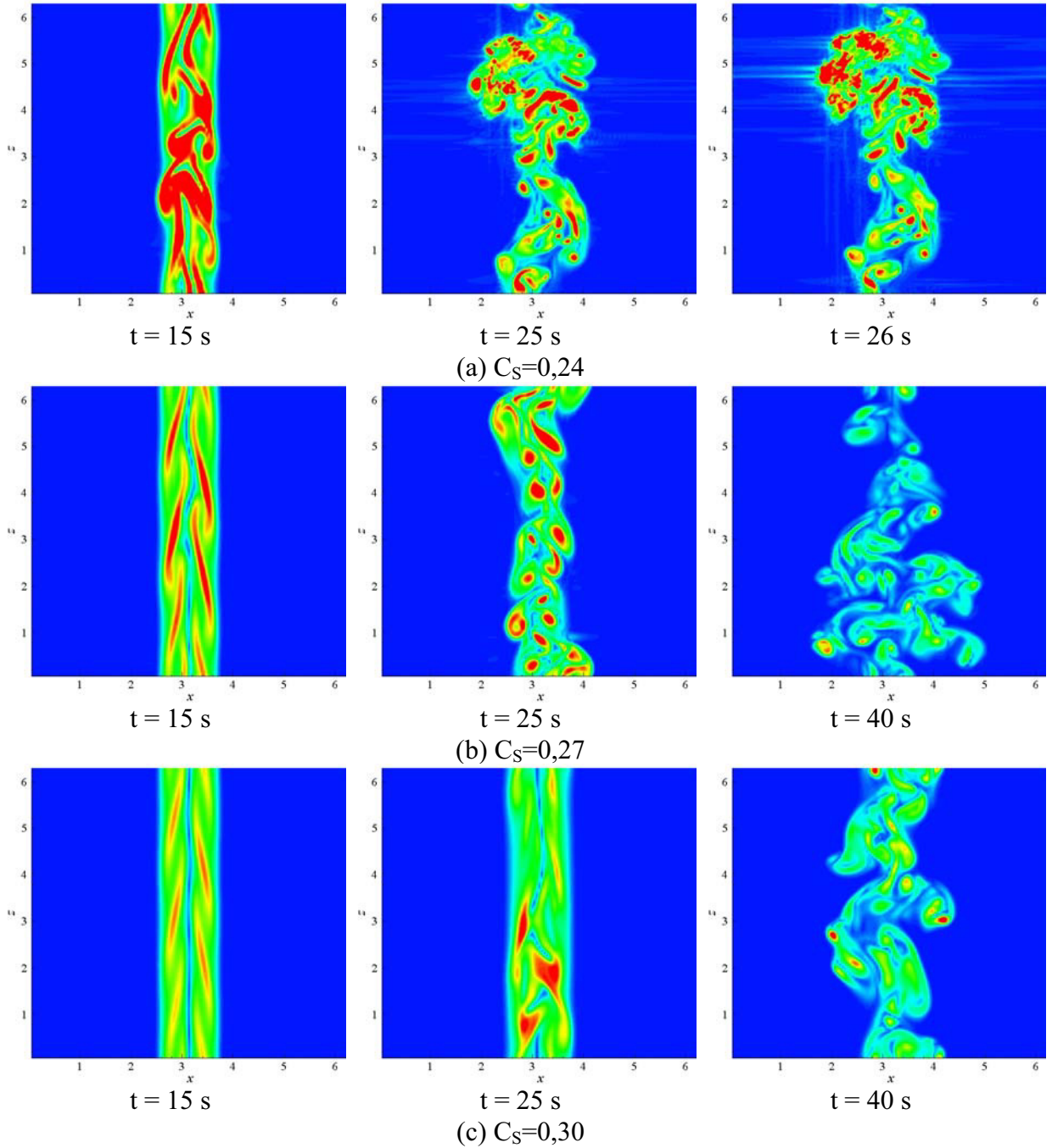


Figura 5.23 Evolução temporal do Módulo de Vorticidade $\|\vec{w}\|$ no plano xz ($y = \pi$) para diferentes constantes de Smagorinsky.

O espectro de energia da Figura 5.24 mostra, de forma quantitativa, a influência do valor da constante de Smagorinsky, C_S . Na medida em que a constante assume menores valores, acumula-se mais energia na frequência de corte, ao ponto de promover a divergência da simulação. Por outro lado, quando C_S assume valor muito elevado, a inclinação do espectro

torna-se muito forte, mostrando uma transferência excessiva de energia através da frequência de corte.

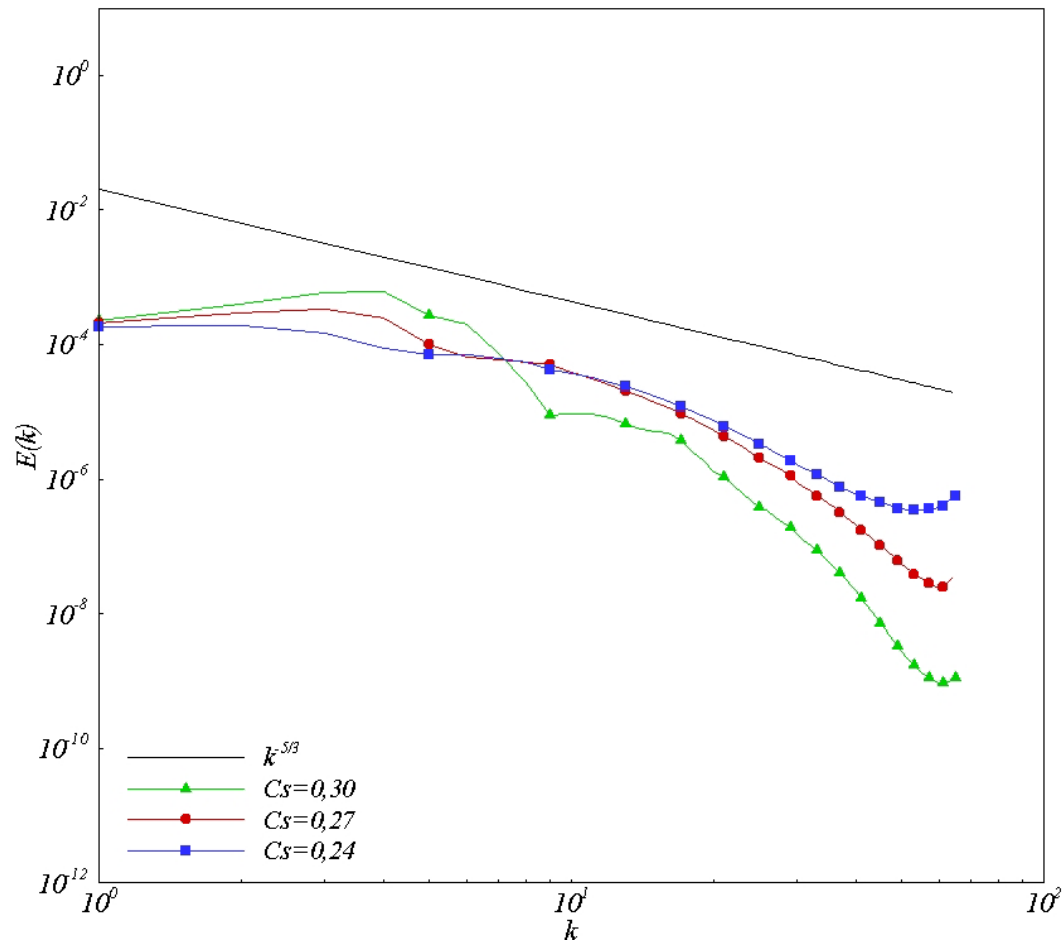


Figura 5.24 Espectro de energia cinética turbulenta para um jato no tempo $t = 25$ s e $C_s = 0,24$, $C_s = 0,27$ e $C_s = 0,30$.

5.2.3 Influência do número de Reynolds para o modelo de Smagorinsky

Para esta análise será apresentada a evolução de um jato temporal, em três diferentes instantes de tempo, a números de Reynolds igual a 1.600, 5.000 e 10.000. Em todas as simulações utilizou-se o modelo de Smagorinsky com a constante 0,27, ajustada na secção anterior. Para o número de Reynolds igual a 10.000, serão apresentados os resultados até o tempo igual a 28 s, uma vez que neste caso foi o último instante antes do código divergir. As simulações com uma constante de Smagorinsky igual a 0,27, com a malha de 128^3 e número de Reynolds igual a 10.000 não foi capaz de modelar a troca de energia entre as escalas turbulentas. Conforme comentado, a constata depende do número de Reynolds.

A Figura 5.25 (a) apresenta isosuperfície do módulo de vorticidade para o número Reynolds igual a 1.600. A um tempo de 15 s estruturas coerentes são observadas, mas, com o decorrer da simulação as pequenas escalas são dissipadas, inibindo a transição a turbulência, e mesmo a um tempo de 40 s, nota-se apenas a presença de estruturas coerentes. A Figura 5.25 (b) apresenta a simulação para um número de Reynolds igual a 5.000, onde a evolução das estruturas turbilhonares é bem caracterizada. Em um tempo de 15s o jato é dominado pelas grandes estruturas, as quais interagem com as estruturas menores, como ilustrado no tempo 25 s, e para um tempo de 40 s o jato apresenta-se em um estado de decaimento. Para o caso (c) , com o aumento do número de Reynolds, aumenta também o número de pequenas escalas da turbulência o que acelera a transição e, com 28 s, o jato já está em um estado caótico.

A Figura 5.26 apresenta a evolução temporal da relação entre a viscosidade turbulenta e a viscosidade molecular. Para um número de Reynolds igual a 5.000, Figura 5.26 (b), as isosuperfícies do módulo de vorticidade (Figura 5.25 (b)) são bem contornadas pela relação entre a viscosidade efetiva e a viscosidade molecular. No tempo de 15 s pode-se identificar que as isosuperfícies da relação entre as viscosidades ainda permanece com a forma da camada de cisalhamento, mas pode-se evidenciar pequenas oscilações, que se desenvolvem, passando por estado de turbulência desenvolvida até entrar em decaimento, ilustrado no tempo de 40 s. A um número de Reynolds igual a 10.000 e tempo de 25s a relação entre as viscosidades já apresenta oscilações numéricas.

A evolução temporal do critério Q a número de Reynolds igual a 1.600, Figura 5.27 (a), o jato apresenta o emparelhamento alternado nos tempos de 15 s a 25 s, e no tempo de 40 s o jato ainda é formado por estruturas coerentes. Na Figura 5.27 (b) que ilustra a evolução

temporal do critério Q para um número de Reynolds igual a 5.000. No tempo de 15 s nota-se a presença do emparelhamento alternado descrito por Silva (2001), que se desenvolvem até um tempo de 25 s, onde pode-se notar uma grande interação entre estruturas de diferentes tamanhos, evoluindo para um alto grau de desordem do sistema, no tempo de 40 s. Desta forma pode-se identificar os diferentes estágios da transição à turbulência para o número de Reynolds igual a 5.000.

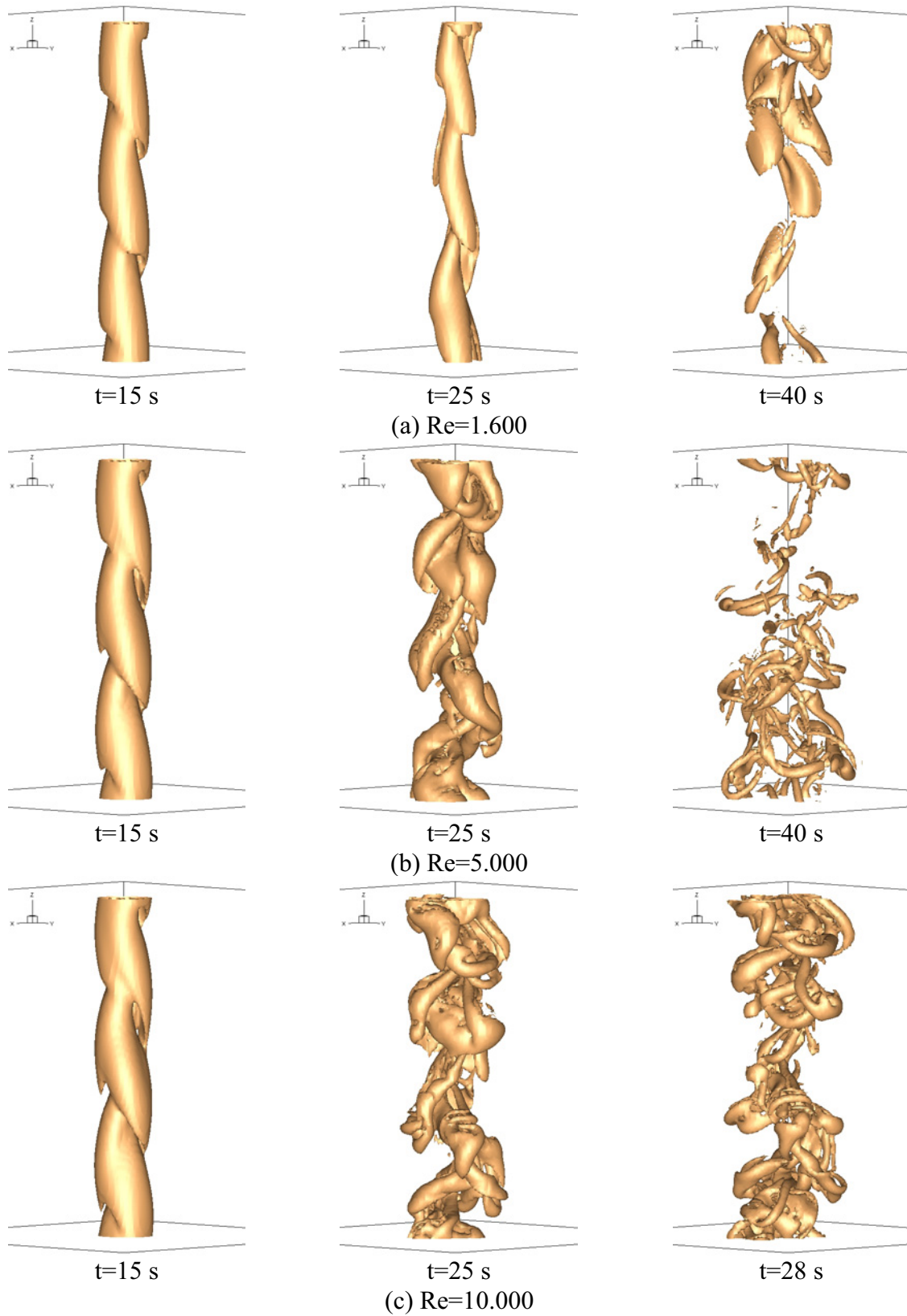


Figura 5.25 Evolução temporal do Módulo de Vorticidade $\|w\|$ (isosuperfície Nível $1,6 \text{ s}^{-1}$). para diferentes número de Reynolds.

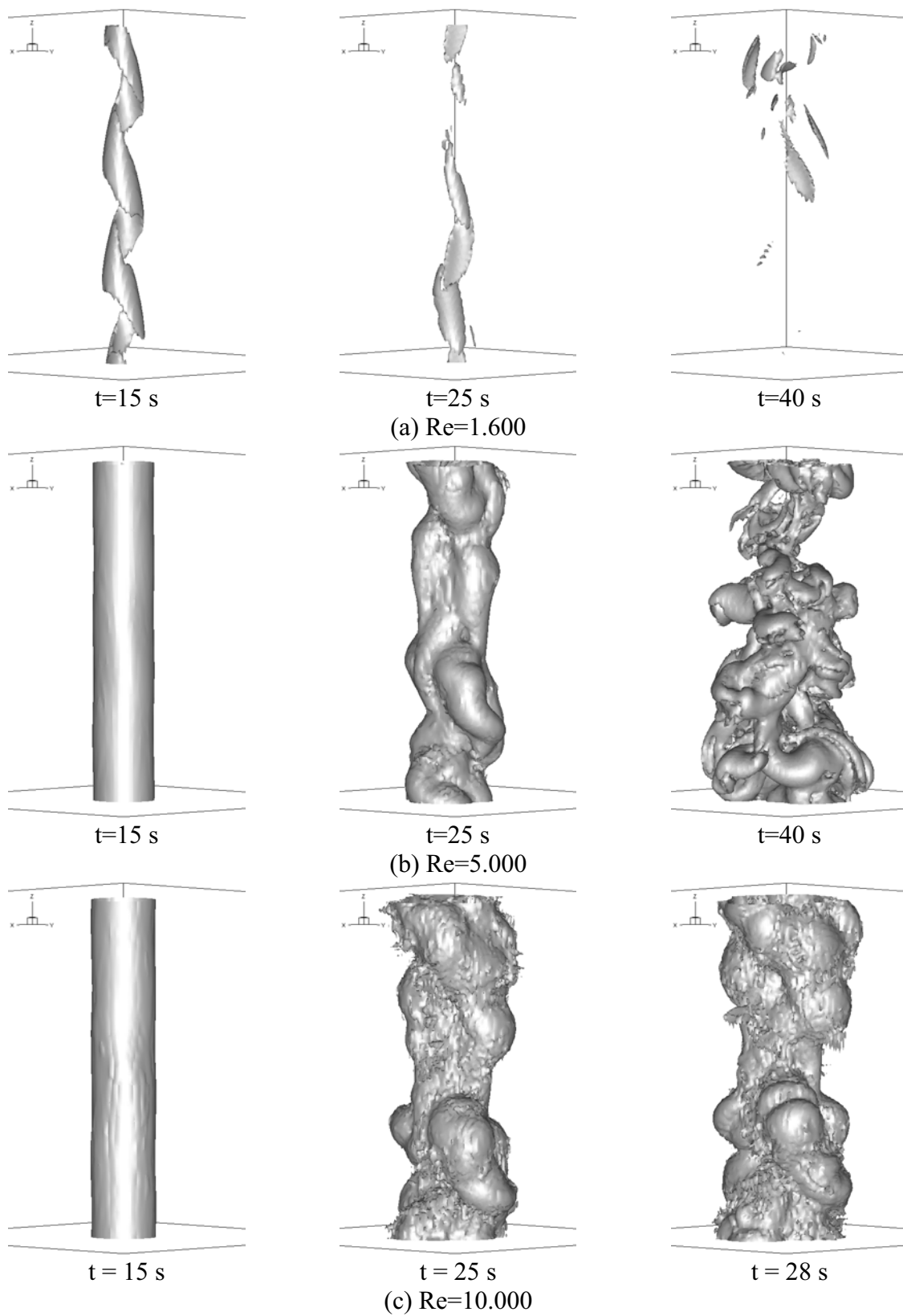


Figura 5.26 Evolução temporal relação entre a viscosidade efetiva e molecular (isosuperfície nível 2,0).para diferentes número de Reynolds.