

5 MICROMISTURADORES

Conforme apresentado anteriormente, os micromisturadores estudados são Onda Quadrada XY, Zig-Zag 3D e Serpentina 3D, os quais passarão a ser identificados como M1, M2 e M3.

Nas Figuras 37, 38 e 39 podem-se visualizar as geometrias estudadas, e em seguida nas Figuras 40, 41 e 42 o detalhe de uma das malhas geradas para cada um deles.

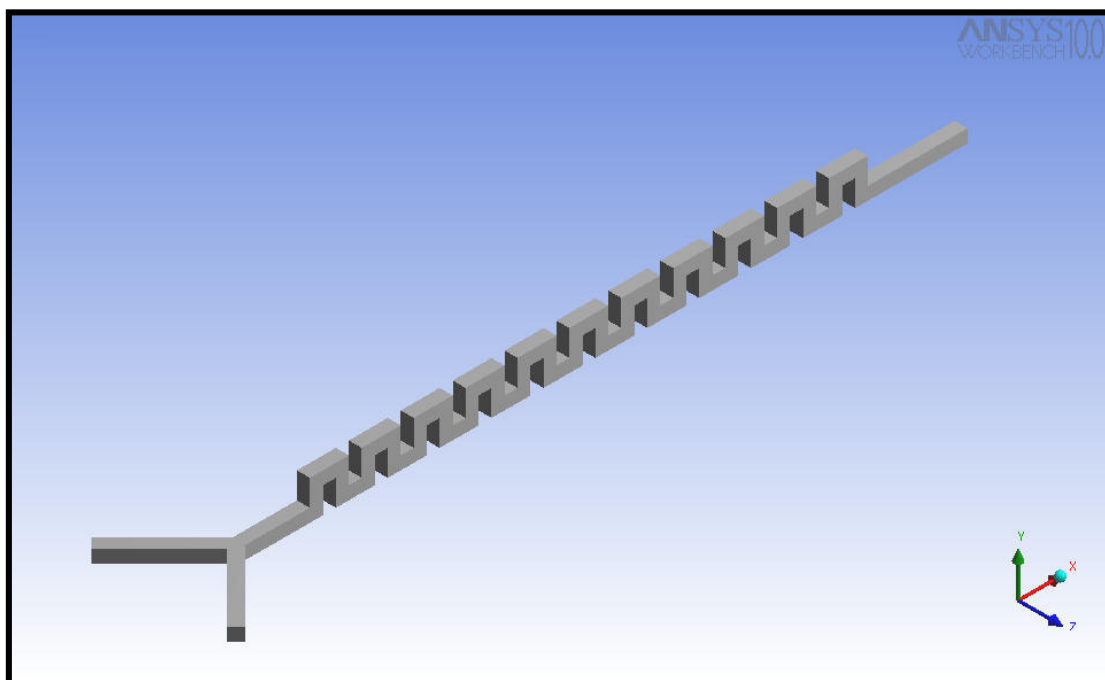


Figura 37 - Geometria do micromisturador M1.

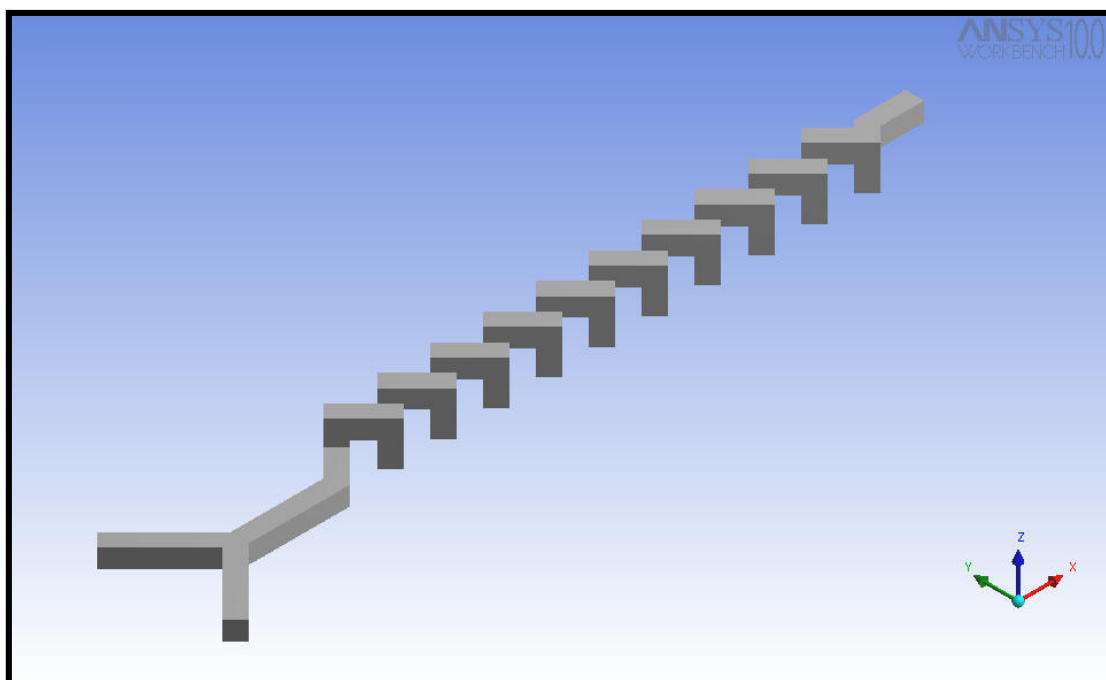


Figura 38 - Geometria do micromisturador M2.

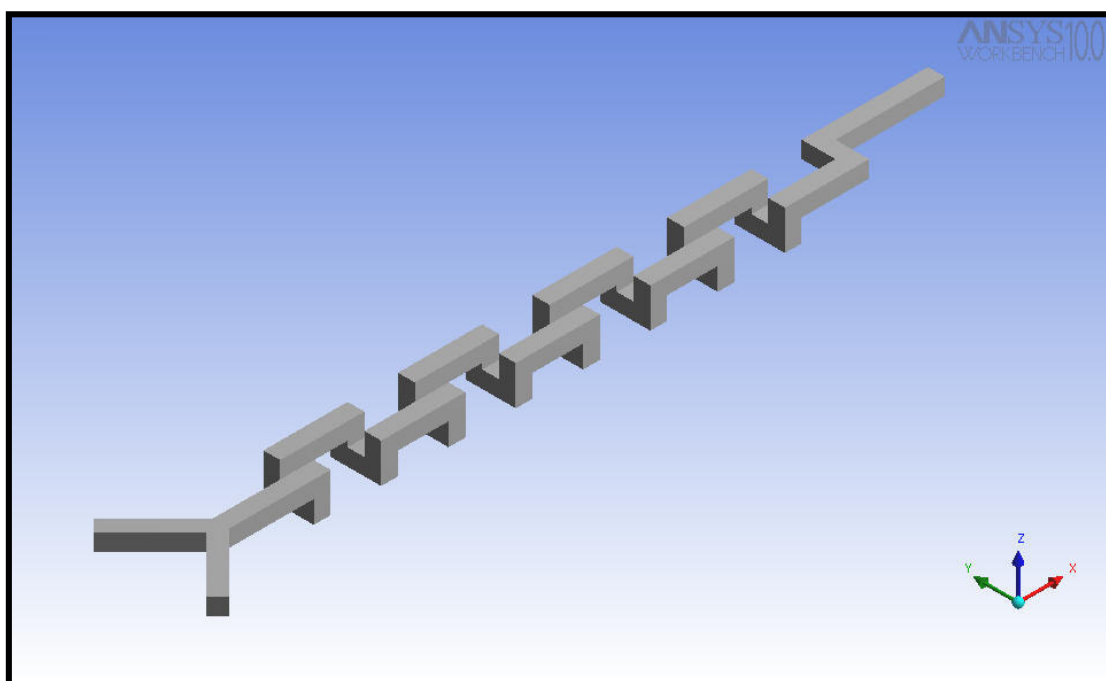


Figura 39 - Geometria do micromisturador M3.

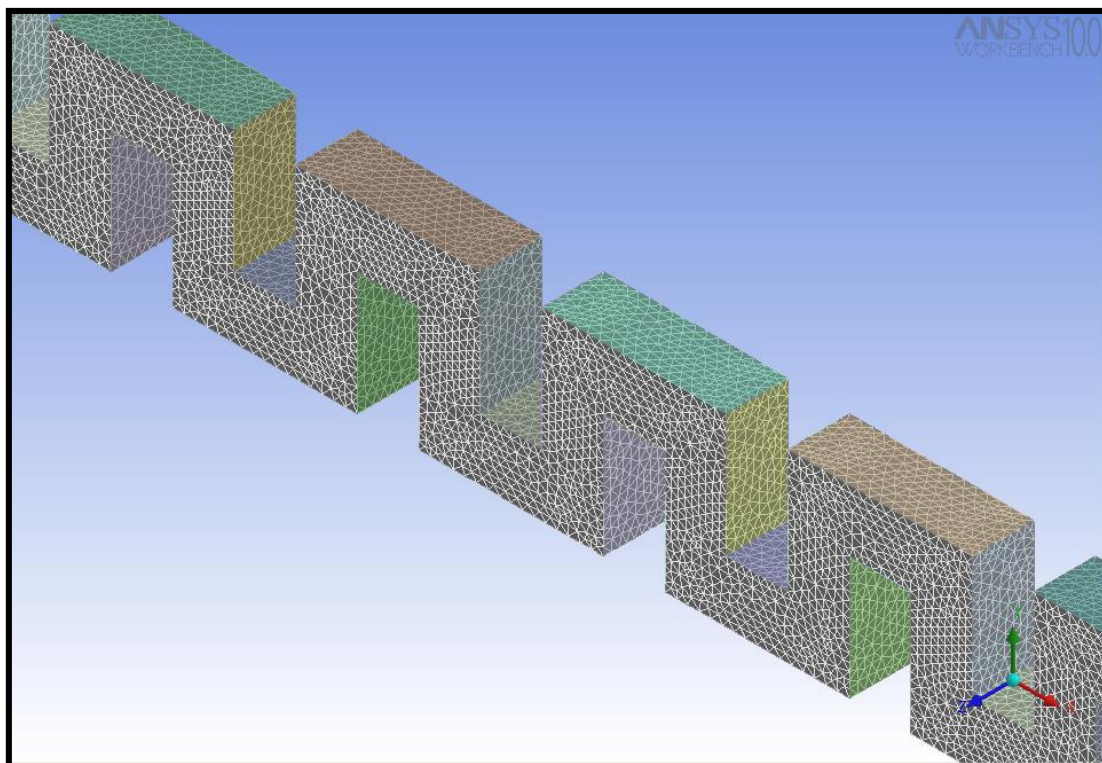


Figura 40 - Detalhe da malha gerada para o micromisturador M1.

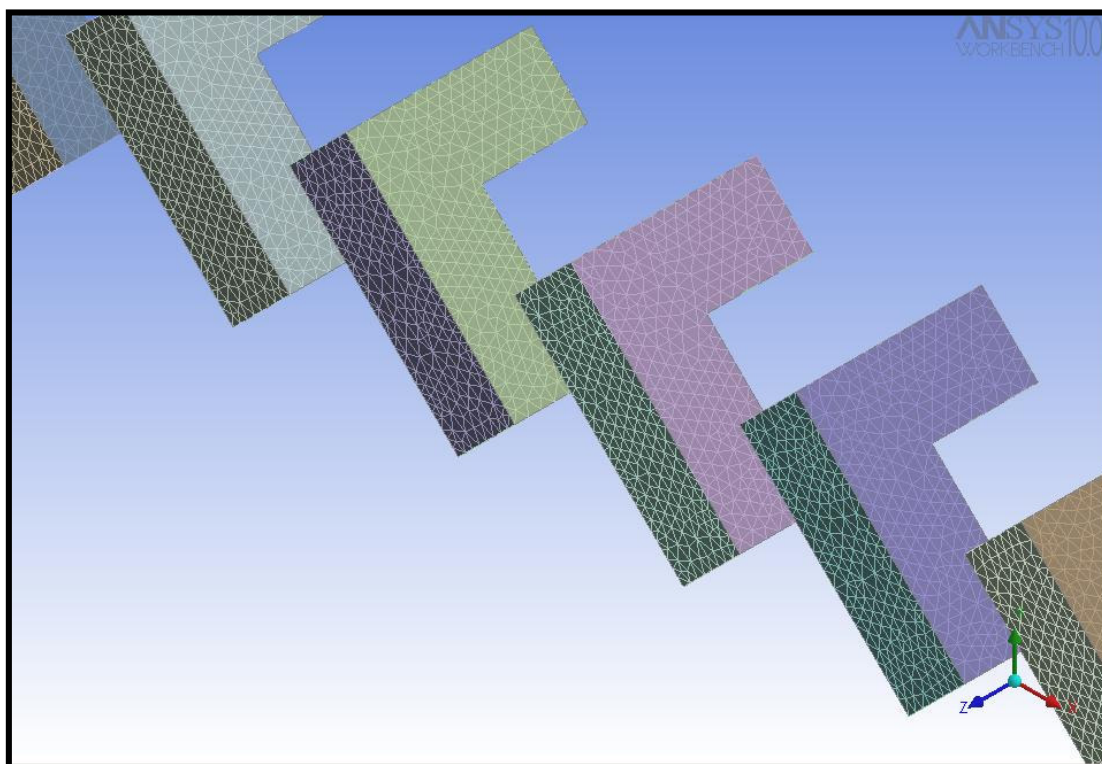


Figura 41 - Detalhe da malha gerada para o micromisturador M2.

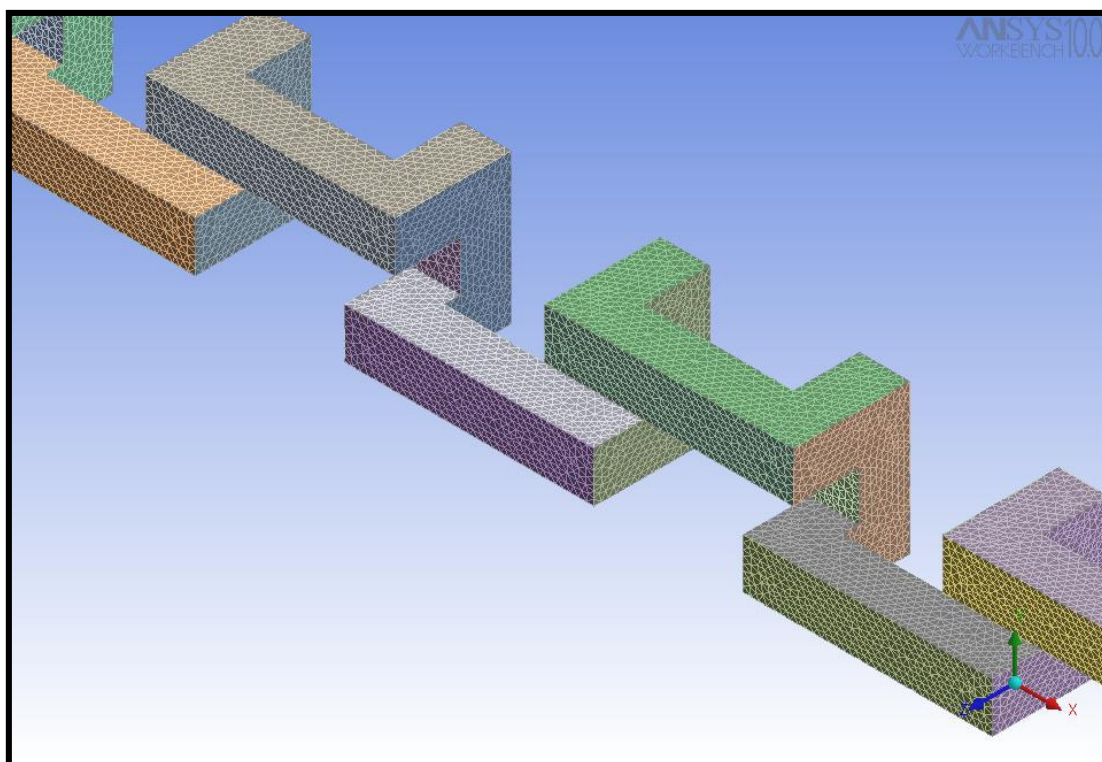


Figura 42 - Detalhe da malha gerada para o micromisturador M3.

Os micromisturadores foram testados para quatro vazões de alimentação dos fluidos e para três níveis de refinamento da malha, conforme dados apresentados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Condições operacionais.

Vazão [ml/min]	Vazão [m ³ /s]	Área [m ²]	Velocidade [m/s]	Densidade [kg/m ³]	Viscosidade [kg/m.s]	Diâmetro [m]	Reynolds [-]
4,5	0,000000075	0,00000036	0,2083	997	0,0008899	6,00E-04	140,04
9	0,00000015	0,00000036	0,4167	997	0,0008899	6,00E-04	280,09
18	0,0000003	0,00000036	0,8333	997	0,0008899	6,00E-04	560,18
36	0,0000006	0,00000036	1,6667	997	0,0008899	6,00E-04	1120,35

A faixa de vazão estudada para os diferentes micromisturadores produzia um escoamento com números de Reynolds na faixa do regime laminar ($Re < 1200$), conforme pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 3 - Parâmetros das malhas geradas para os três micromisturadores.

	Unidade	Malha 1			Malha 2			Malha 3		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Fator de Escala	[-]	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tamanho Máximo Global	[mm]	0,002	0,002	0,002	0,0008	0,0008	0,0008	0,0006	0,0006	0,0006
Tamanho Máximo Superfície	[mm]	0,002	0,002	0,002	0,0008	0,0008	0,0008	0,0006	0,0006	0,0006
Razão - Altura	[-]	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Tetra Size Ratio	[-]	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Número de Camadas de Prismas	[-]	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Altura Total da Camada de Prismas	[-]	0,002	0,002	0,002	0,0008	0,0008	0,0008	0,0006	0,0006	0,0006
Número de Nós	[-]	21953	19171	19094	210732	161068	167884	657709	447504	486303
Número de Elementos	[-]	48658	41814	41718	617638	470658	490916	2175260	1524905	1649397
Tetraedros	[-]	13428	10770	10718	342858	260158	271290	1423680	1036199	1114167
Pirâmides	[-]	909	622	898	0	0	8	0	10	0
Cunhas	[-]	34321	30422	30102	274780	210500	219618	751580	488696	535230
Máxima Razão entre os Comprimen	[-]	15,7347	20,1764	20,1673	15,4065	17,7339	14,8906	16,2585	18,9009	15,866
Volume	[m ³]	2,49E-08	1,90E-08	2,03E-08	2,49E-08	1,90E-08	2,03E-08	2,49E-08	1,90E-08	2,03E-08

Conforme apresentado na Tabela 3, os parâmetros “Razão-Altura”, “Tetra Size Ratio” e “Número de Camadas de Prismas” foram mantidos constantes para todas as malhas construídas.

Os micromisturadores foram testados em regime estacionário, com uma mistura formada por dois fluidos newtonianos com propriedades idênticas às da água a 20 °C, neste caso as propriedades de interesse são a massa específica igual a 997 kg/m³ e a viscosidade cinemática igual a 0,0008899 Pa.s. Para prescrever as condições operacionais utilizou-se como condições de contorno a velocidade de entrada dos fluidos perpendicular a seção de entrada (perfil achatado/plano) e com magnitude iguais aos valores apresentados na Tabela 2.

Para as paredes dos micromisturadores utilizou-se como condição de contorno ‘*no-slip*’ sem escorregamento, ou seja, utilizou-se como hipótese que a parede era totalmente lisa. Para a seção de saída foi imposta como condição que a pressão relativa média em toda a área era igual a zero, tomando como pressão de referência 101.325 Pa.

Ainda para resolver o problema adotou-se para a difusividade o valor de $1,0 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$.

Para a solução das equações de balanço de quantidade de movimento, de massa utilizou-se o método “high-resolution”, conforme discutido no item 2.5.1 e para a concentração dos componentes utilizou-se o valor de 1 para o “blend factor” para minimizar o efeito da difusão numérica como discutida por Maliska (2004).

Para acelerar o processo de convergência especificou-se um valor para o ‘*timestep*’ compatível com a velocidade, o mesmo é equivalente a um passo de

integração, uma vez que um falso transiente é resolvido. Ele foi calculado como um tempo de residência dividindo-se o volume do micromisturador pela vazão volumétrica. O valor utilizado para todas as simulações foi de 0,02 s para as equações de quantidade de movimento e da continuidade, e de 2 s para a fração mássica.

Para se atingir o critério de convergência de resíduo máximo igual a $1,0 \cdot 10^{-4}$ foram necessárias em média 200 iterações, as quais tomavam um maior período de tempo quando das malhas mais refinadas.

Quatro vazões distintas foram simuladas desde 4,5 ml/min até 36 ml/min, que para a o diâmetro hidráulico dos micromisturadores testados, resulta em um número de Reynolds na faixa de $140 < Re < 1200$, o que costuma ser caracterizado como regime laminar para escoamentos em tubos lisos de seção circular e também para dutos de seção retangular como verificado por Xu et al. (2000). Portanto, foi utilizado como hipótese adicional para o modelo, regime laminar, sendo, dessa maneira, desnecessário qualquer modelo de turbulência.

Na indisponibilidade de informações referentes à pressão de entrada e saída dos micromisturadores testados nos trabalhos de Cunha (2007) e Costa (2003), foi adotado como critério para validar as simulações realizadas, o cálculo do fator de atrito, com base na discussão realizada por Kohl et al. (2005), o qual demonstrou que a teoria clássica para o cálculo do fator de atrito continua válida para a faixa de diâmetros hidráulicos que se utilizam na fabricação de micromisturadores.

Essa validação foi realizada para um trecho de seção retangular de 600 μm x 600 μm e com comprimento de 1200 μm . Para garantir o escoamento completamente desenvolvido, uma das premissas para a validade da equação do cálculo do fator de atrito, duas simulações foram realizadas para cada malha e vazão.

Na primeira fez-se a simulação com um perfil de velocidade achatado na entrada para as mesmas vazões dos micromisturadores estudados. Logo em seguida, com o pós-processamento das simulações anteriores foi possível que o perfil parabólico de velocidade obtido na seção de saída do trecho reto fosse exportado, e servisse de condição de entrada para a segunda simulação na qual se

adotou como condição de contorno da entrada o resultado obtido na seção de saída da simulação anterior.

5.1 MICROMISTURADOR 1 (M1)

Para cada micromisturador foi realizado um teste de independência de malha. De maneira a identificar se para uma malha a solução obtida é independente do número de nós, foram calculados desvios de algumas variáveis principais (velocidade, pressão, fração mássica, qualidade da mistura e perda de carga) para este fim.

Os desvios apresentados nas Tabelas 4, 5, 6 e 7 foram calculados com base em um levantamento feito em 29 planos ao longo dos micromisturadores, sendo apresentados os desvios máximos encontrados ao longo destes planos. Os desvios são definidos da seguinte maneira:

$$D1 = \frac{\varphi_{\text{malha 1}} - \varphi_{\text{malha 3}}}{\varphi_{\text{malha 3}}}; D2 = \frac{\varphi_{\text{malha 2}} - \varphi_{\text{malha 3}}}{\varphi_{\text{malha 3}}}; D3 = \frac{\varphi_{\text{malha 1}} - \varphi_{\text{malha 2}}}{\varphi_{\text{malha 2}}};$$

Em que malha 1 identifica a malha mais grosseira e a malha 3 a malha mais refinada, ou seja, com o maior número de nós e elementos.

Sendo que os valores das variáveis (pressão, velocidade e fração mássica) levantadas nos planos, são os valores médios ponderados com a vazão mássica em cada um dos planos. Portanto, um nó da malha deste plano que tenha maior vazão mássica terá um maior peso no cálculo da média. As duas exceções são a qualidade da mistura, a qual é um valor calculado com base na fração mássica de cada plano como apresentada por Engler et al. (2004) e discutido no item 2.7 e a perda de carga um parâmetro calculado pela diferença de pressão na entrada e na saída do micromisturador.

Nas Tabelas 4, 5, 6 e 7 verifica-se que para o micromisturador 1, há uma concordância entre os valores encontrados e entre a malha 2 e a malha 3 tem-se uma diferença máxima de 14% nos valores, diferença está que para fins qualitativos não induz a conclusões divergentes.

Tabela 4 - Comparação entre as malhas do micromisturador M1 - Vazão 4,5ml/min.

	D1	D2	D3
Fração Mássica Média	0,83%	0,31%	1,06%
Velocidade Média	18,77%	5,67%	15,17%
Pressão	7,16%	8,19%	5,30%
Qualidade da Mistura	87,69%	36,25%	69,63%
Perda de Carga	5,76%	0,41%	5,33%

Tabela 5 - Comparação entre as malhas do micromisturador M1 - Vazão 9ml/min

	D1	D2	D3
Fração Mássica Média	0,87%	0,40%	1,08%
Velocidade Média	27,38%	9,02%	23,36%
Pressão	15,32%	8,40%	10,94%
Qualidade da Mistura	50,41%	16,09%	66,15%
Perda de Carga	2,94%	2,49%	0,46%

Tabela 6 - Comparação entre as malhas do micromisturador M1 - Vazão 18ml/min

	D1	D2	D3
Fração Mássica Média	0,87%	0,91%	1,06%
Velocidade Média	25,49%	9,66%	24,17%
Pressão	11,96%	6,67%	7,87%
Qualidade da Mistura	16,82%	19,44%	30,75%
Perda de Carga	4,94%	3,90%	1,07%

Tabela 7 - Comparação entre as malhas do micromisturador M1 - Vazão 36ml/min

	D1	D2	D3
Fração Mássica Média	0,84%	1,44%	1,15%
Velocidade Média	26,98%	14,08%	24,69%
Pressão	18,54%	13,21%	15,66%
Qualidade da Mistura	23,69%	22,13%	22,15%
Perda de Carga	4,13%	1,42%	5,47%

O grande problema que pode ser identificado e será mostrado com os resultados apresentados a seguir, é a questão do refinamento da malha. Apesar do ganho obtido com o refinamento da malha, uma solução independente da malha não foi alcançada neste trabalho.

5.1.1 Qualidade da Mistura de M1

Nas Figuras 43 (a), (b), (c) e (d) demonstra-se os contornos da evolução da fração mássica ao longo do micromisturador para as diferentes vazões simuladas, sendo (a) a menor vazão e (d) a maior vazão.

O contorno externo mostra que são necessários aproximadamente sete elementos de mistura para se alcançar a mistura completa na menor vazão, enquanto que para a maior vazão, três elementos são suficientes. Com uma maior vazão, tem-se um menor tempo de residência no interior do micromisturador, se a transferência de massa fosse dominada única e exclusivamente pela difusão, para um menor tempo de residência ter-se-ia uma pior qualidade da mistura com o aumento da vazão, porém isso não é constatado, logo, a mistura foi obtida, principalmente, pelo transporte convectivo de massa.

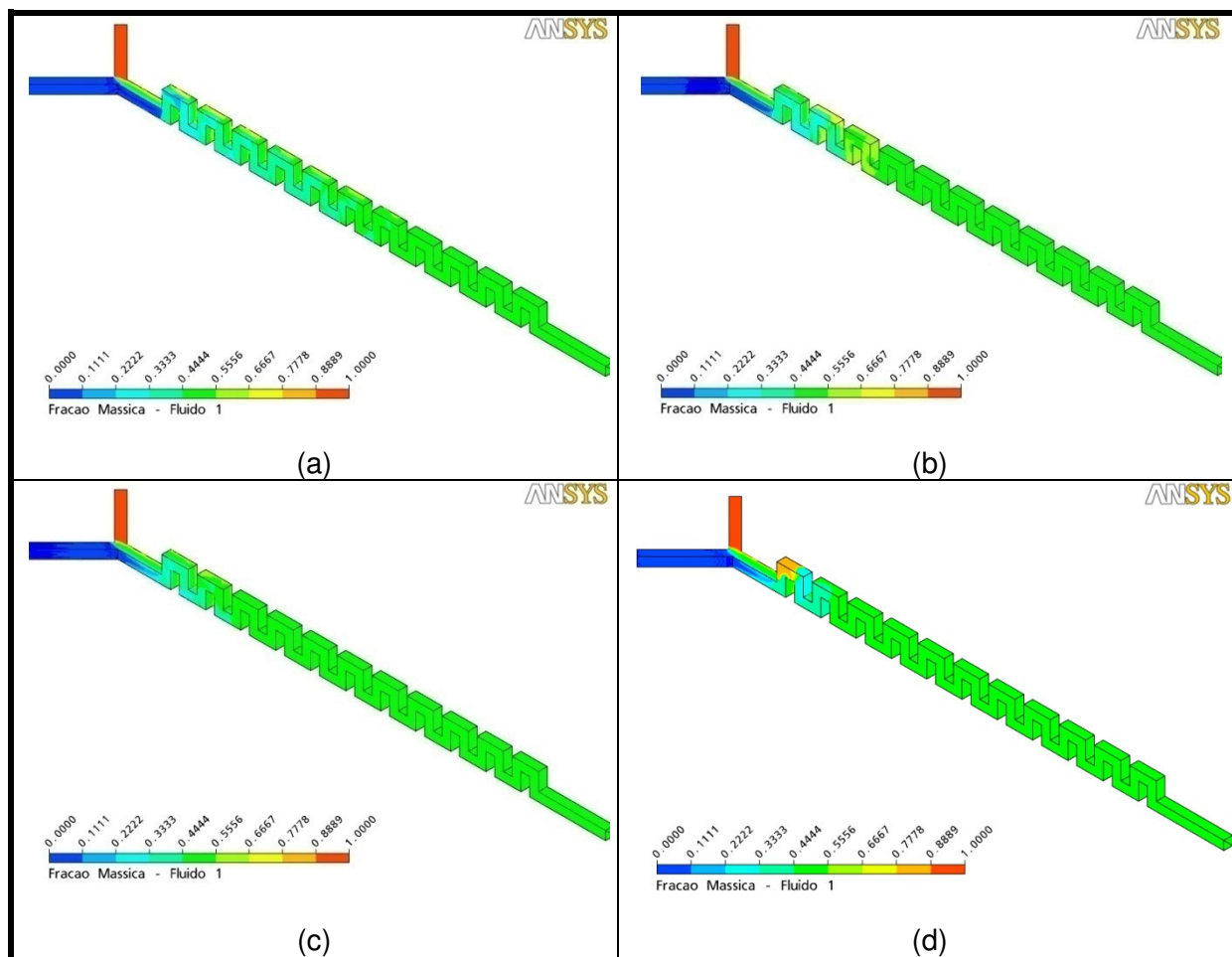


Figura 43 - Contornos de Fração Mássica para o micromisturador M1 para as diferentes vazões.

Nas Figuras 44, 45, 46 e 47 (em ordem crescente de vazão) nota-se quanto maior a vazão, menor o comprimento necessário no interior do micromisturador para se alcançar uma completa mistura. Além disso, é possível notar que no trecho reto do micromisturador, antes de ocorrer à primeira mudança de direção do escoamento, as frações mássicas possuem contornos simétricos, porém após passarem pelo primeiro elemento de mistura tal simetria desaparece.

Contudo, no micromisturador com o menor número de Reynolds nota-se uma simetria ao longo de todos os planos. Isto pode ser um indicativo de uma diferença no escoamento gerado para os diferentes números de Reynolds simulados, quanto maior o número de Reynolds menor a simetria no escoamento gerado.

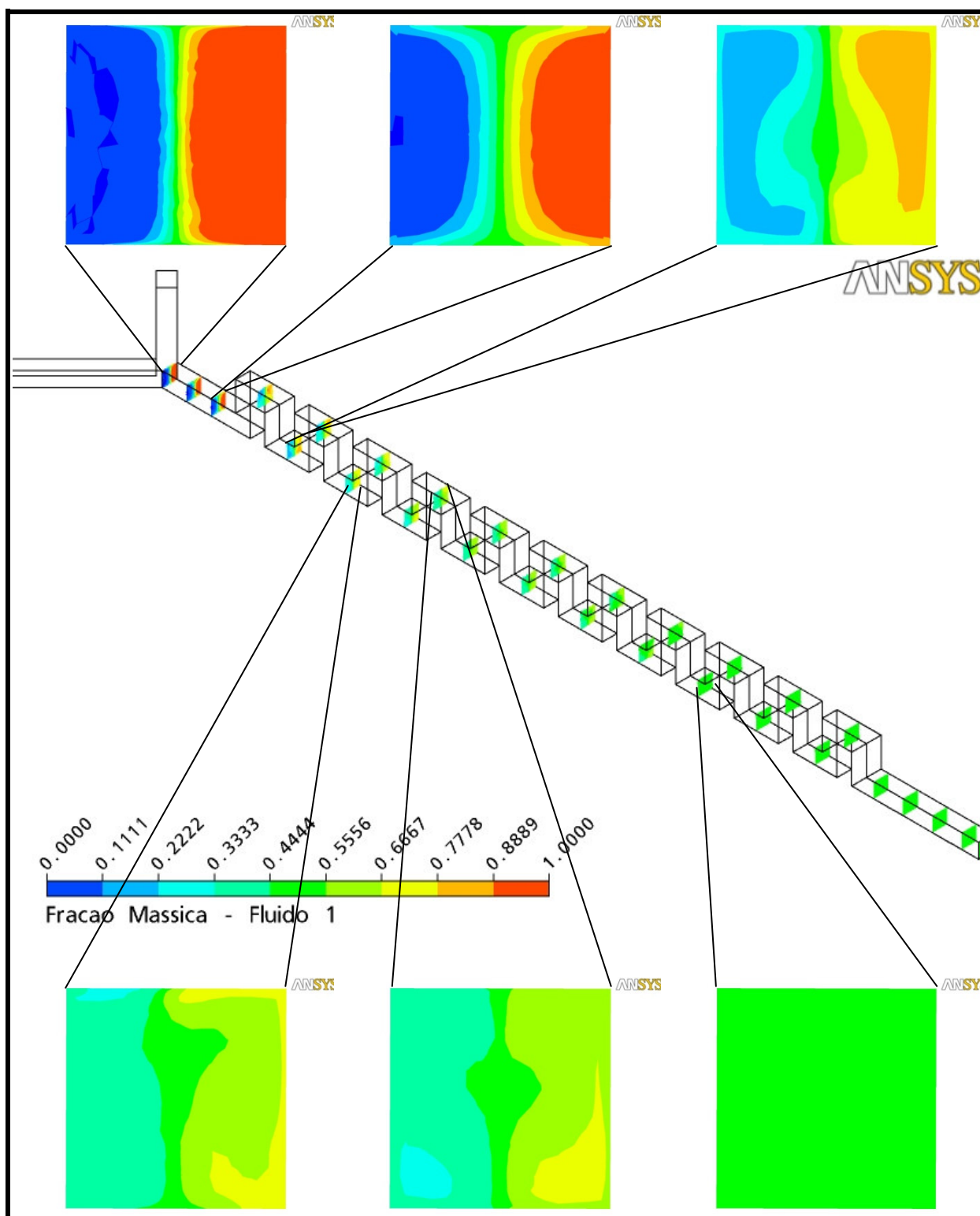


Figura 44 - Detalhes dos contornos de fração mássica para vazão de 4,5 ml/min no micromisturador M1.

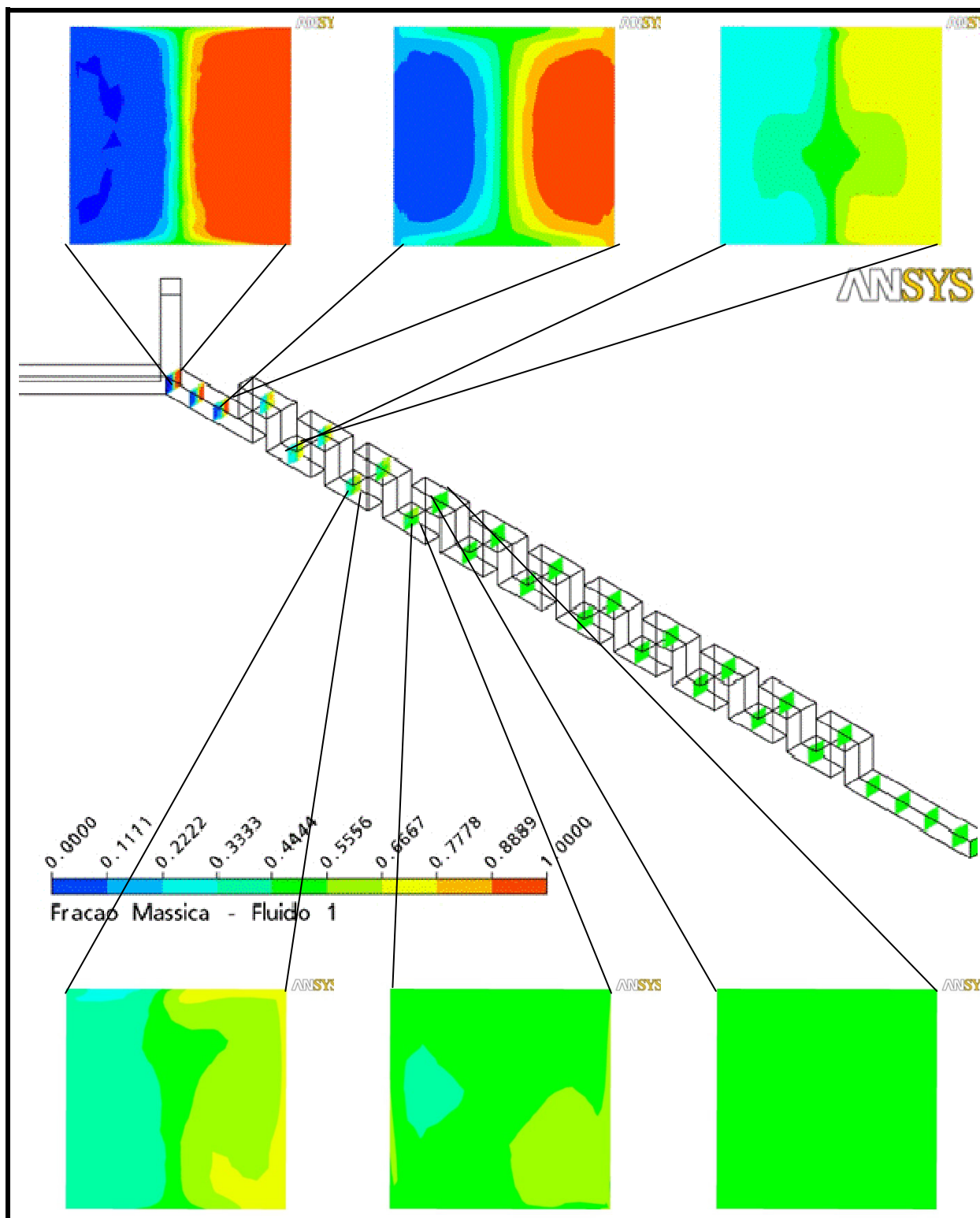


Figura 45 - Detalhes dos contornos de fração mássica para vazão de 9 ml/min no micromisturador M1.

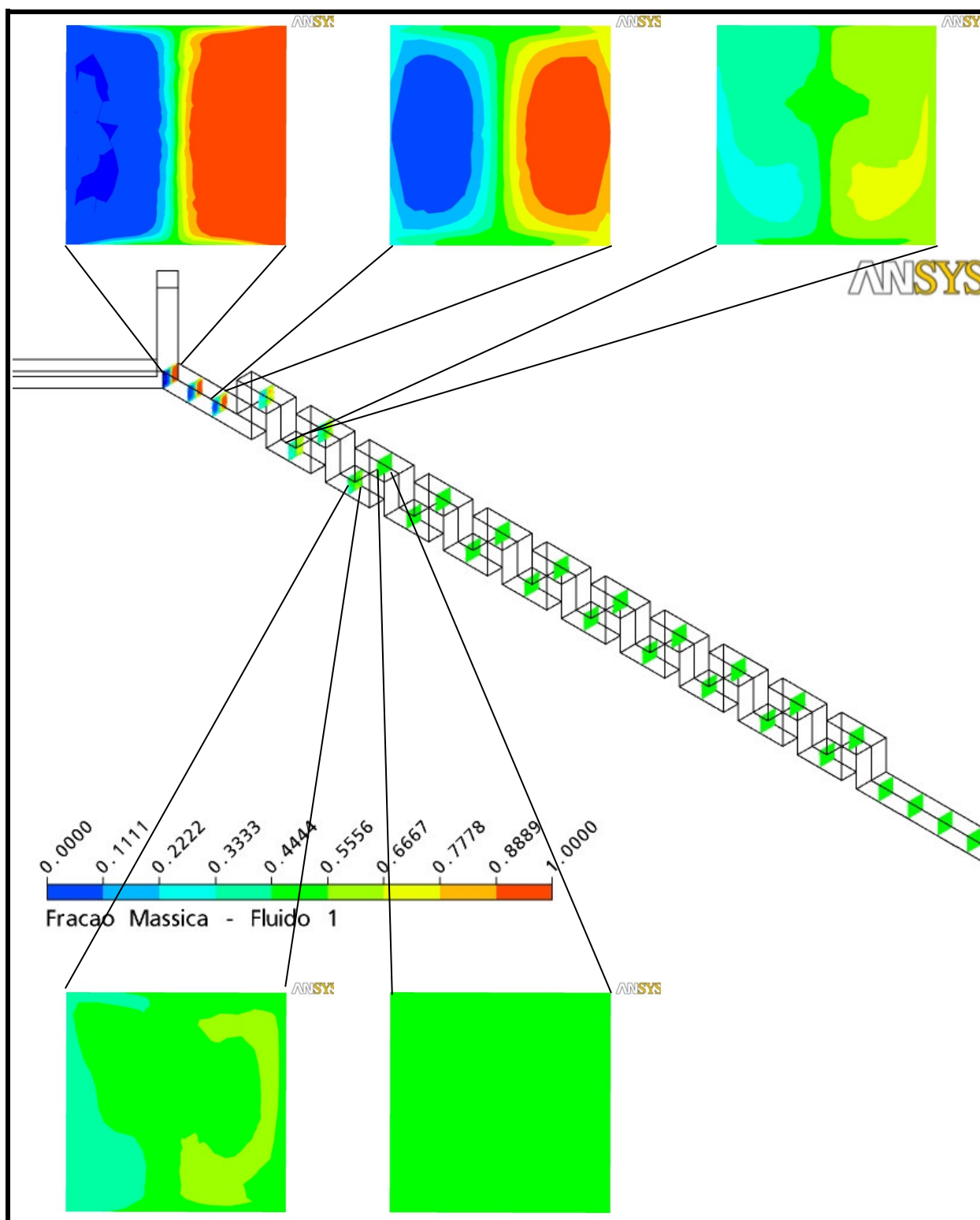


Figura 46 - Detalhes dos contornos de fração mássica para vazão de 18 ml/min no micromisturador M1.

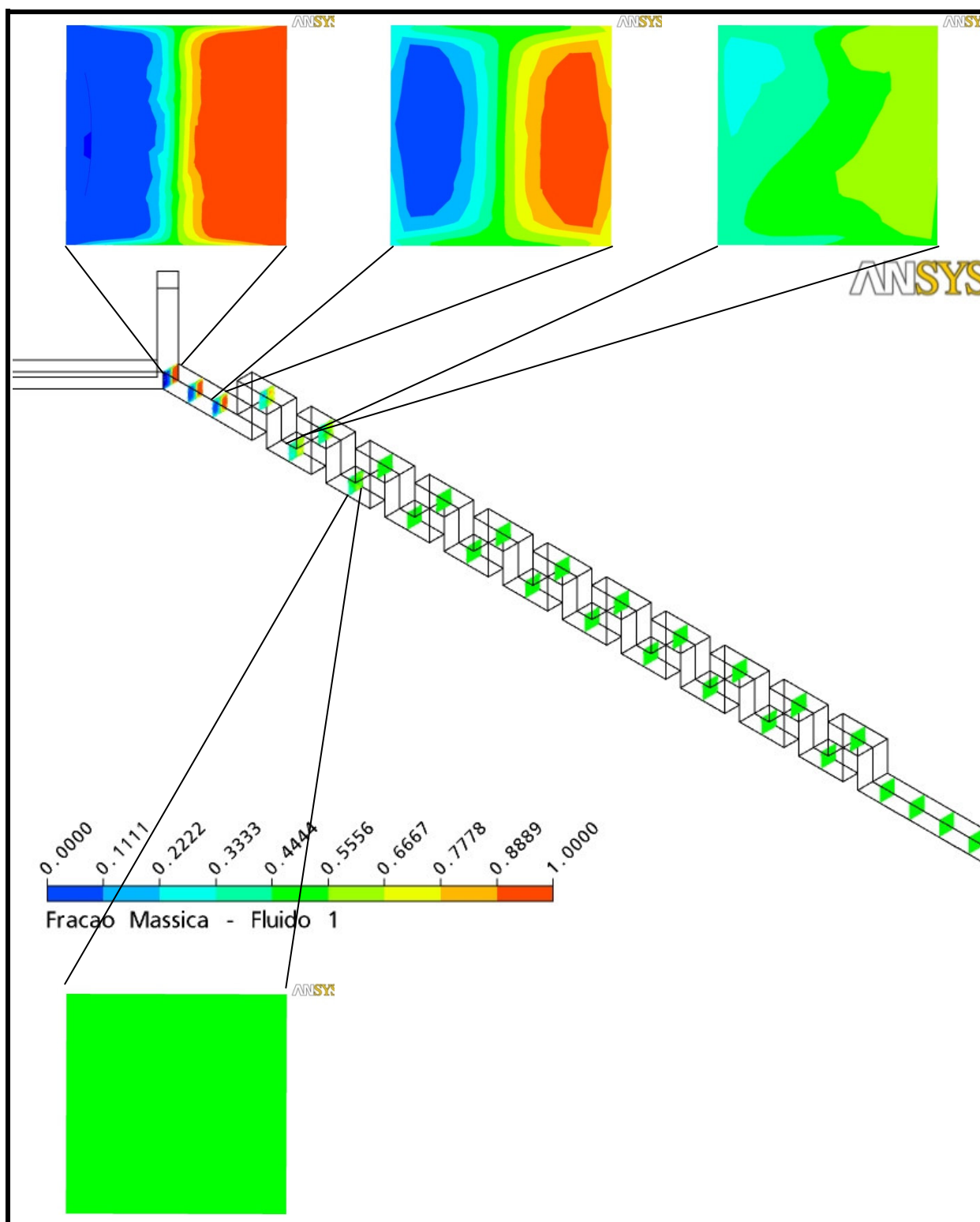


Figura 47 - Detalhes dos contornos de fração mássica para vazão de 36 ml/min no micromisturador M1.

Nas Figuras 48 (a), (b), (c) e (d), tem-se um comparativo do avanço da qualidade da mistura em função de uma posição normalizada, a qual foi definida por:

$$Posição [\%] = \frac{z_i - z_{min}}{z_{max} - z_{min}} \cdot 100\%$$

Em que z_i identifica o comprimento equivalente que foi percorrido no interior do micromisturador, para z_{min} , a posição será = 0% e para z_{max} a posição será igual a 100%.

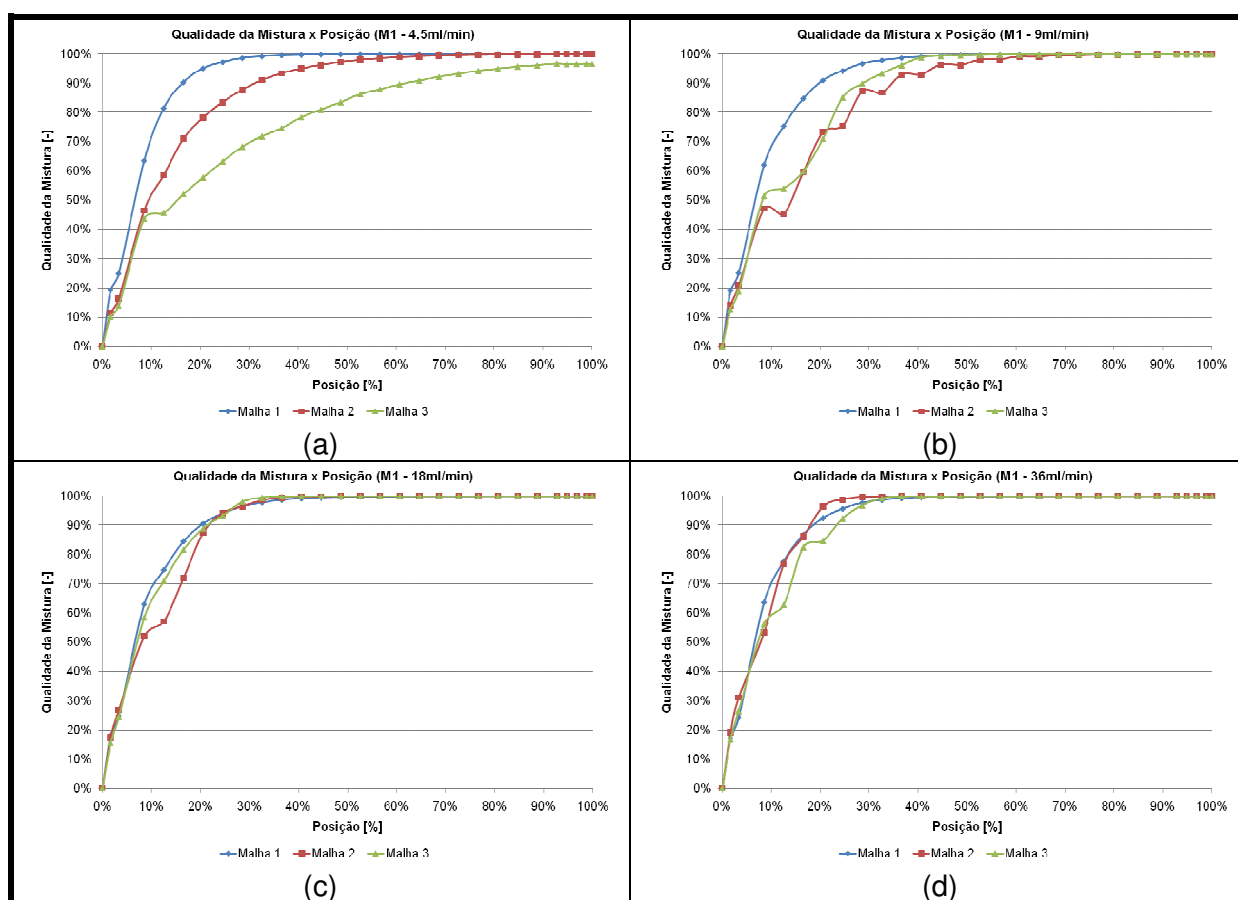


Figura 48 - Parâmetro da qualidade da mistura em função da posição ao longo do micromisturador M1 para as diferentes vazões com diferentes malhas.

Para as duas condições com o menor número de Reynolds, pode-se observar que há uma forte influência do resultado obtido em função do grau de refinamento da malha, o mesmo não ocorrendo para as duas outras condições. Isso pode ser um indício de que os mecanismos de mistura os quais surgem nessas condições de operação são diferentes, e uma malha com menor grau de refinamento não é capaz de captar essa condição, e, portanto, deve-se refinar ainda mais a malha.

Na Figura 49 é apresentado um comparativo entre as malhas mais refinadas para as diferentes vazões.

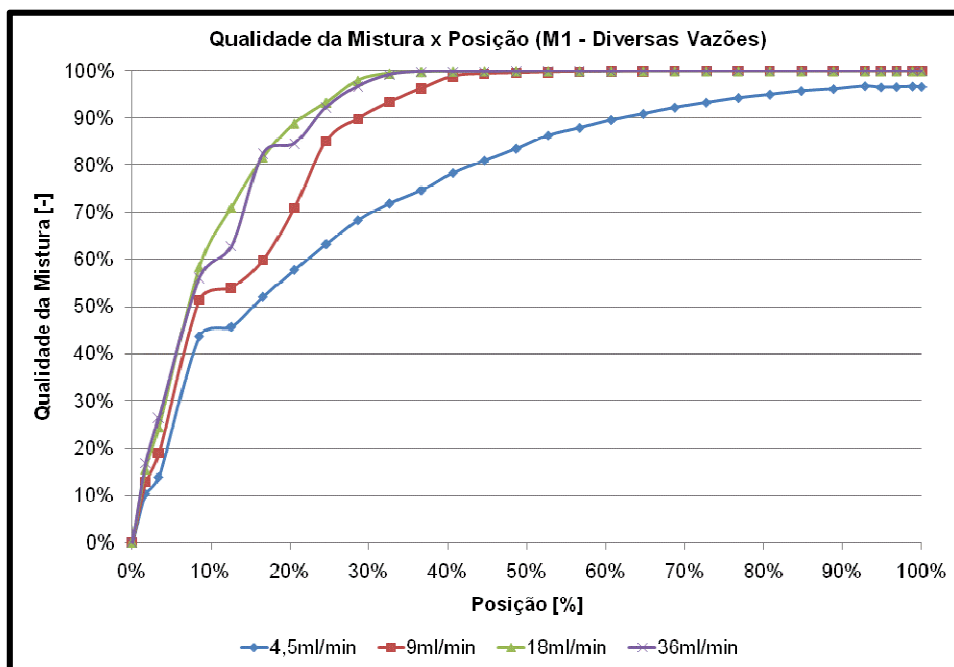


Figura 49 - Comparativo da qualidade da mistura para as malhas mais refinadas do micromisturador M1 nas diferentes vazões.

Com a menor vazão o micromisturador não alcança a completa mistura dos componentes. Para as vazões de 18 ml/min e 36 ml/min, verifica-se que o perfil de qualidade de mistura ao longo do micromisturador é praticamente idêntico, portanto, independente da vazão, mostrando que a transferência de massa é devida principalmente pelo mecanismo convectivo, e das mudanças de direção proporcionados pela geometria e do efeito inserido pelas curvas.

5.1.2 Perfil de Pressão de M1

Nas Figuras 50 (a), (b), (c) e (d) é possível identificar que um mesmo perfil de pressão se desenvolve durante o escoamento dos fluidos no interior do

micromisturador. Porém, como já era esperado, quanto maior a vazão maior o nível de pressão envolvido.

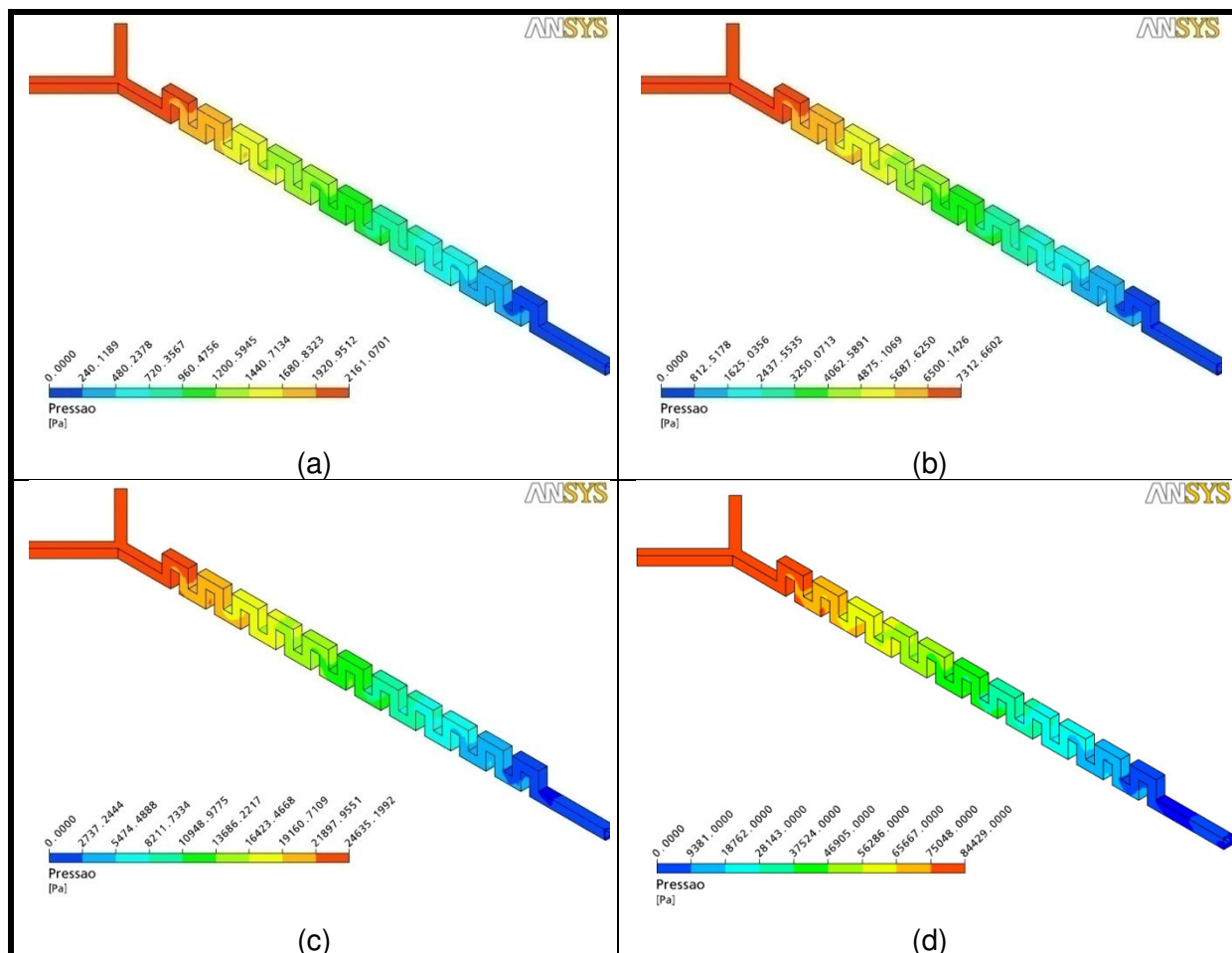


Figura 50 - Contornos de Pressão para o micromisturador M1 para as diferentes vazões.

As pressões máximas no interior do micromisturador M1 nas condições simuladas estão na faixa $2,1 \text{ kPa} < P_{\text{total}} < 85,0 \text{ kPa}$.

O conhecimento prévio das pressões envolvidas no regime de operação destes equipamentos é decisivo na escolha de materiais e processos de fabricação, direcionando a escolha para àqueles que possuam a resistência mecânica adequada para a operação sem acarretar vazamentos.

Nas Figuras 51 (a), (b), (c) e (d) é possível verificar um comportamento linear da pressão ao longo do misturador, o que demonstra concordância com o modelo de perda de carga que será utilizado no cálculo do fator de atrito, em que a perda de carga é linearmente dependente do comprimento.

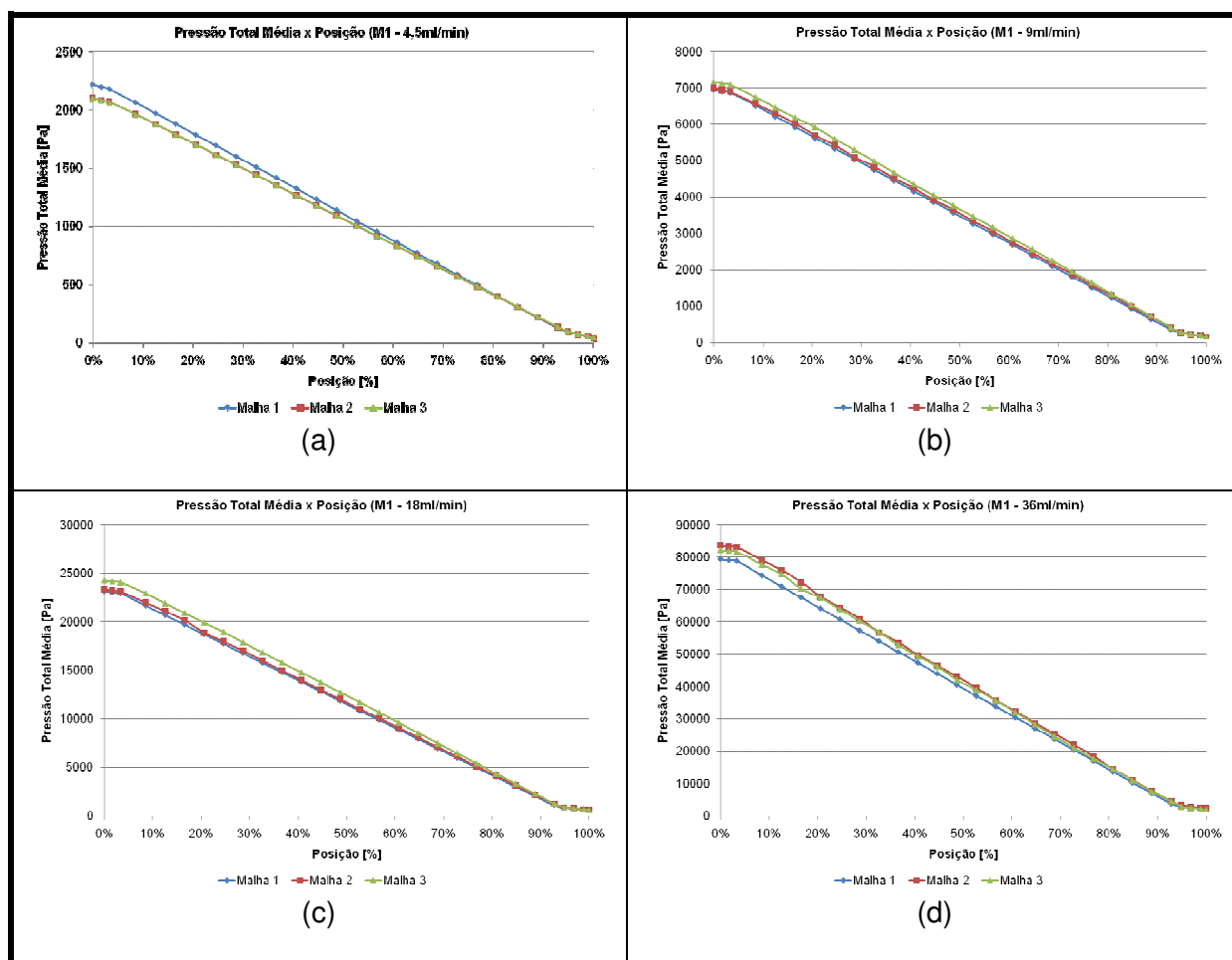


Figura 51 - Pressão total média em função da posição ao longo do micromisturador M1 para as diferentes vazões com diferentes malhas.

5.1.3 Perfil de Velocidade de M1

Nas Figuras 52 (a), (b), (c) e (d) são apresentadas as linhas de corrente para as diferentes vazões. É possível identificar regiões de baixa velocidade e recirculação nos cantos externos superiores e inferiores, demonstrando a existência de um caminho preferencial para o escoamento dos fluidos.

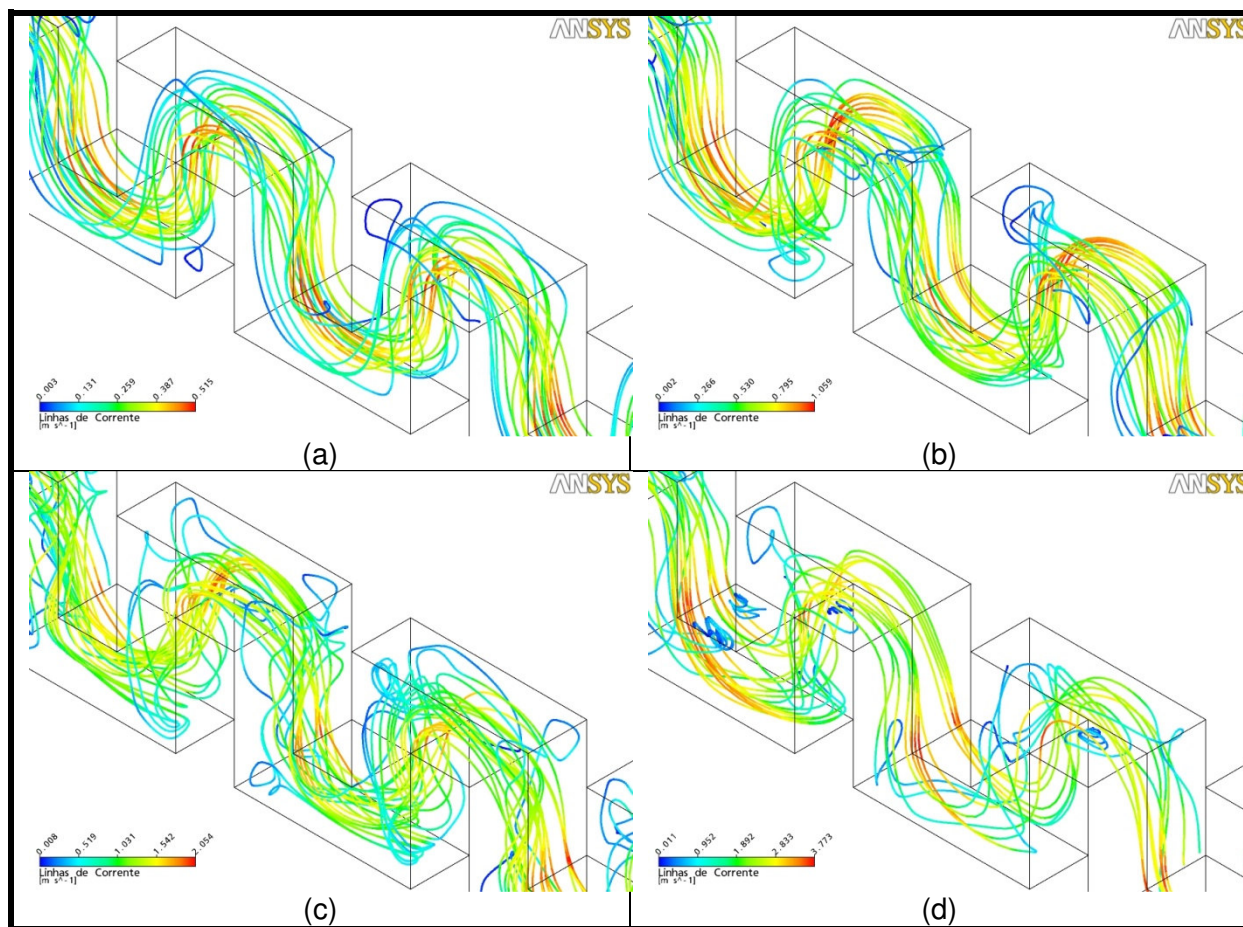


Figura 52 - Linhas de corrente de velocidade para o micromisturador M1 para as diferentes vazões.

Quanto maior o volume de tais regiões maior o tempo de residência que os fluidos terão no interior do micromisturador. Essa recirculação também é característica de um descolamento da camada limite, proporcionada por um gradiente de velocidade positivo, uma vez que não é uma verdade absoluta que só existe escoamento de uma região de alta pressão para uma de baixa, vide os escoamentos compressíveis de gases.

Como esperado quanto maior a vazão, maior a velocidade no interior do micromisturador. Temos velocidades na faixa de $0,52 \text{ m.s}^{-1}$ a $4,12 \text{ m.s}^{-1}$, mantendo a mesma proporção entre as vazões testadas.

Para mostrar o escoamento secundário (vórtices) que surge no interior do micromisturador, são apresentadas as projeções tangenciais dos vetores velocidade para 6 planos distintos no interior do micromisturador M1, para as quatro vazões simuladas nas Figuras 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63 e 64.

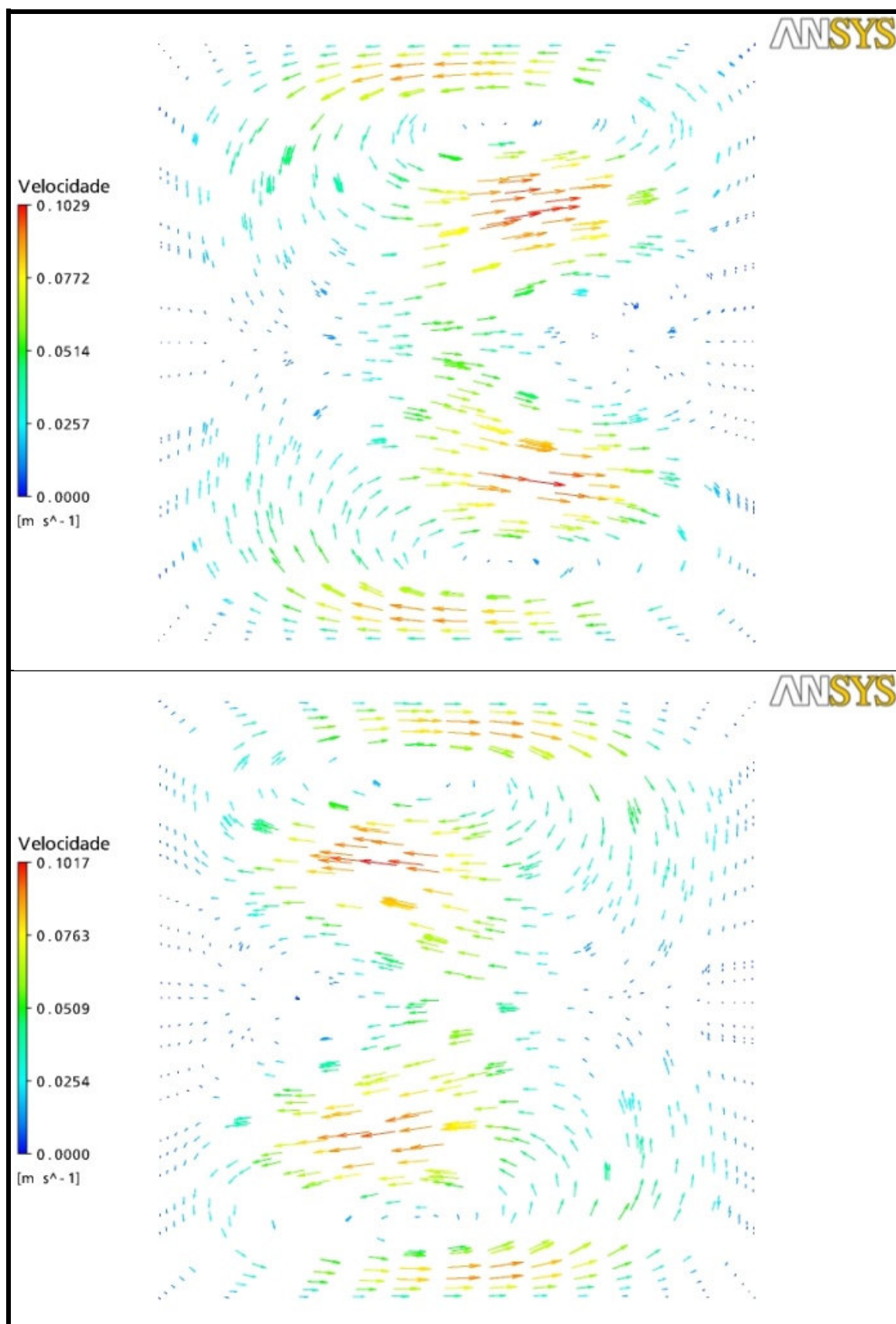


Figura 53 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M1 com vazão 4,5 ml/min.

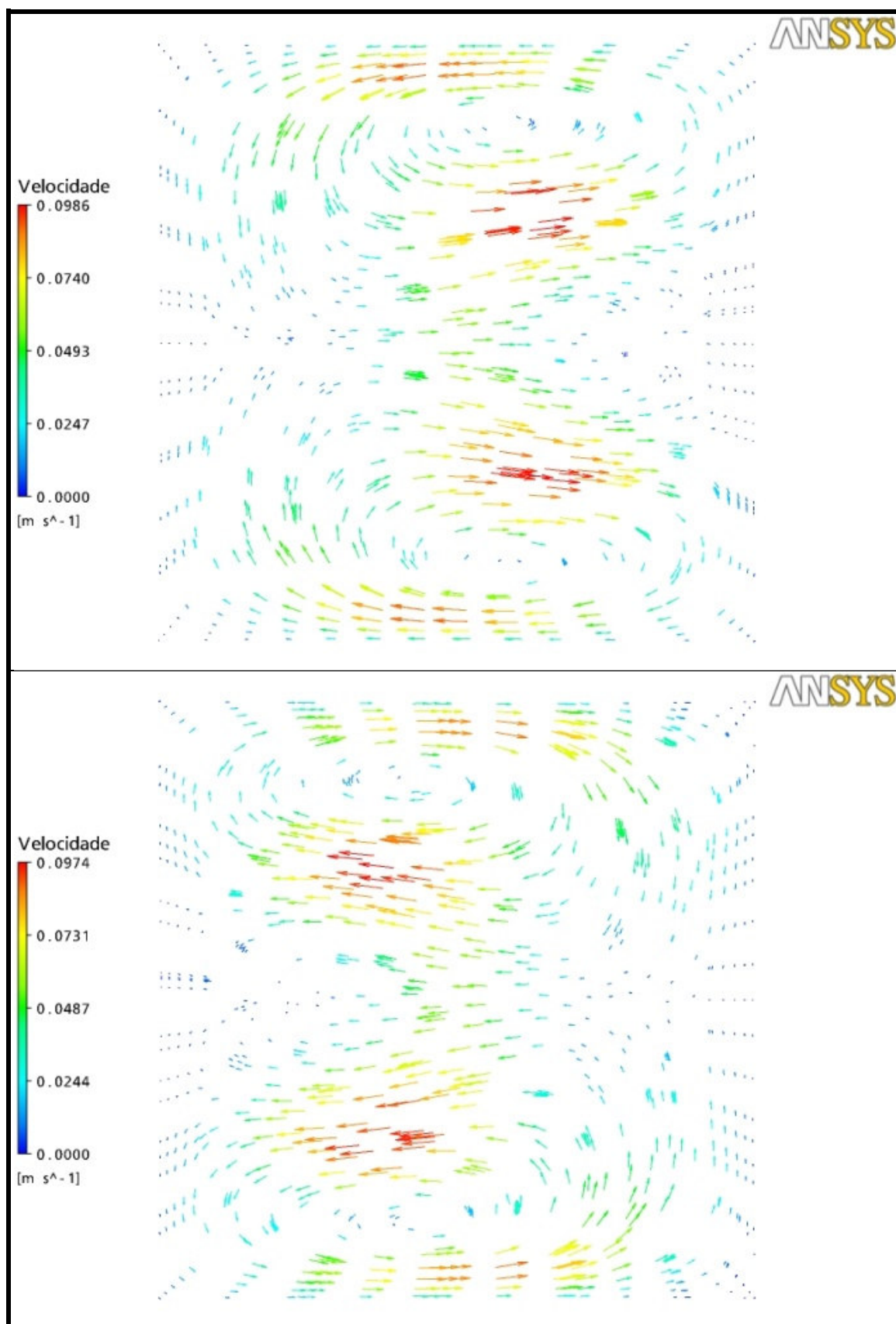


Figura 54 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M1 com vazão 4,5 ml/min (Continuação).

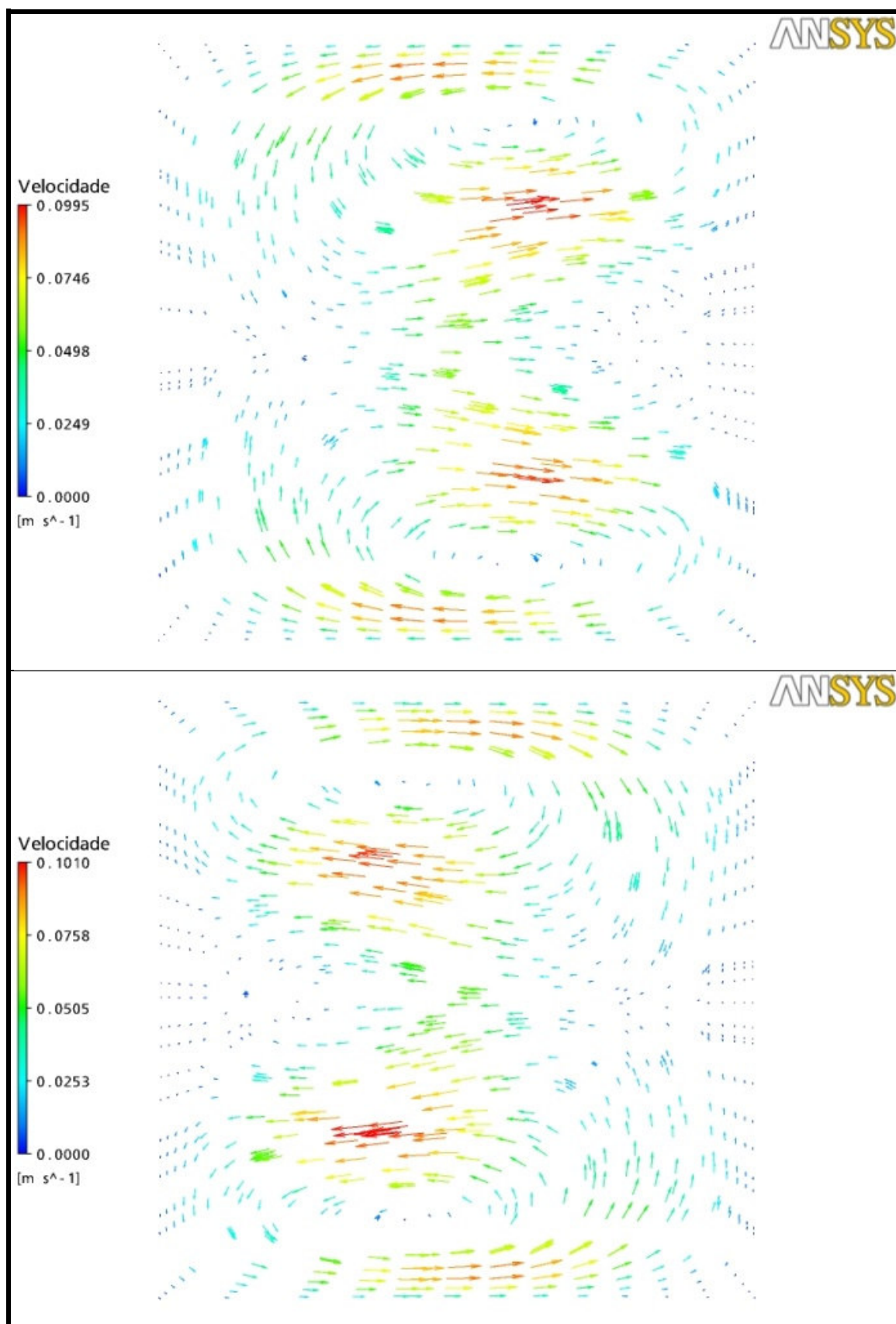


Figura 55 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M1 com vazão 4,5 ml/min (Continuação).

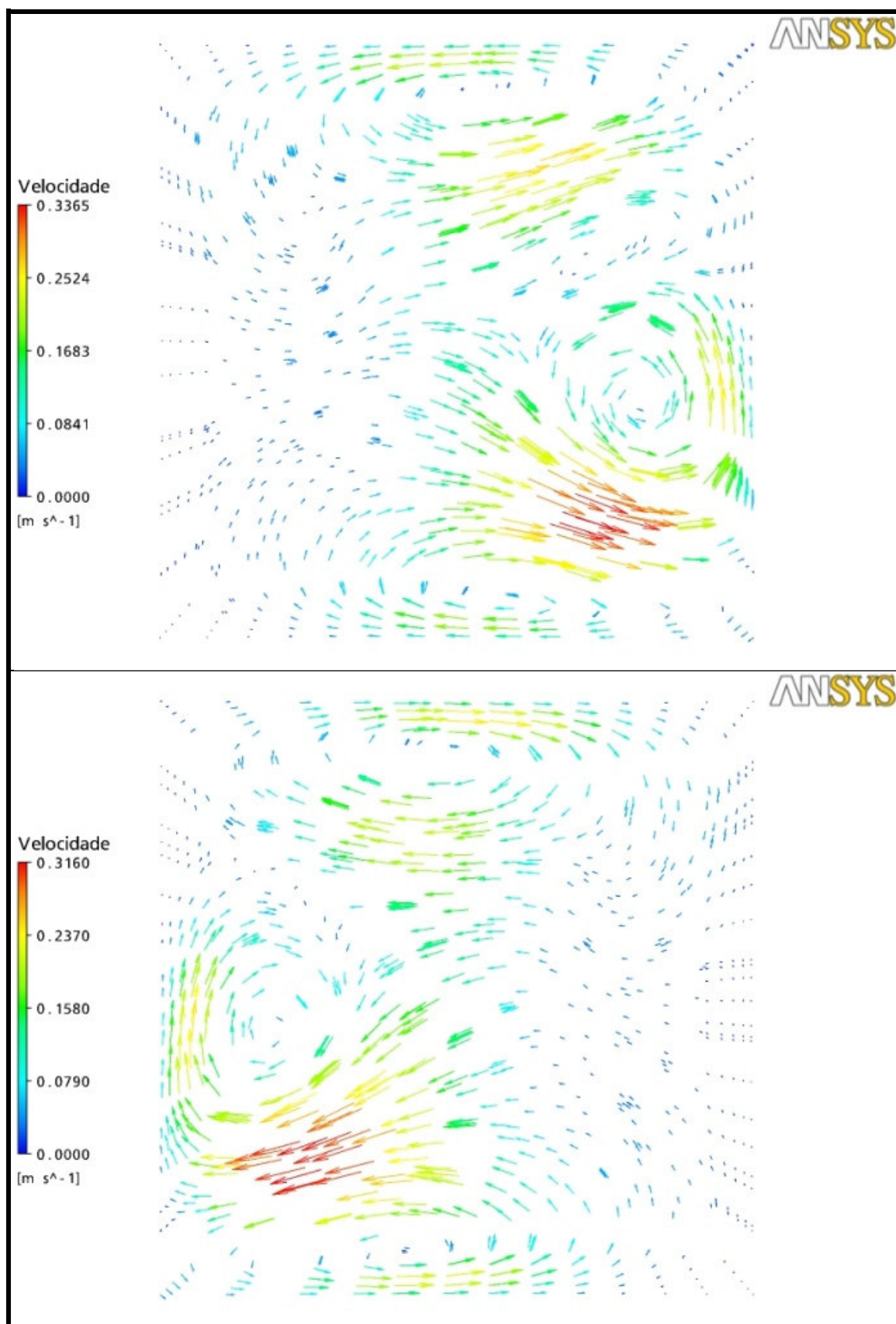


Figura 56 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M1 com vazão 9 ml/min.

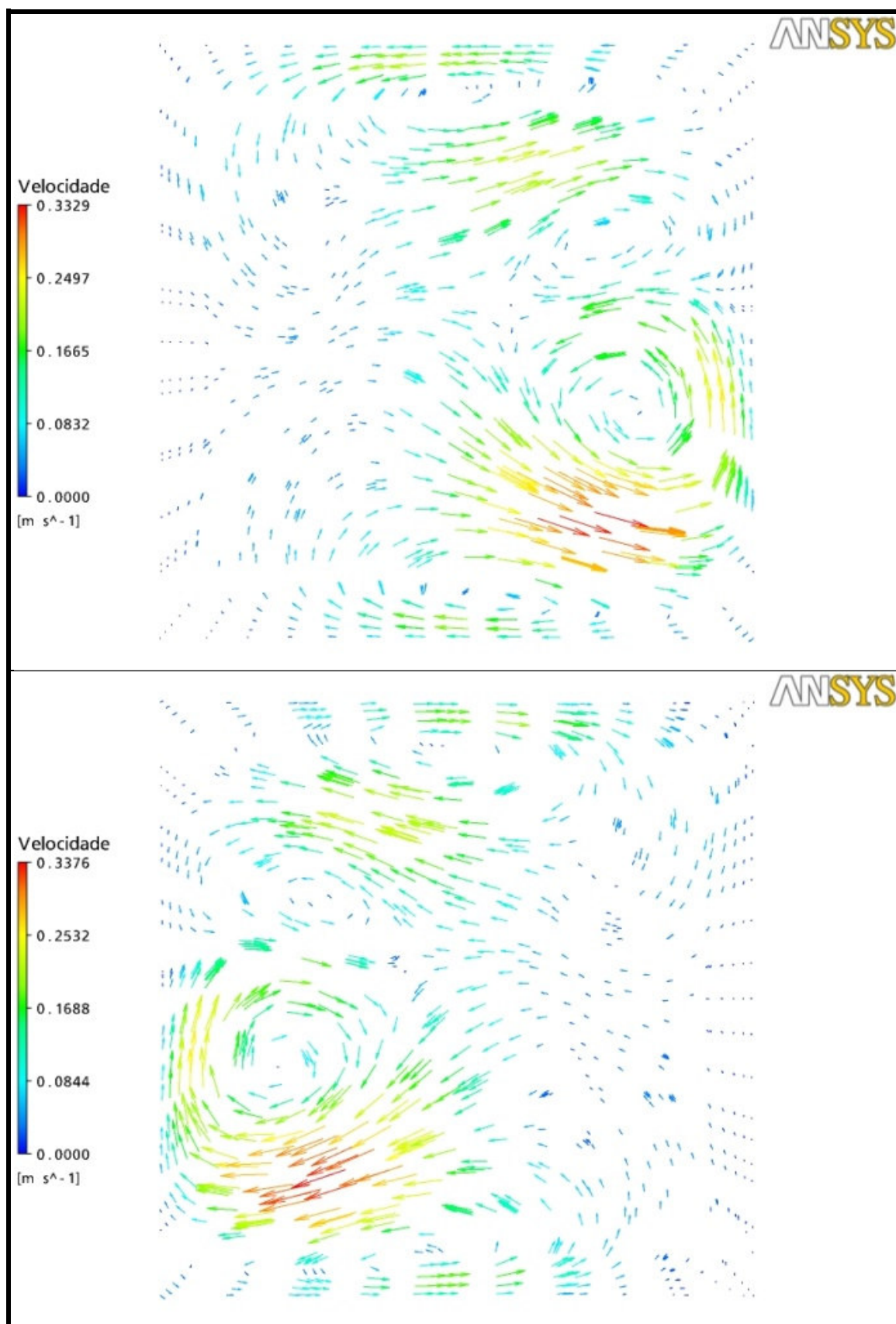


Figura 57 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M1 com vazão 9 ml/min (Continuação).

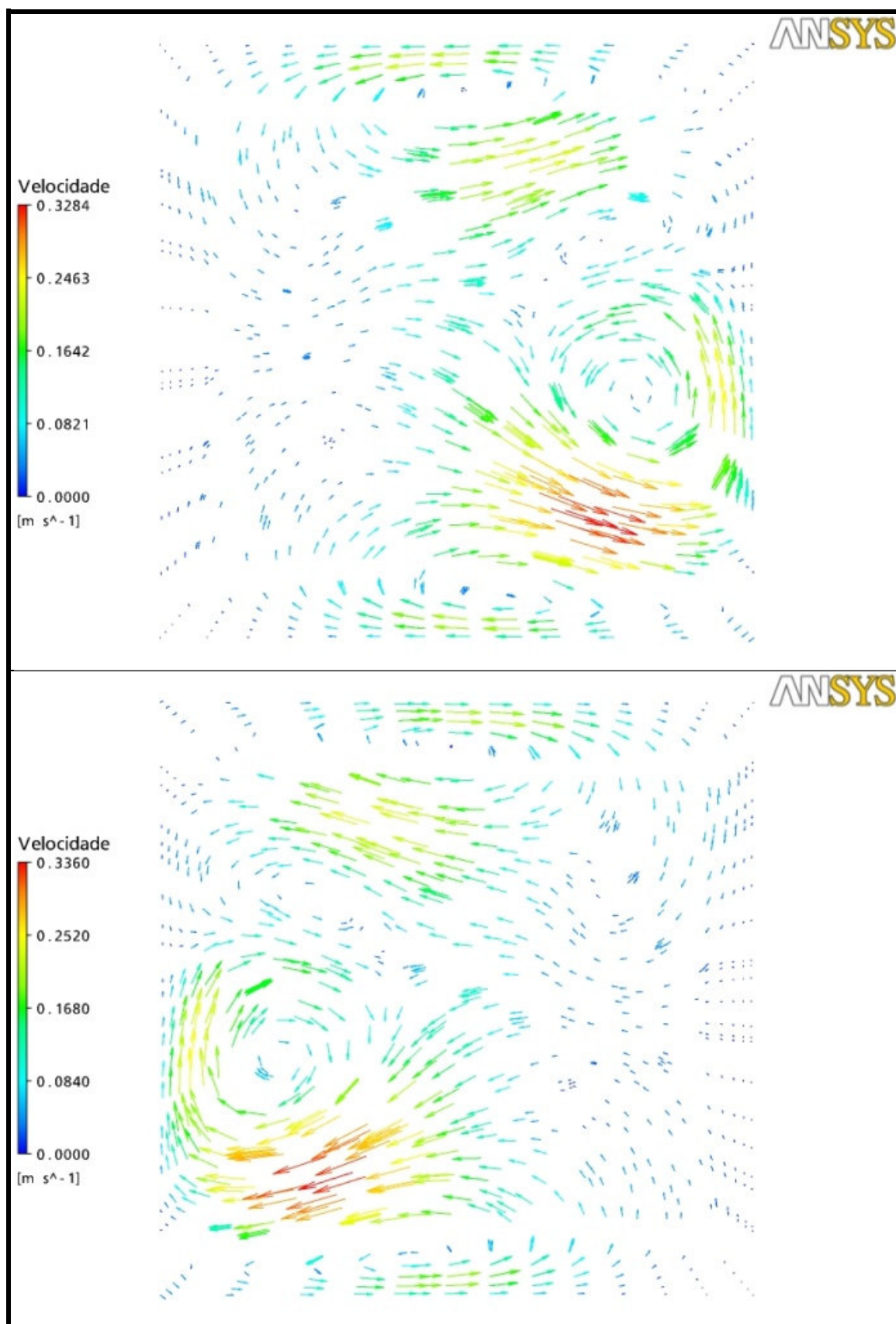


Figura 58 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M1 com vazão 9 ml/min (Continuação).

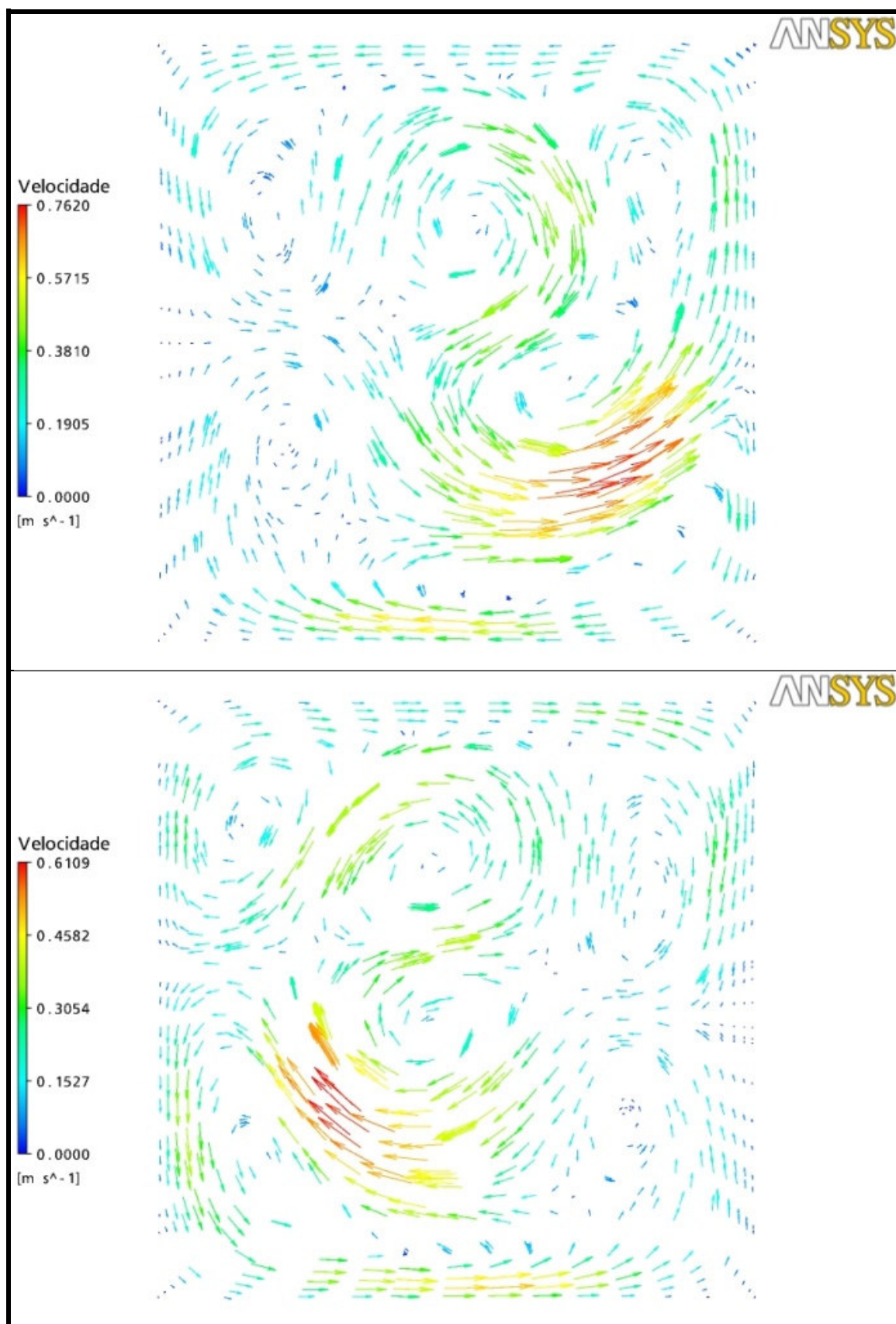


Figura 59 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M1 com vazão 18 ml/min.

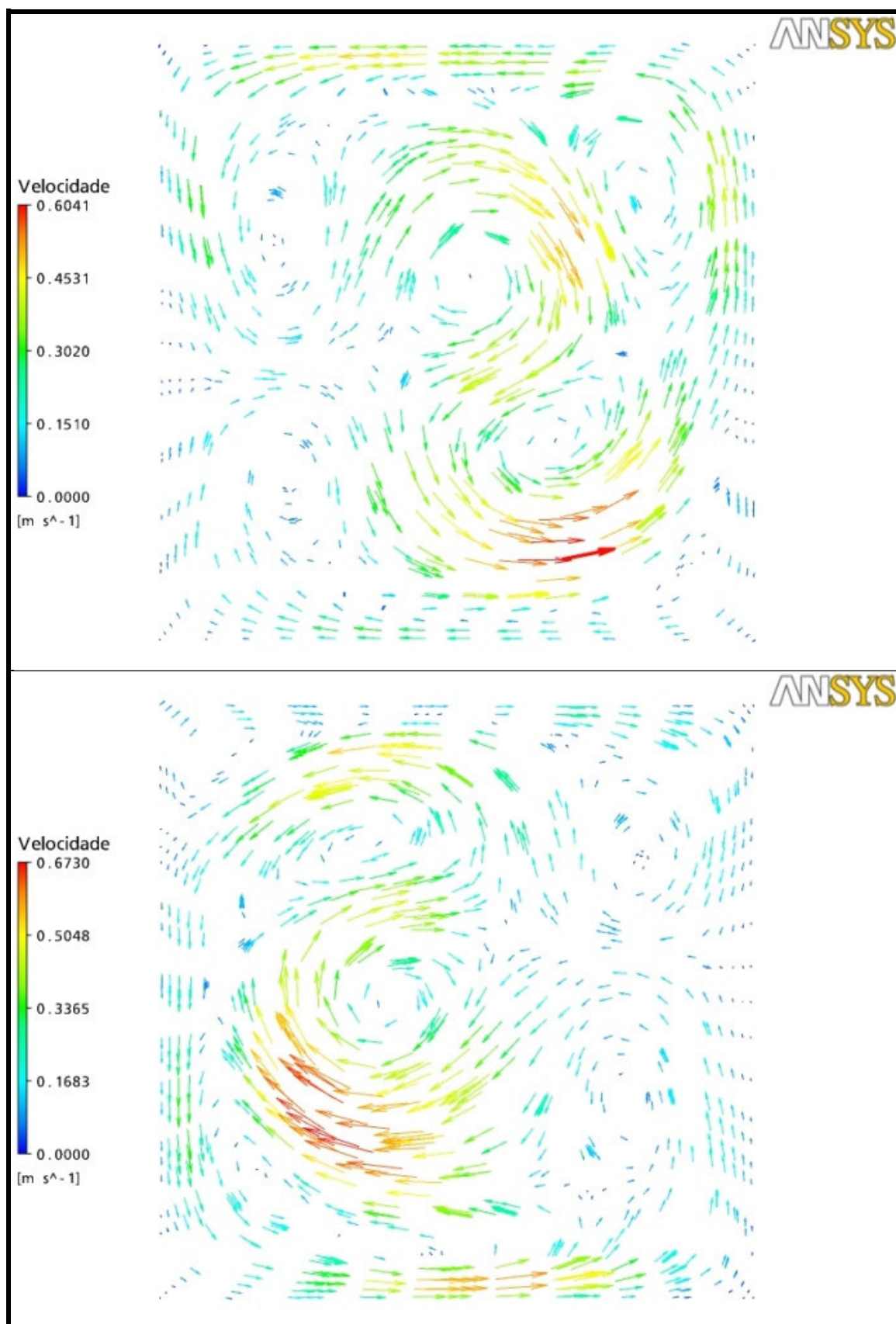


Figura 60 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M1 com vazão 18 ml/min (Continuação).

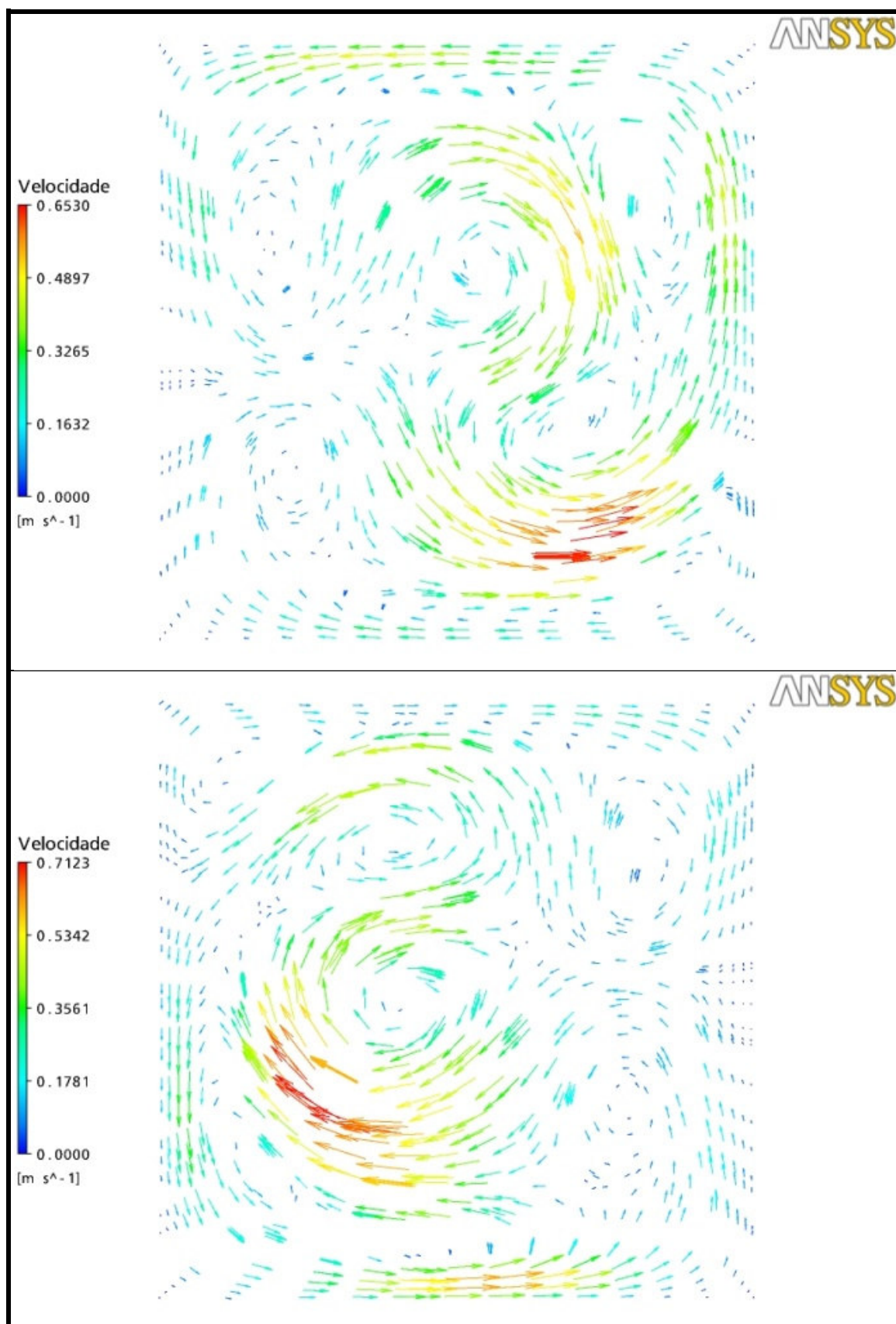


Figura 61 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M1 com vazão 18 ml/min (Continuação).

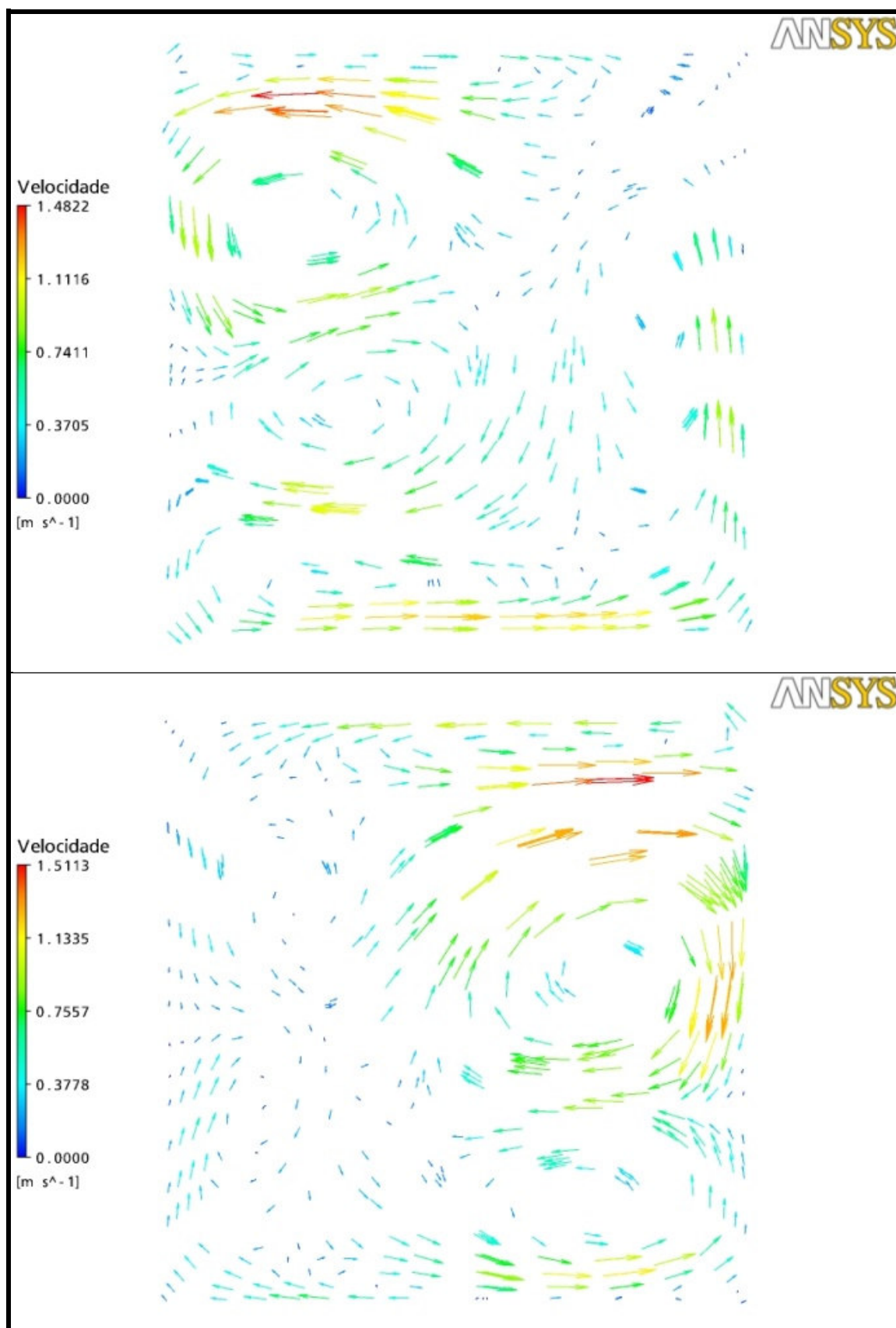


Figura 62 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M1 com vazão 36 ml/min.

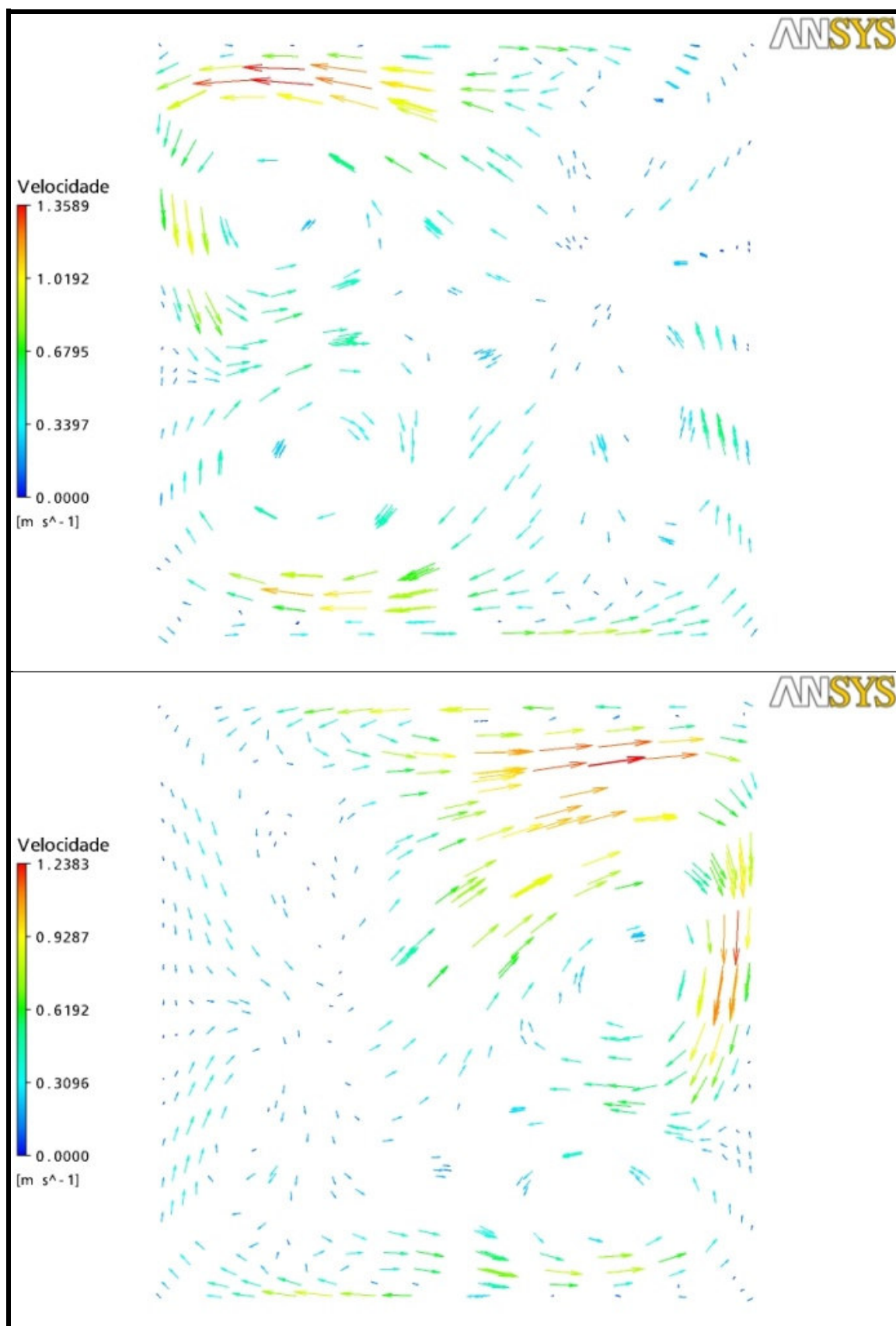


Figura 63 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M1 com vazão 36 ml/min (Continuação).

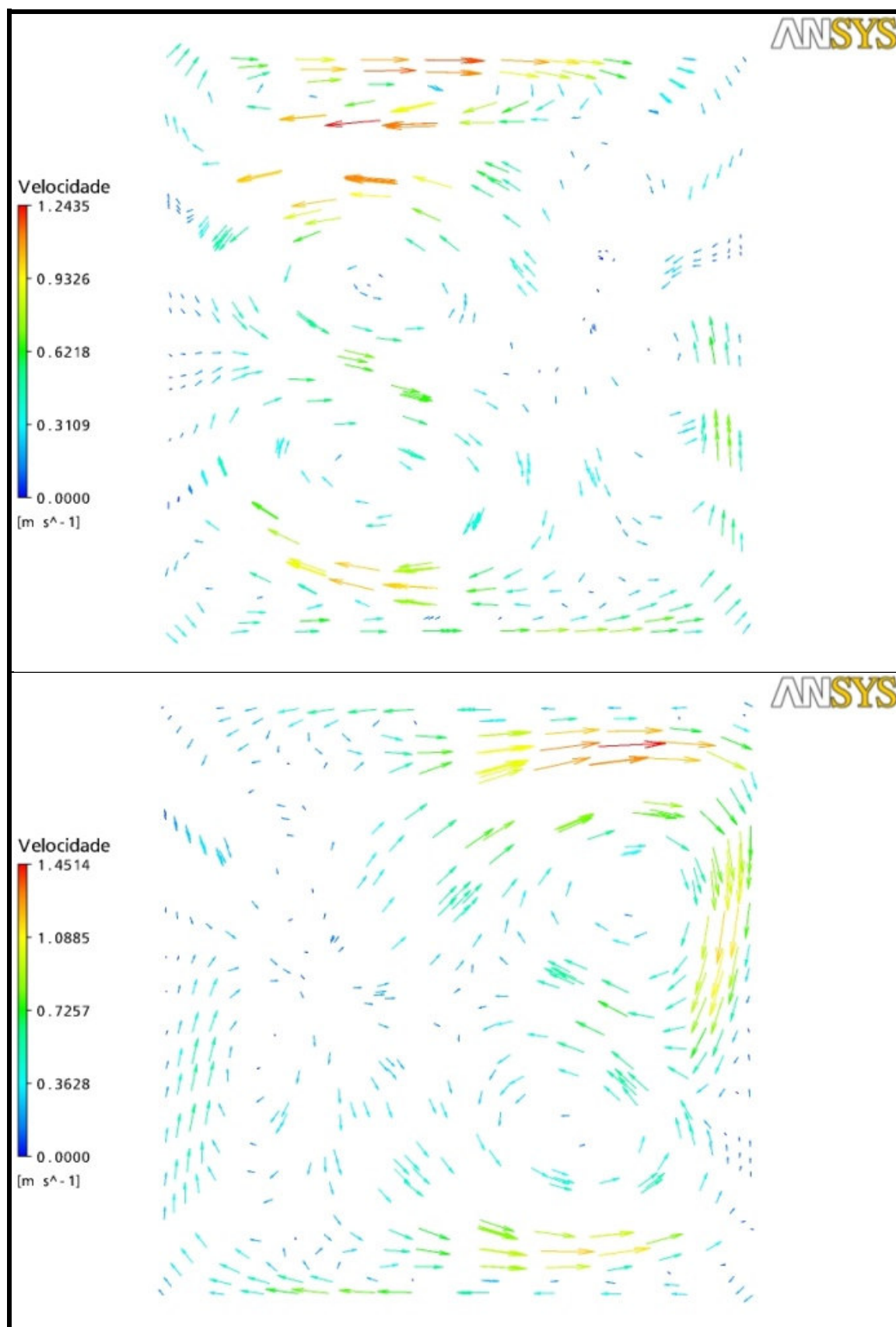


Figura 64 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M1 com vazão 36 ml/min (Continuação).

Para a vazão de 4,5 ml/min, assim como inferido anteriormente, pelos contornos de fração mássica, verifica-se que há uma simetria entre os vórtices que aparecem ao longo do micromisturador. Para as outras vazões verifica-se que a simetria desaparece e, além disso, o escoamento secundário é proporcional à vazão, quanto maior a velocidade axial do escoamento, maiores as velocidades dos vórtices que surgem no escoamento secundário.

Outra característica dos escoamentos secundários que surge no micromisturador M1 para as diferentes vazões é que se tem mais de um vórtice formado, cujo centro se desloca ao longo do micromisturador.

Nas Figuras 65 (a), (b), (c) e (d) são apresentados os valores médios da velocidade ao longo do micromisturador. Com base na equação da continuidade, esperar-se-ia que a velocidade média fosse constante ao longo do micromisturador, porém para nenhuma das malhas simuladas essa condição foi verificada, sendo, portanto, um forte indicativo de necessidade de maior grau de refinamento.

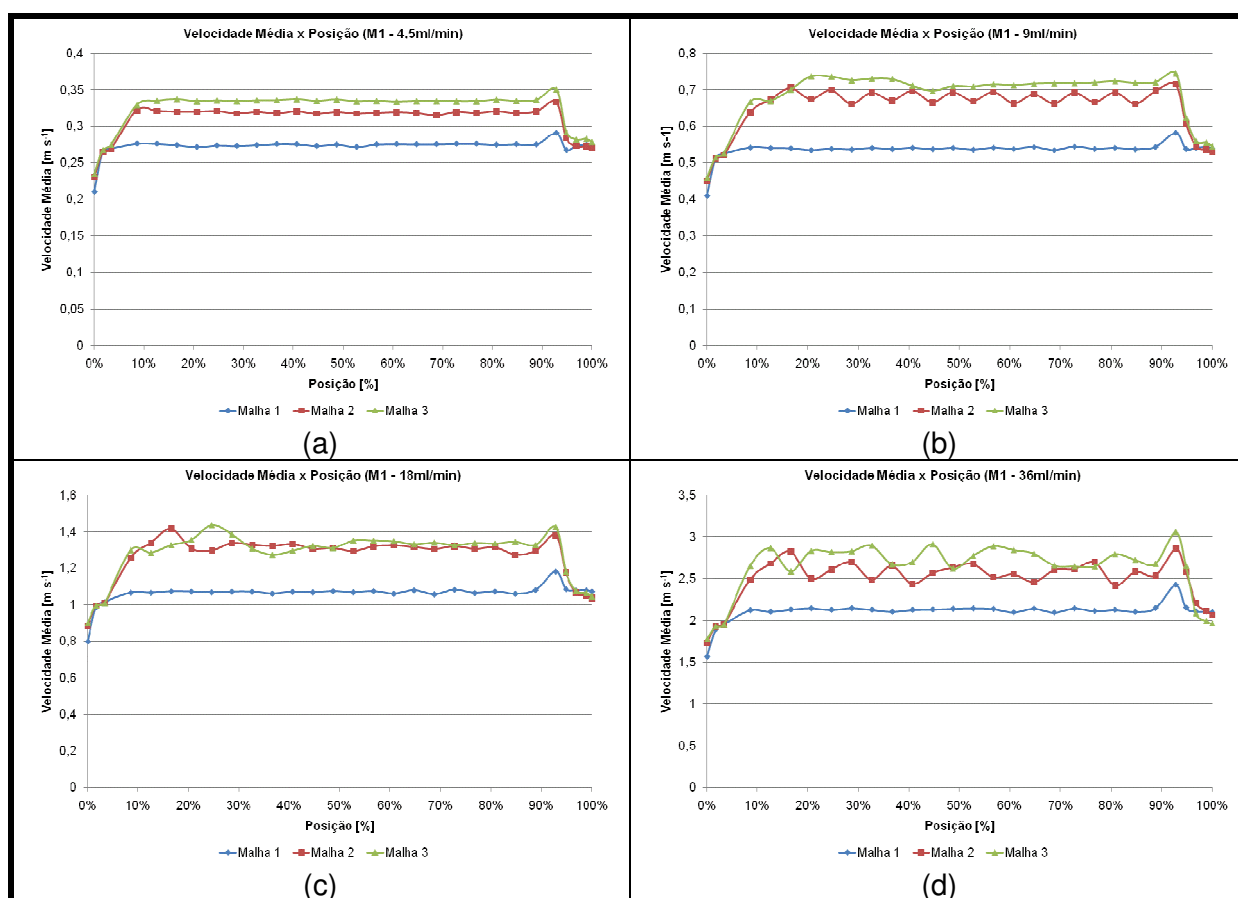


Figura 65 - Velocidade média em função da posição ao longo do micromisturador M1 para as diferentes vazões com diferentes malhas.

Verifica-se que no micromisturador M1 para as diferentes vazões simuladas há o surgimento de componentes tangenciais da velocidade, as quais contribuem para o desenvolvimento de um escoamento caótico (caracterizado pela perturbação nas linhas de corrente) no interior do micromisturador.

Conforme apresentado na Figura 66, o micromisturador com a vazão de 4,5 ml/min, apresenta uma velocidade média praticamente constante ao longo do micromisturador. Já o de vazão 36 ml/min possui o maior grau de variação desta variável, com duas possíveis causas, uma devido ao grau de refinamento inadequado da malha e a outra possível causa relacionada com a metodologia aplicada para o cálculo das médias, a qual utilizava a ponderação com a vazão mássica em cada elemento.

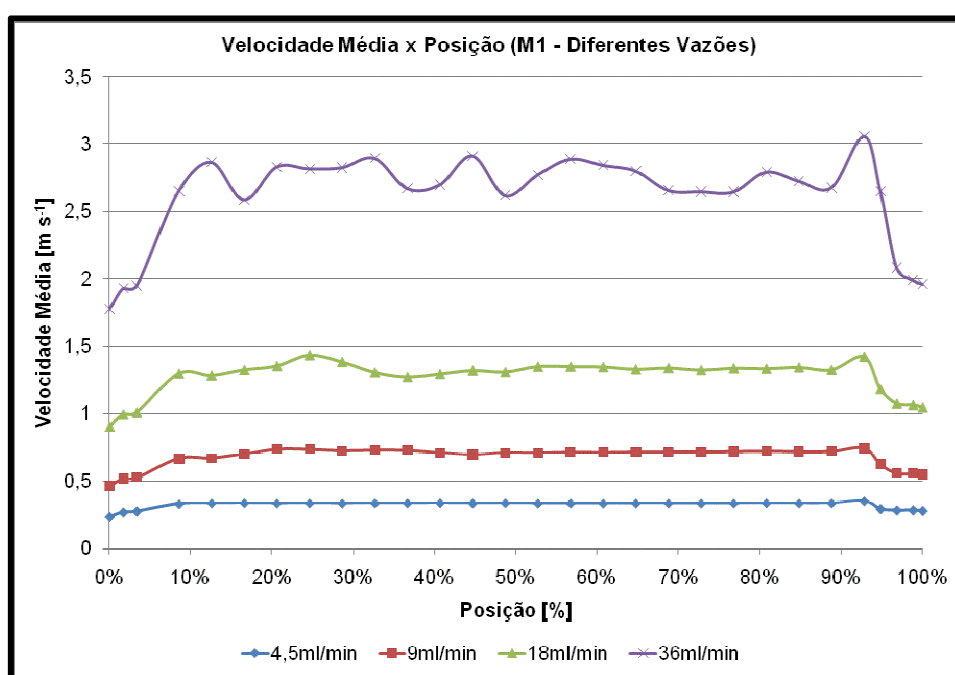


Figura 66 - Comparativo da velocidade média para as malhas mais refinadas do micromisturador M1 nas diferentes vazões

5.1.4 Perda de Carga de M1

Pela Figura 67, é possível visualizar que existe um bom ajuste com o perfil parabólico esperado para a relação perda de carga em função da vazão, uma vez que a perda de carga é uma função quadrática da vazão.

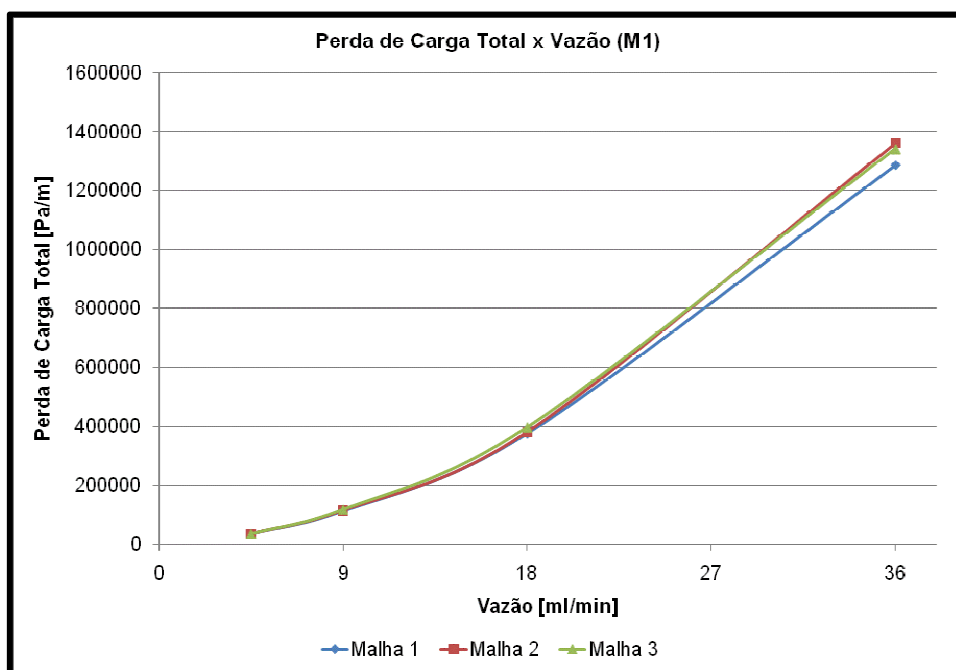


Figura 67 - Perda de carga do micromisturador M1 para as diferentes vazões com diferentes malhas.

Uma vez que as geometrias dos micromisturadores simulados apresentam comprimentos efetivos diferentes, a perda de carga na Figura 67 foi apresentada dividida pelo comprimento do micromisturador M1, comprimento este que não leva em consideração o comprimento equivalente dos cotovelos do micromisturador.

5.2 MICROMISTURADOR 2 (M2)

Assim como para o micromisturador M1 também foi realizado um teste de independência de malha para o micromisturador M2.

Os desvios apresentados nas Tabela 8, 9, 10 e 11 foram calculados com base em um levantamento feito, também, em 29 planos ao longo do micromisturador, sendo apresentados os desvios máximos encontrados ao longo destes planos.

Nas Tabelas 8, 9, 10 e 11 verifica-se que para o micromisturador M2 assim como para o micromisturador M1, há uma concordância entre os valores encontrados para a malha 2 e a malha 3, tendo um desvio máximo da ordem de 10% para as variáveis (pressão, velocidade e fração mássica) resultante da simulação.

Tabela 8 - Comparação entre as malhas do micromisturador M2 - Vazão 4,5ml/min

	D1	D2	D3
Fração Mássica Média	2,26%	0,90%	2,27%
Velocidade Média	12,61%	3,43%	9,85%
Pressão	6,94%	2,01%	6,14%
Qualidade da Mistura	241,12%	31,52%	232,73%
Perda de Carga	6,99%	0,80%	6,15%

Tabela 9 - Comparação entre as malhas do micromisturador M2 - Vazão 9ml/min

	D1	D2	D3
Fração Mássica Média	2,69%	0,98%	2,22%
Velocidade Média	14,20%	5,60%	11,13%
Pressão	3,27%	2,00%	2,21%
Qualidade da Mistura	181,29%	35,62%	179,66%
Perda de Carga	1,17%	1,02%	2,21%

Tabela 10 - Comparação entre as malhas do micromisturador M2 - Vazão 18ml/min

	D1	D2	D3
Fração Mássica Média	2,63%	1,05%	2,18%
Velocidade Média	21,91%	9,28%	14,09%
Pressão	16,04%	6,37%	12,69%
Qualidade da Mistura	113,93%	37,67%	112,26%
Perda de Carga	14,28%	4,56%	10,19%

Tabela 11 - Comparação entre as malhas do micromisturador M2 - Vazão 36ml/min

	D1	D2	D3
Fração Mássica Média	2,44%	0,94%	2,15%
Velocidade Média	22,41%	7,55%	16,77%
Pressão	26,72%	2,98%	27,67%
Qualidade da Mistura	76,95%	32,12%	68,12%
Perda de Carga	25,20%	0,01%	25,20%

5.2.1 Qualidade da Mistura de M2

Nas Figuras 68 (a), (b), (c) e (d) é possível acompanhar os contornos da evolução da fração mássica ao longo do micromisturador para as diferentes vazões simuladas, sendo (a) a menor vazão e (d) a maior vazão. O contorno externo mostra que são necessários, aproximadamente três elementos de mistura para se alcançar a mistura completa para todas as vazões.

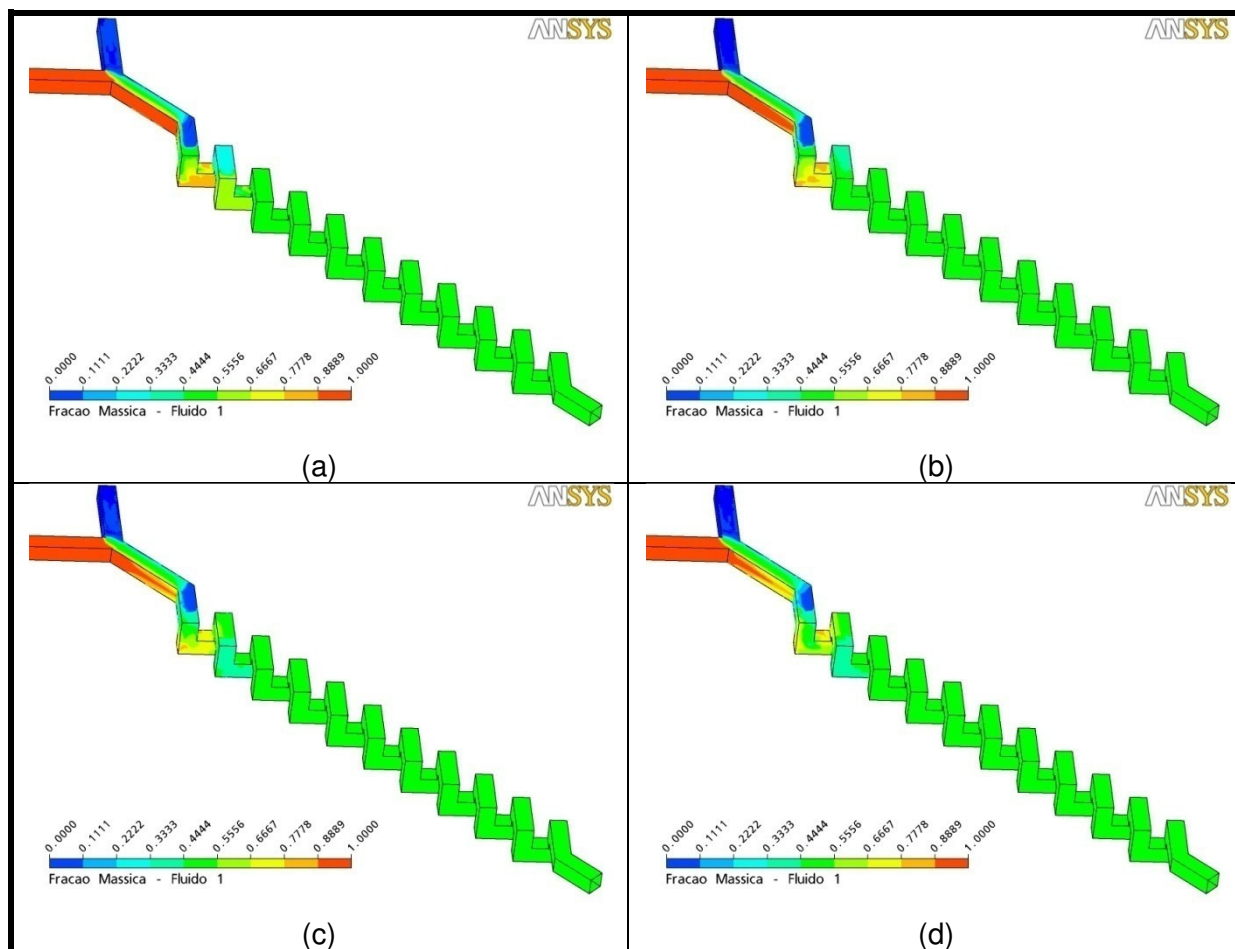


Figura 68 - Contornos de Fração Mássica para o micromisturador M2 para as diferentes vazões.

Neste caso, assim como para o micromisturador M1, tem-se que o processo de mistura é dominado pelo transporte convectivo de massa, tendo pouco efeito a menos no contato inicial dos fluidos o transporte difusivo de massa. Há também grande influência na mistura alcançada, as mudanças de direção proporcionadas pela geometria e o efeito dos ângulos das curvas.

Nas Figuras 69, 70, 71 e 72 (em ordem crescente de vazão) nota-se que independente da vazão, quando o fluido atinge o décimo plano no interior do micromisturador já se tem uma mistura perfeita.

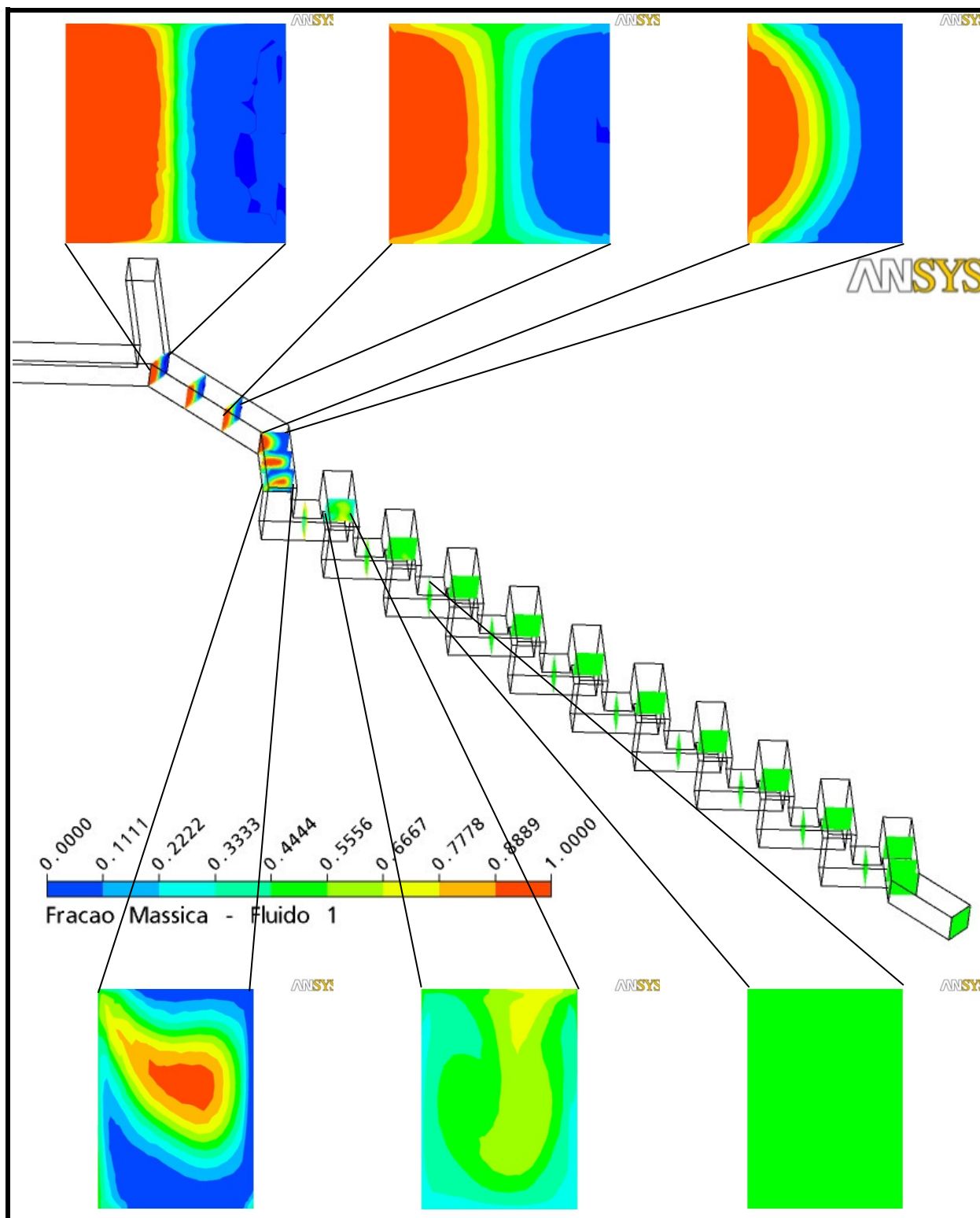


Figura 69 - Detalhes dos contornos de fração mássica para vazão de 4,5 ml/min no micromisturador M2.

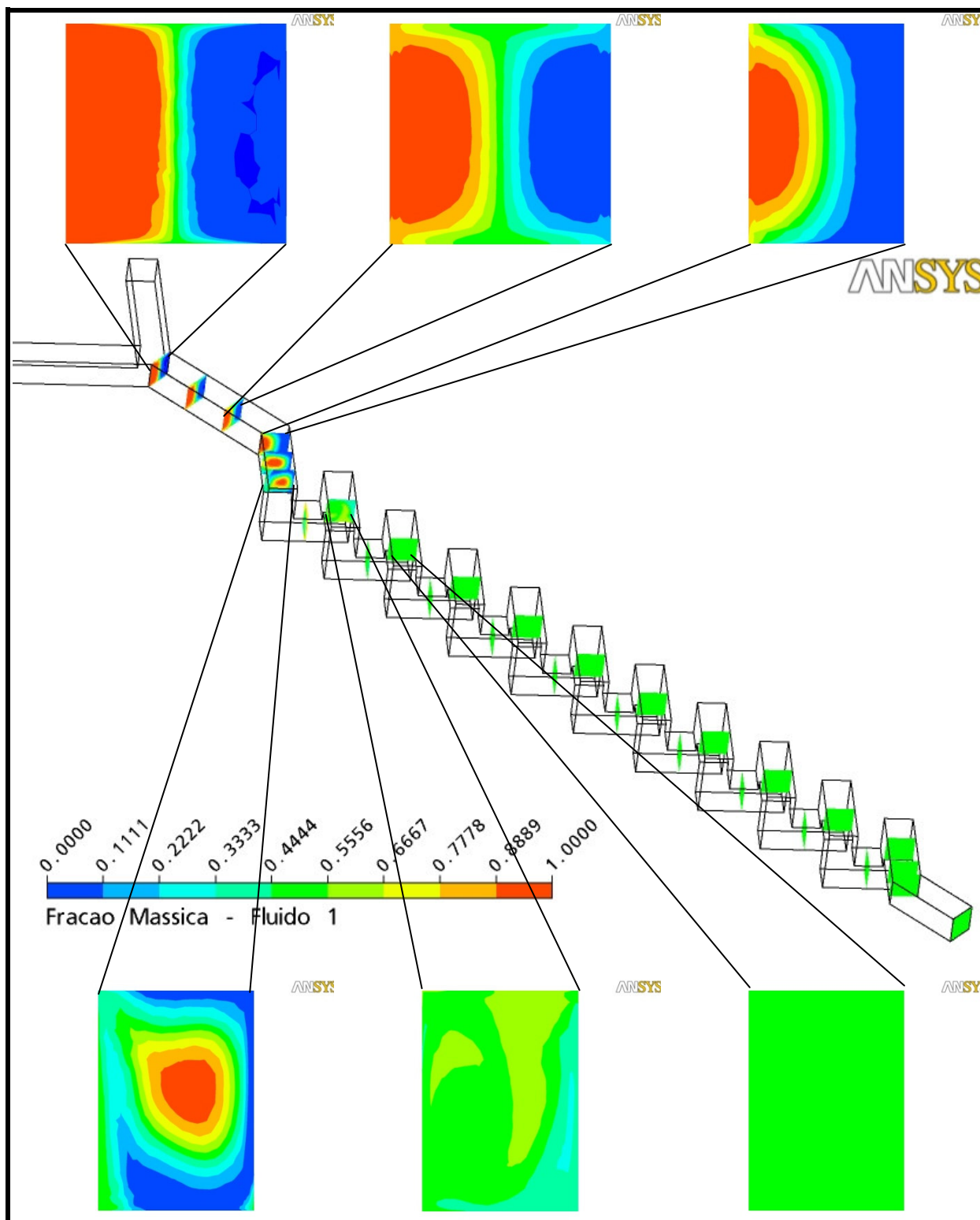


Figura 70 - Detalhes dos contornos de fração mássica para vazão de 9 ml/min no micromisturador M2.

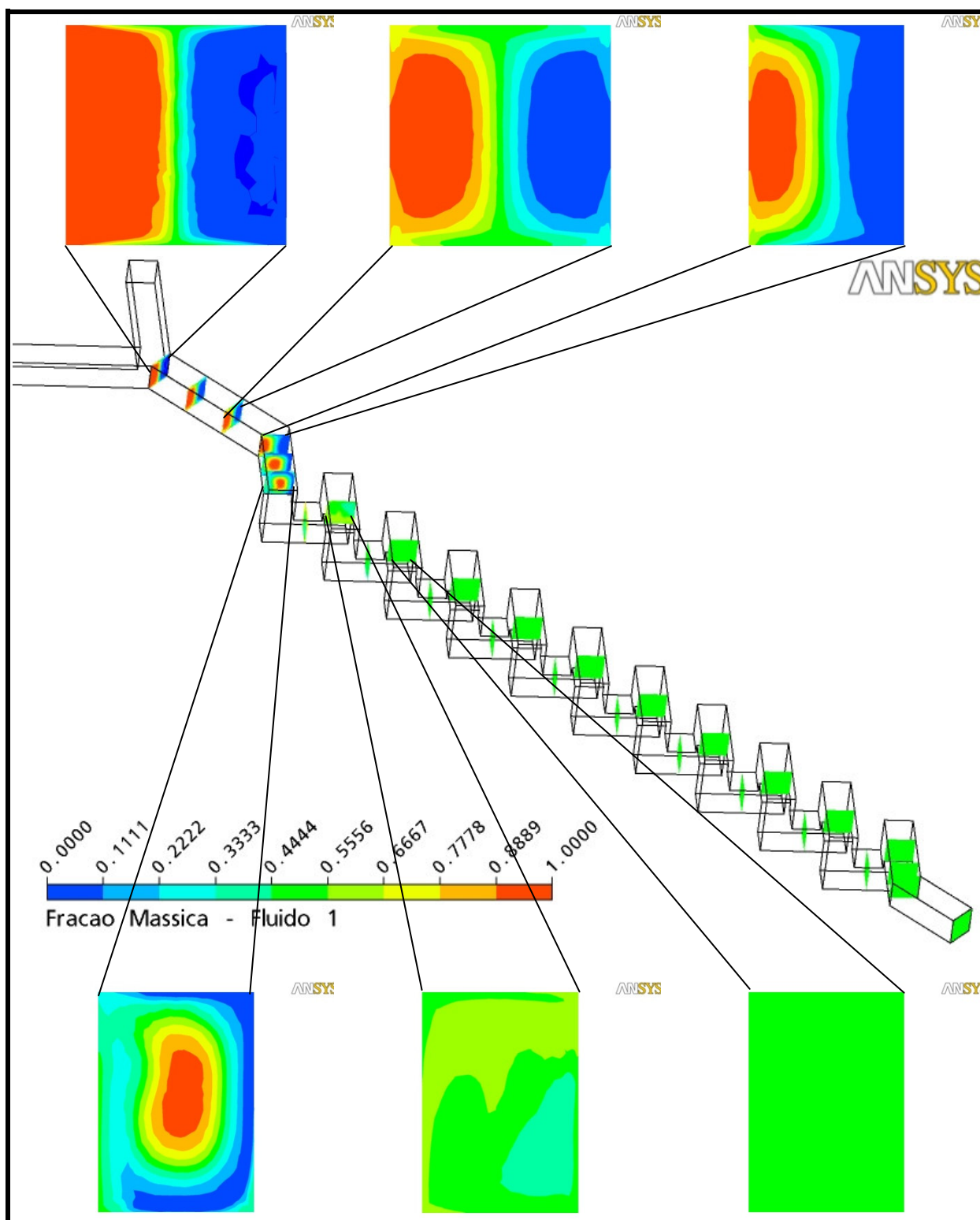


Figura 71 - Detalhes dos contornos de fração mássica para vazão de 18 ml/min no micromisturador M2.

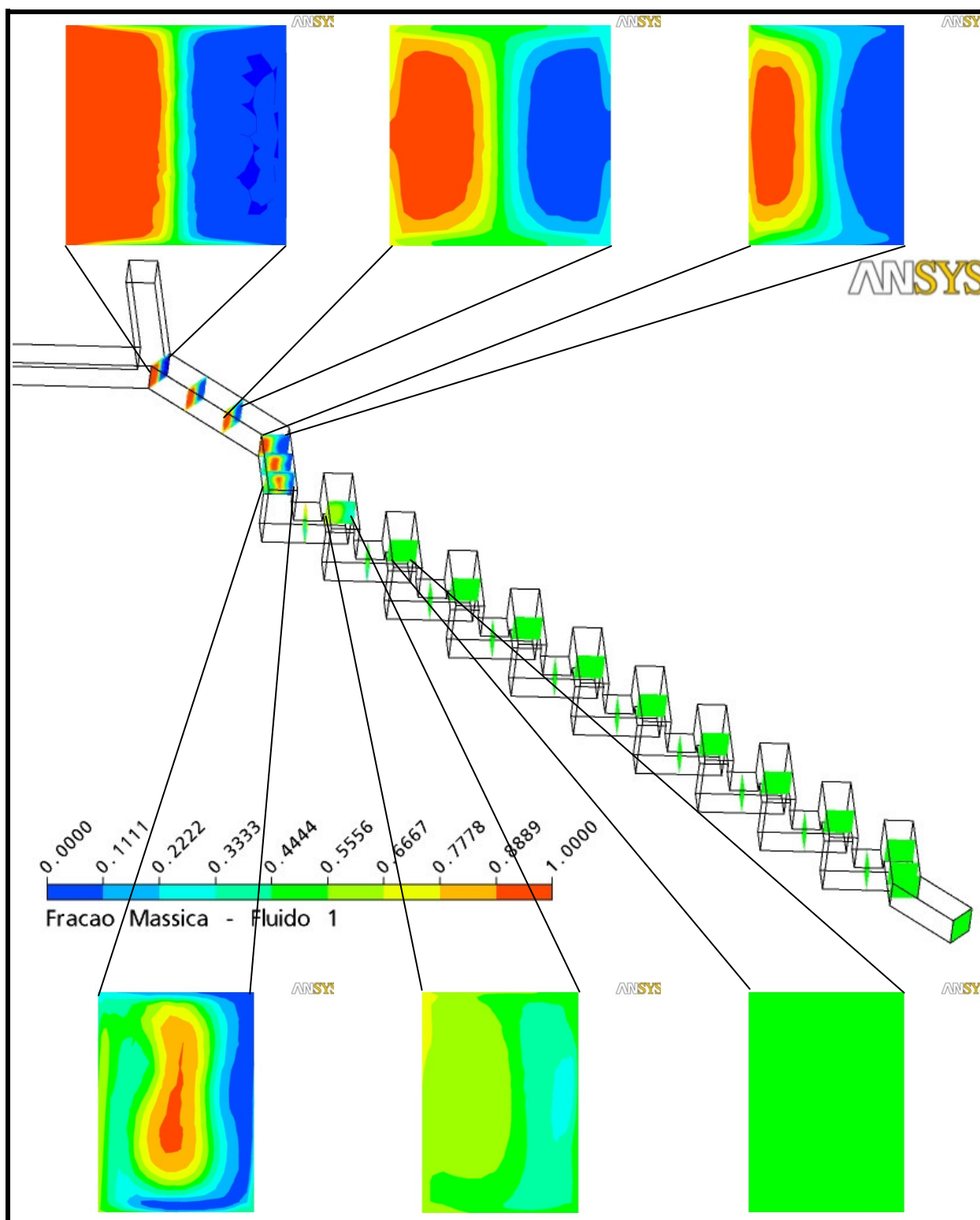


Figura 72 - Detalhes dos contornos de fração mássica para vazão de 36 ml/min no micromisturador M2.

Assim como ocorreu no micromisturador M1 é possível notar que no trecho reto do micromisturador, antes de ocorrer à primeira mudança de direção do

escoamento, as frações mássicas possuem contornos simétricos, porém após adentrarem o primeiro elemento de mistura tal simetria desaparece.

Tem-se o mesmo comportamento de mistura e percebe-se que ocorre uma torção do Fluido 2 em volta do Fluido 1, fato demonstrado nos contornos a partir do plano 5 em que se tem frações mássicas iguais a zero na região próxima às paredes do micromisturador e tem-se fração mássica igual a um no centro do micromisturador, apesar da forma de alimentação do micromisturador, a qual ocorre em um formato –Y.

Em função do número de Reynolds tem-se uma maior ou menor dispersão das frações mássicas no início do misturador.

Nas Figuras 73 (a), (b), (c) e (d), é apresentado um comparativo do avanço da qualidade da mistura em função da posição normalizada, como definida para o micromisturador M1.

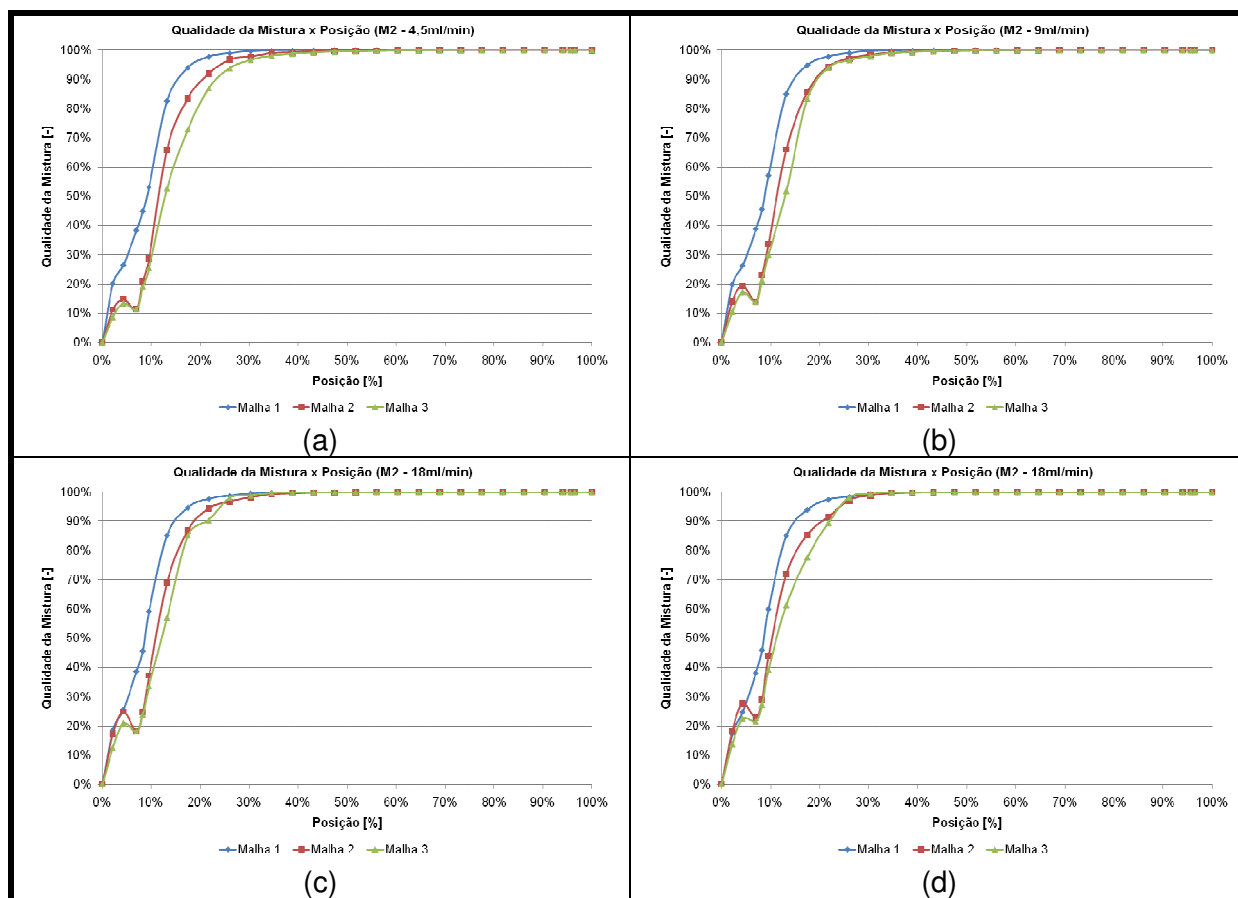


Figura 73 - Parâmetro da qualidade da mistura em função da posição ao longo do micromisturador M2 para as diferentes vazões com diferentes malhas.

Para todas as condições de operação simuladas há boa concordância do perfil de avanço da qualidade de mistura no interior do micromisturador para as malhas 2 e 3.

A Figura 74 apresenta um comparativo das malhas mais refinadas para as diferentes vazões. Para todas as vazões simuladas é atingida a completa mistura dos dois fluidos após os fluidos terem percorrido, aproximadamente 50% do comprimento efetivo do micromisturador. Era esperado um aumento crescente da qualidade da mistura com a posição, uma vez que não é possível misturar os fluidos e depois separá-los. Porém para todas as vazões existe um degrau entre 0% e 10% de avanço no interior do micromisturador, provavelmente, devido ao fato do plano 4 construído não englobar corretamente a seção transversal do canal retangular, acarretando uma falsa previsão da qualidade da mistura. Para as malhas com o menor grau de refinamento o degrau não aparece no avanço da qualidade de mistura.

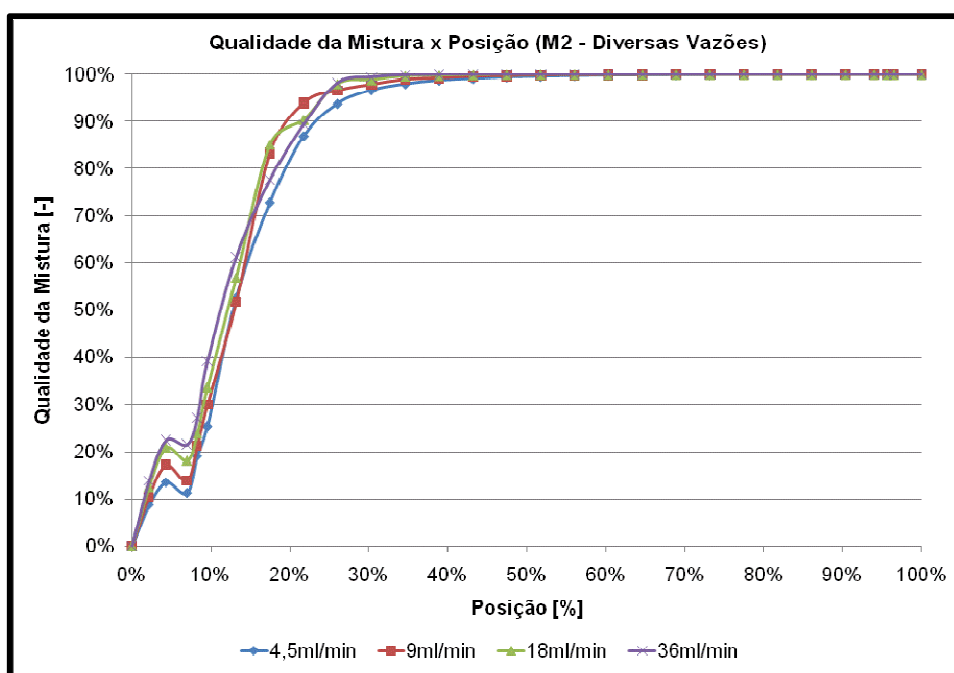


Figura 74 - Comparativo da qualidade da mistura para as malhas mais refinadas do micromisturador M2 nas diferentes vazões.

Para todas as vazões é verificado que o perfil de qualidade de mistura ao longo do micromisturador é praticamente idêntico, portanto, independente da vazão,

mostrando que a transferência de massa é exclusivamente devido ao transporte convectivo de massa.

5.2.2 Perfil de Pressão de M2

Nas Figuras 75 (a), (b), (c) e (d) é possível identificar que um mesmo perfil de pressão se desenvolve durante o escoamento dos fluidos no interior do micromisturador. Porém, como já era esperado, quanto maior a vazão maior o nível de pressão envolvido.

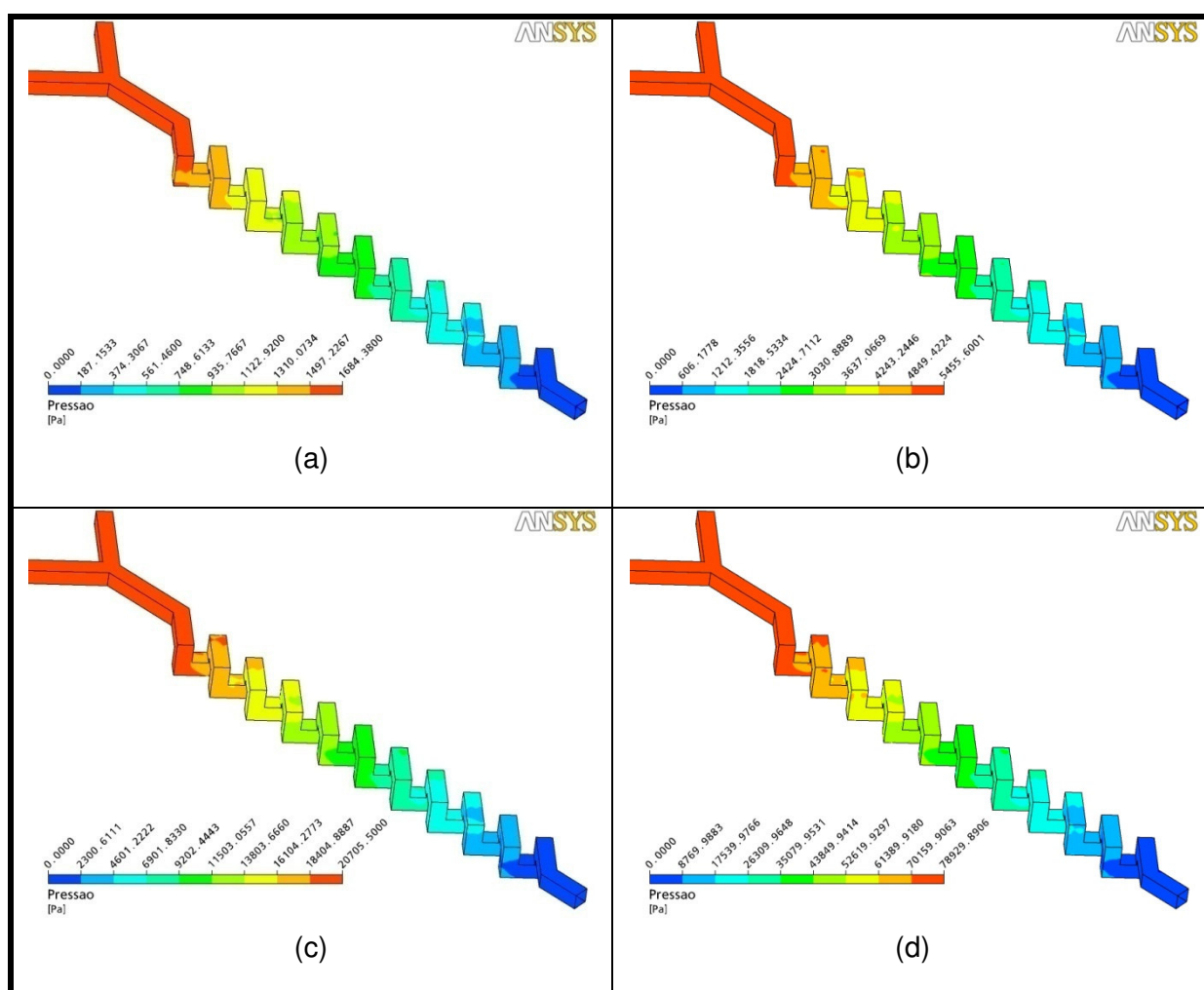


Figura 75 - Contornos de Pressão para o micromisturador M2 para as diferentes vazões.

No caso do micromisturador M2 os níveis de pressão envolvidos são menores do que os do micromisturador M1 e as pressões máximas em função da vazão de operação encontram-se na faixa de $1,6 \text{ kPa} < P_{\text{total}} < 79,0 \text{ kPa}$, indicando que os fluidos para escoarem no interior do micromisturador M2 gastam menos energia do que no micromisturador M1.

Contudo, a ordem de grandeza das pressões envolvidas é a mesma, portanto, a mesma ressalva com relação aos materiais de construção indicados para o micromisturador M1 também se aplicam para o micromisturador M2.

Nas Figuras 76 (a), (b), (c) e (d) é possível verificar um comportamento linear da pressão ao longo do misturador, o que demonstra concordância com o modelo de perda de carga que será utilizado no cálculo do fator de atrito, em que a perda de carga é linearmente dependente do comprimento.

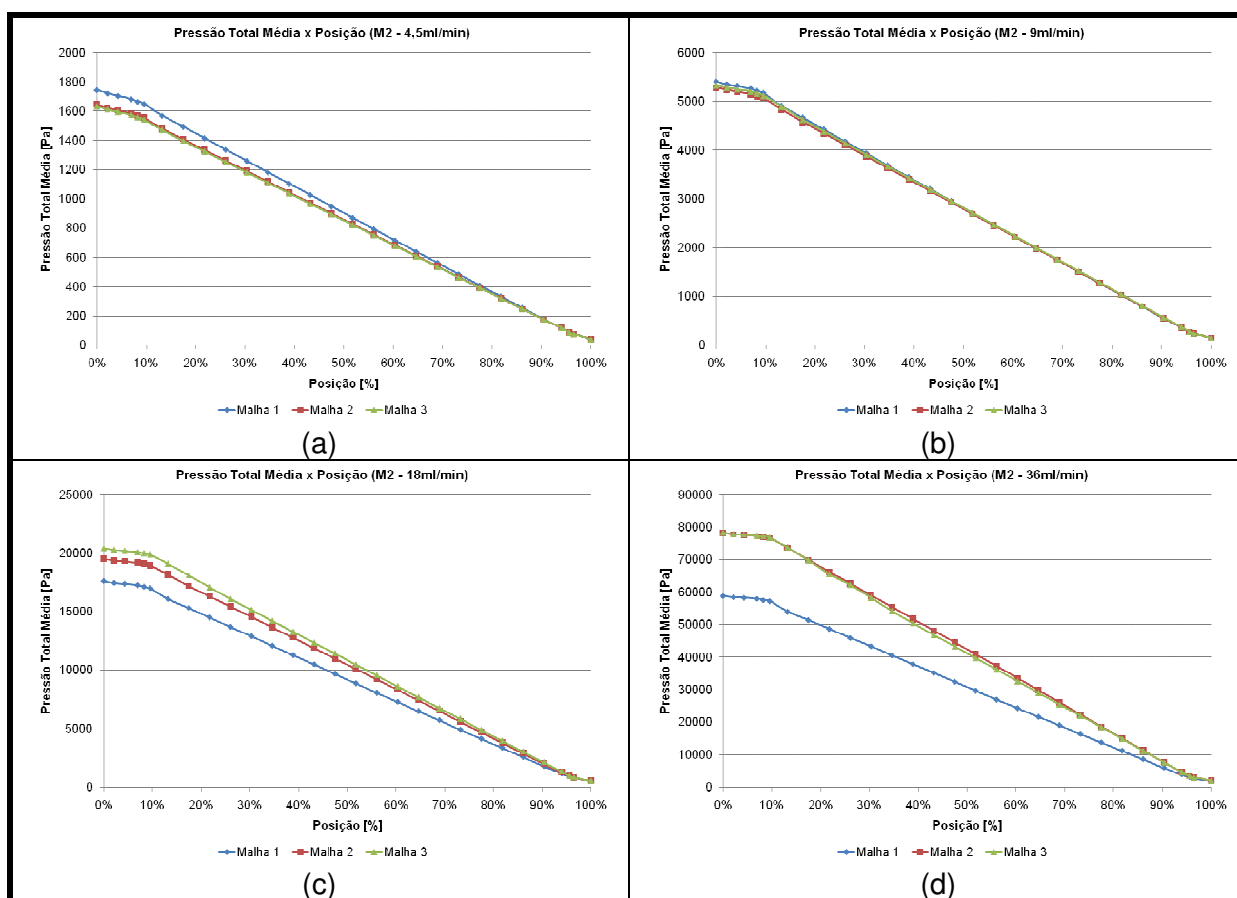


Figura 76 - Pressão total média em função da posição ao longo do micromisturador M2 para as diferentes vazões com diferentes malhas.

Ao contrário do que ocorre com o micromisturador M1 há uma diferença da ordem de 30% entre a pressão prevista pela malha 1 e as outras duas malhas para as duas maiores vazões. Portanto, assim como ocorreu no micromisturador M1, se faz necessário um maior grau de refinamento da malha.

Uma vez que a solução das equações de quantidade de movimento estão ligadas ao perfil de pressão, pode-se concluir que o perfil de velocidade terá o mesmo comportamento independente do grau de refinamento da malha, ou seja, deve-se utilizar a malha mais refinada para amparar nossas conclusões.

5.2.3 Perfil de Velocidade de M2

Nas Figuras 77 (a), (b), (c) e (d) são apresentadas as linhas de corrente para todas as vazões simuladas. É possível identificar regiões de baixa velocidade e recirculação nos cantos externos superiores e inferiores, demonstrando a existência de um caminho preferencial para o escoamento dos fluidos, quanto maior o volume de tais regiões maior o tempo de residência que os fluidos terão no interior do micromisturador.

Como já era esperado quanto maior a vazão maior a velocidade no interior do micromisturador. Existe velocidades na faixa de 0,46 m.s⁻¹ a 3,82 m.s⁻¹, mantendo a mesma proporção entre as vazões testadas, assim como o micromisturador M1. Todavia, as velocidades máximas do micromisturador M2 para todas as vazões são menores do que as velocidades máximas do micromisturador M1.

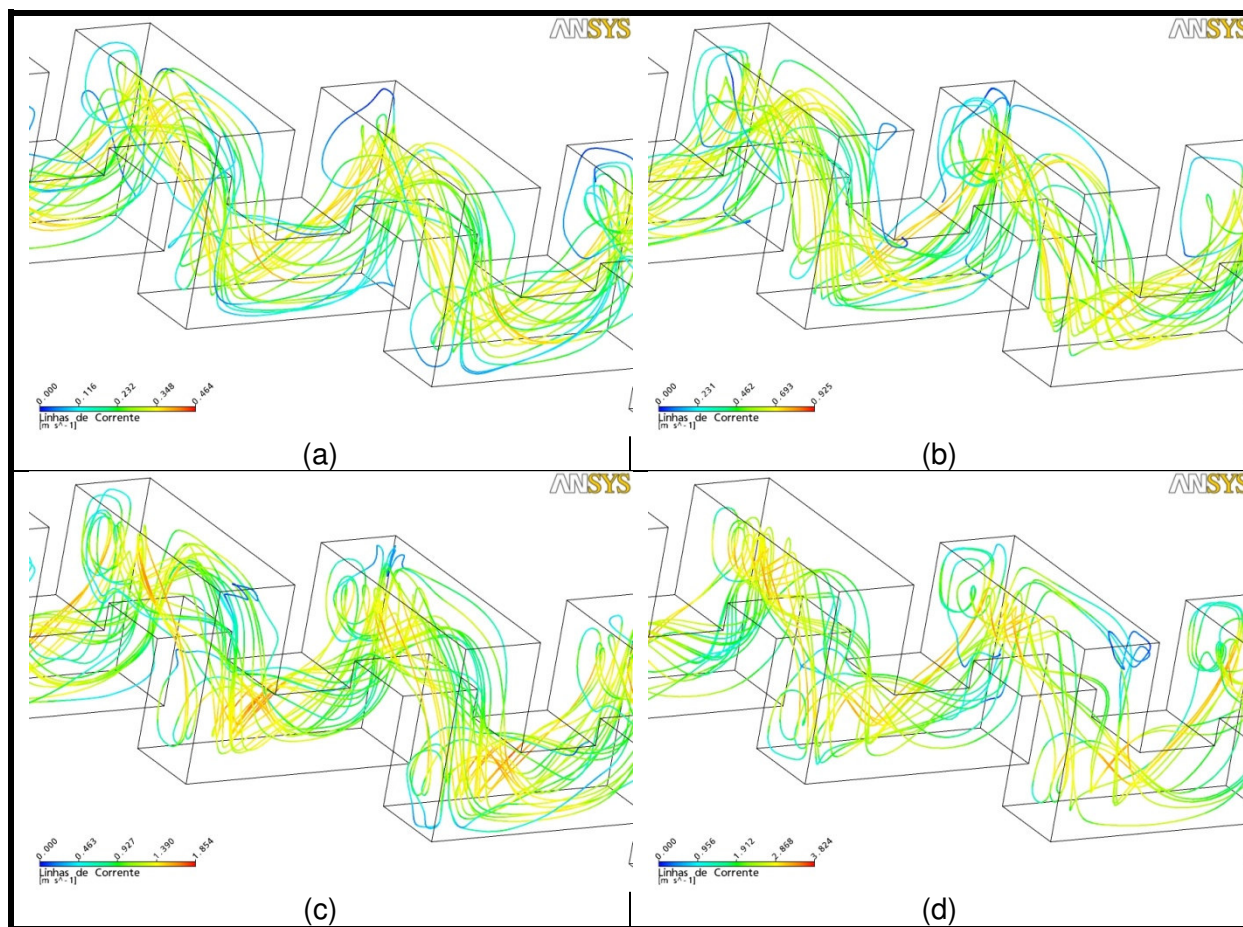


Figura 77 - Linhas de corrente de velocidade para o micromisturador M2 para as diferentes vazões.

Para mostrar o escoamento secundário que surge no interior do micromisturador são apresentadas as projeções tangenciais dos vetores velocidades para 6 planos distintos no interior do micromisturador M2, para as quatro vazões simuladas nas Figuras 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88 e 89.

Para todas as vazões é verificado que o escoamento não é simétrico e um único vórtice surge no interior do micromisturador, e pela evolução vê-se que a maior velocidade se desloca ao longo do micromisturador, demonstrando uma torção do vórtice ao longo do caminho do micromisturador. Verifica-se que o escoamento que surge no interior do micromisturador M2 é diferente do que surge no interior do micromisturador M1, apesar da pequena diferença existente na geometria dos dois.

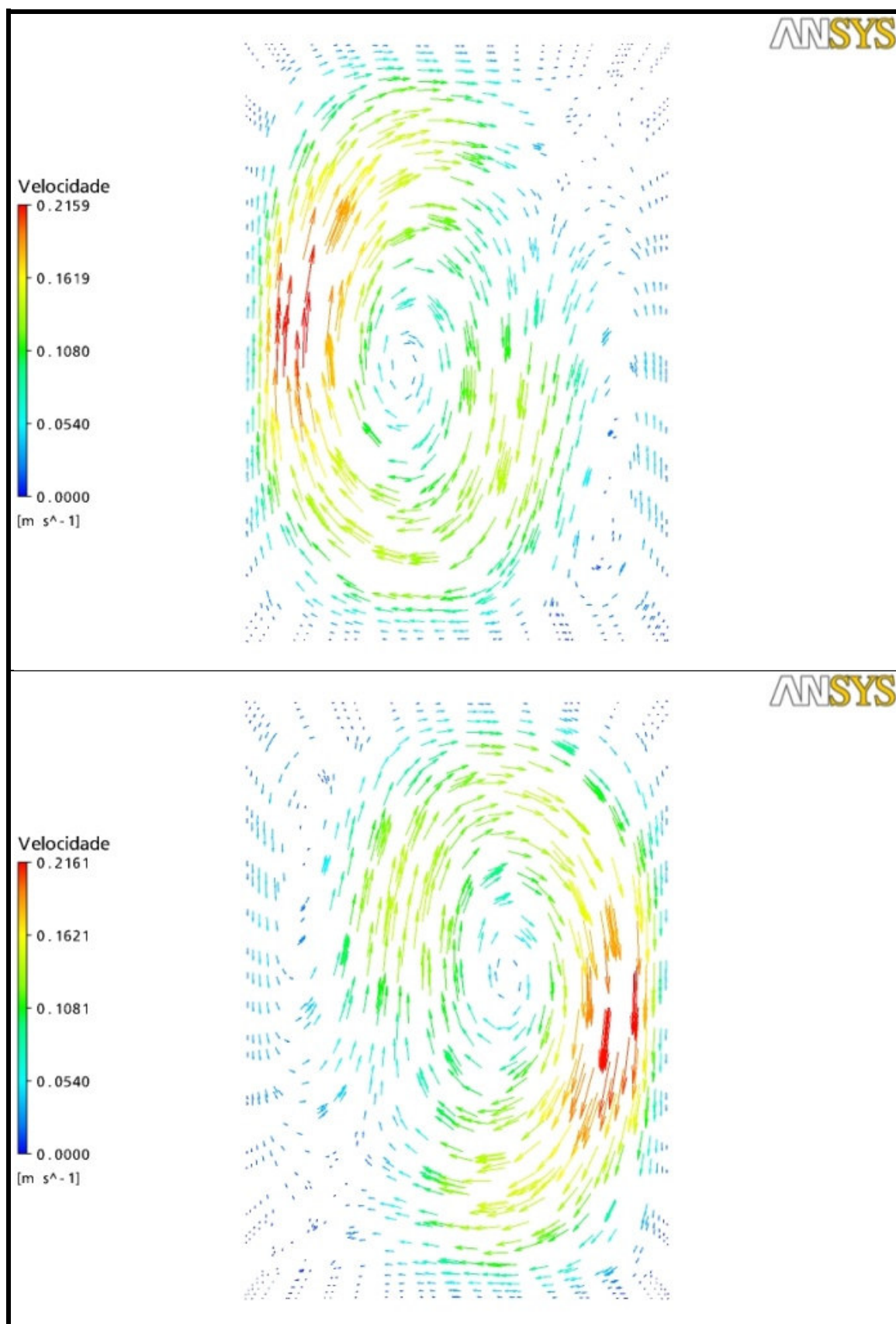


Figura 78 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M2 com vazão 4,5 ml/min.

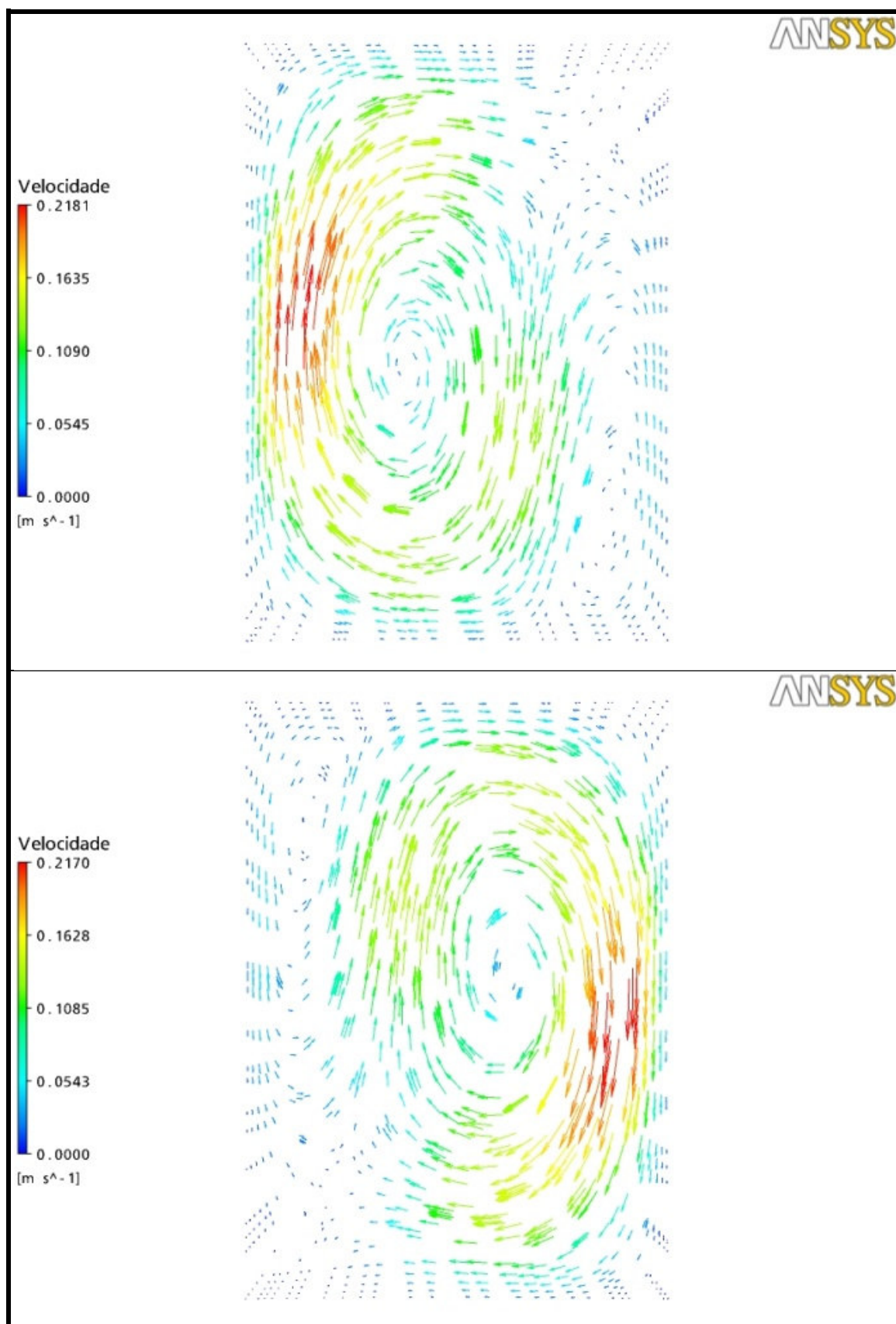


Figura 79 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M2 com vazão 4,5 ml/min (Continuação).

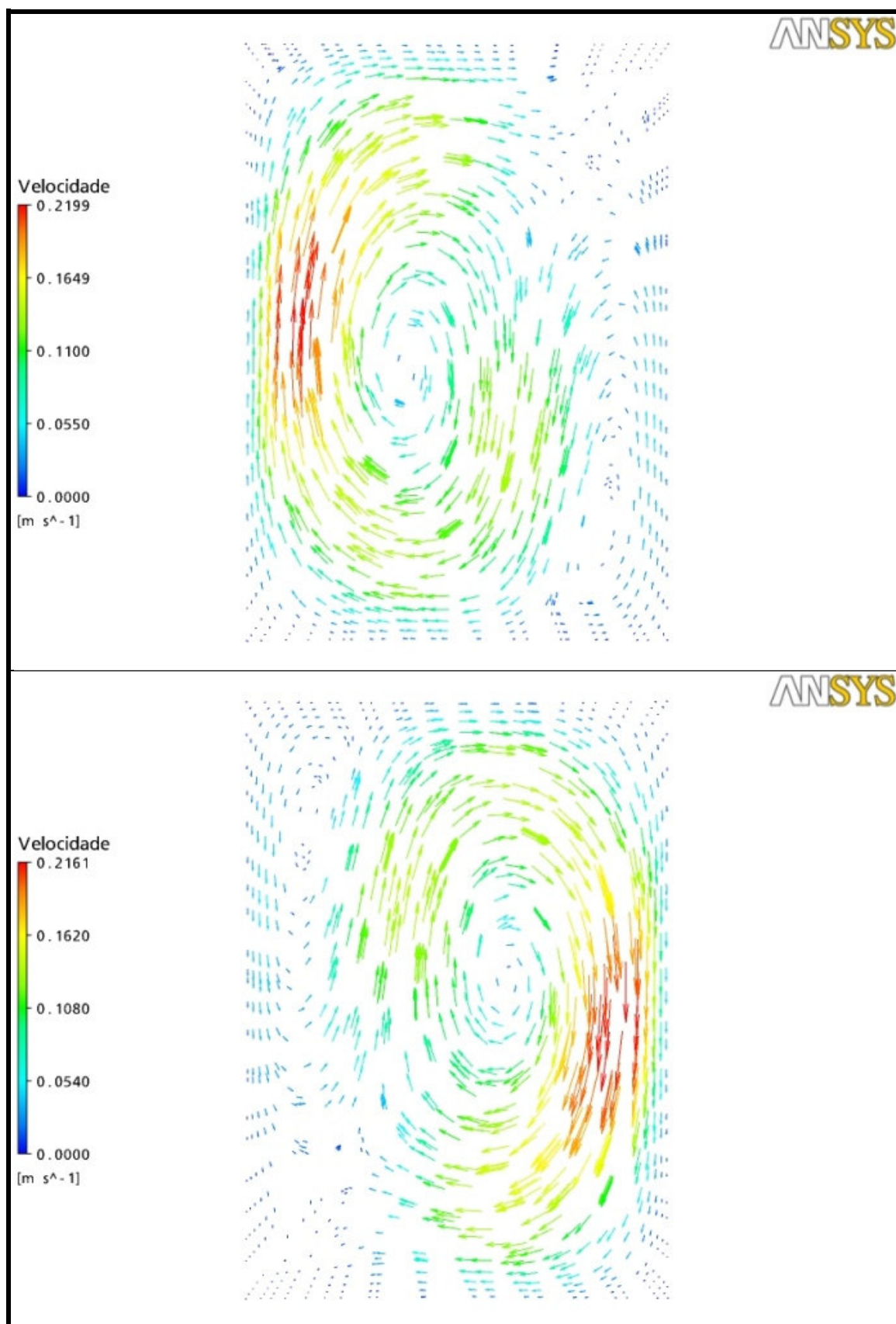


Figura 80 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M2 com vazão 4,5 ml/min (Continuação).

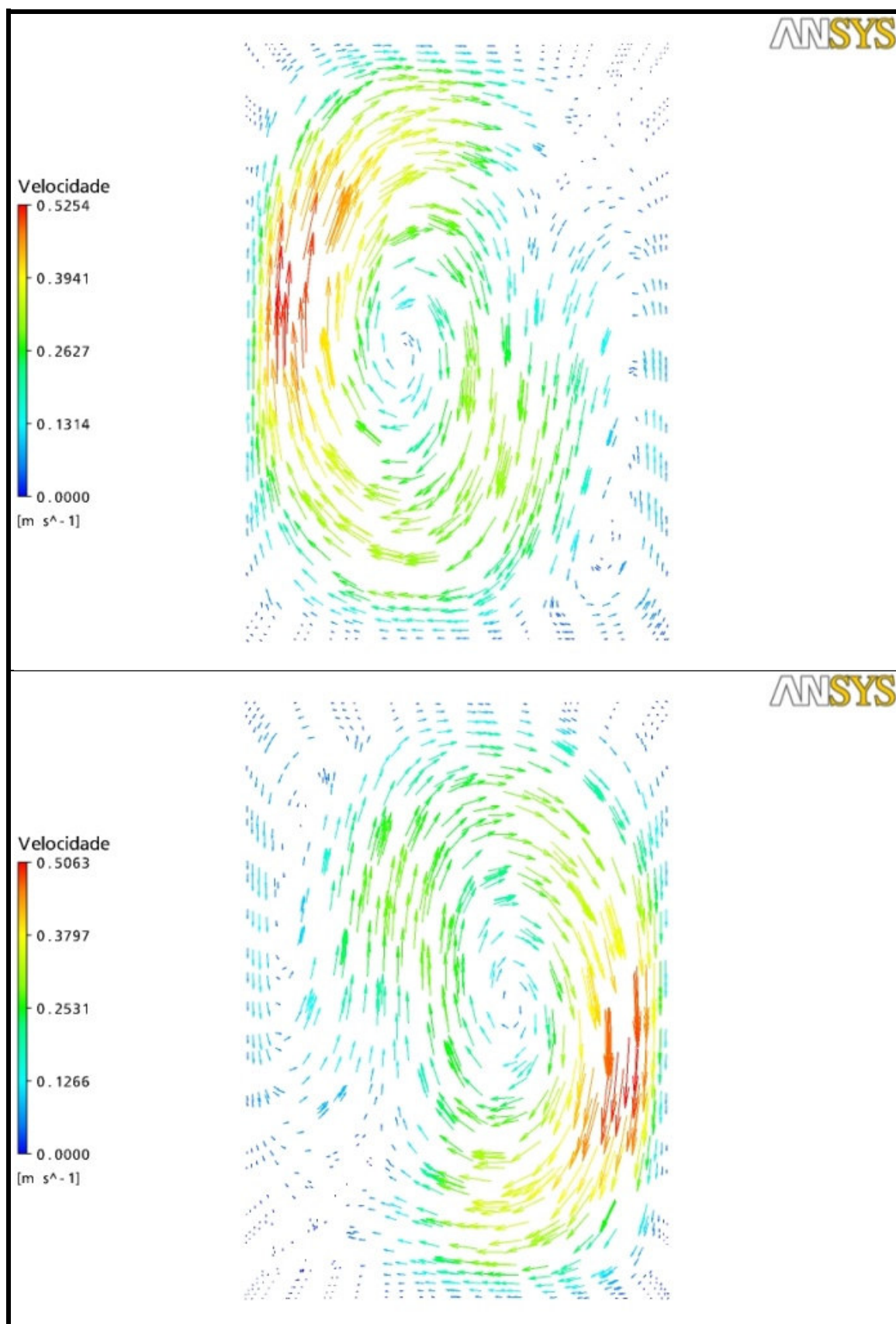


Figura 81 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M2 com vazão 9 ml/min.

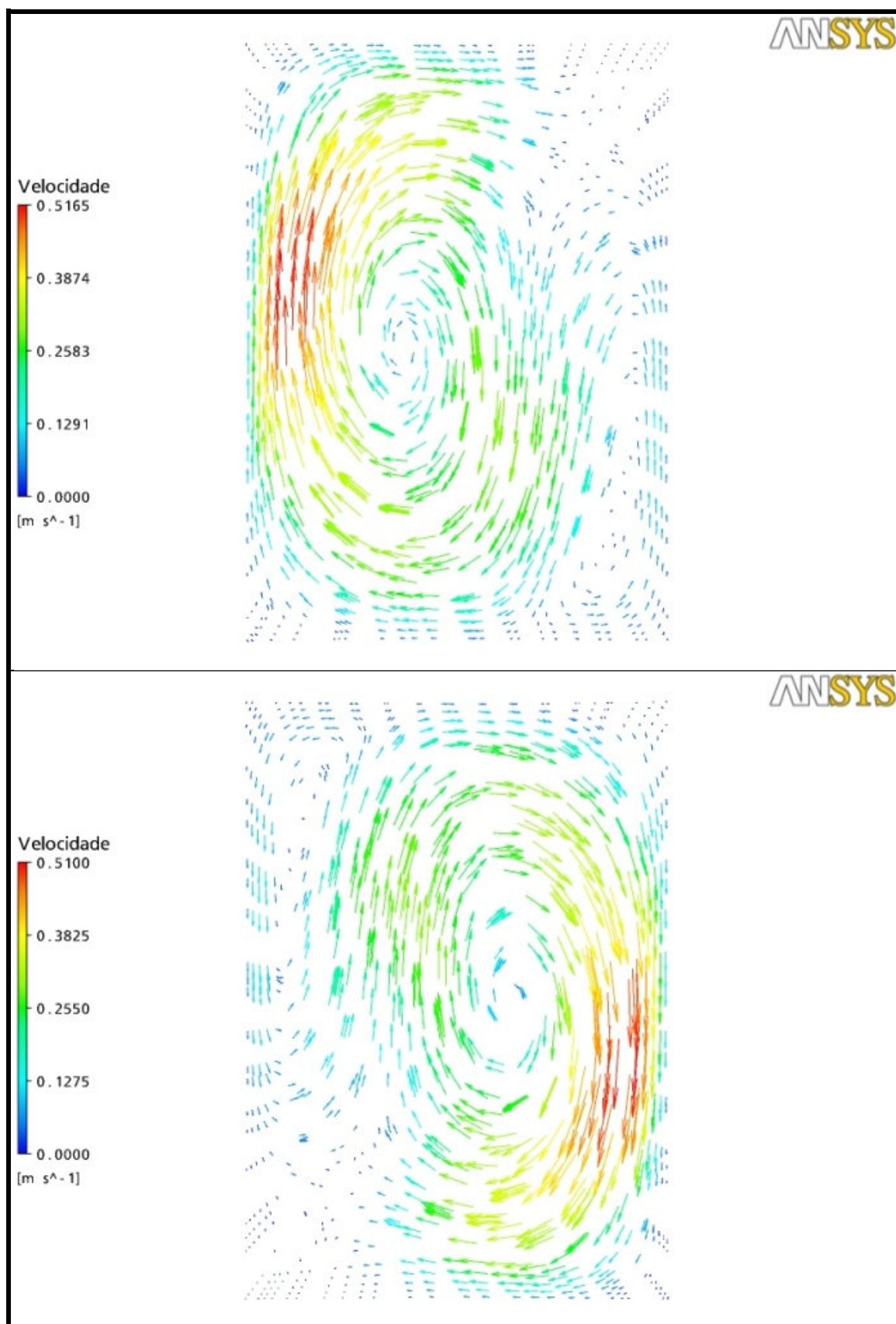


Figura 82 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M2 com vazão 9 ml/min (Continuação).

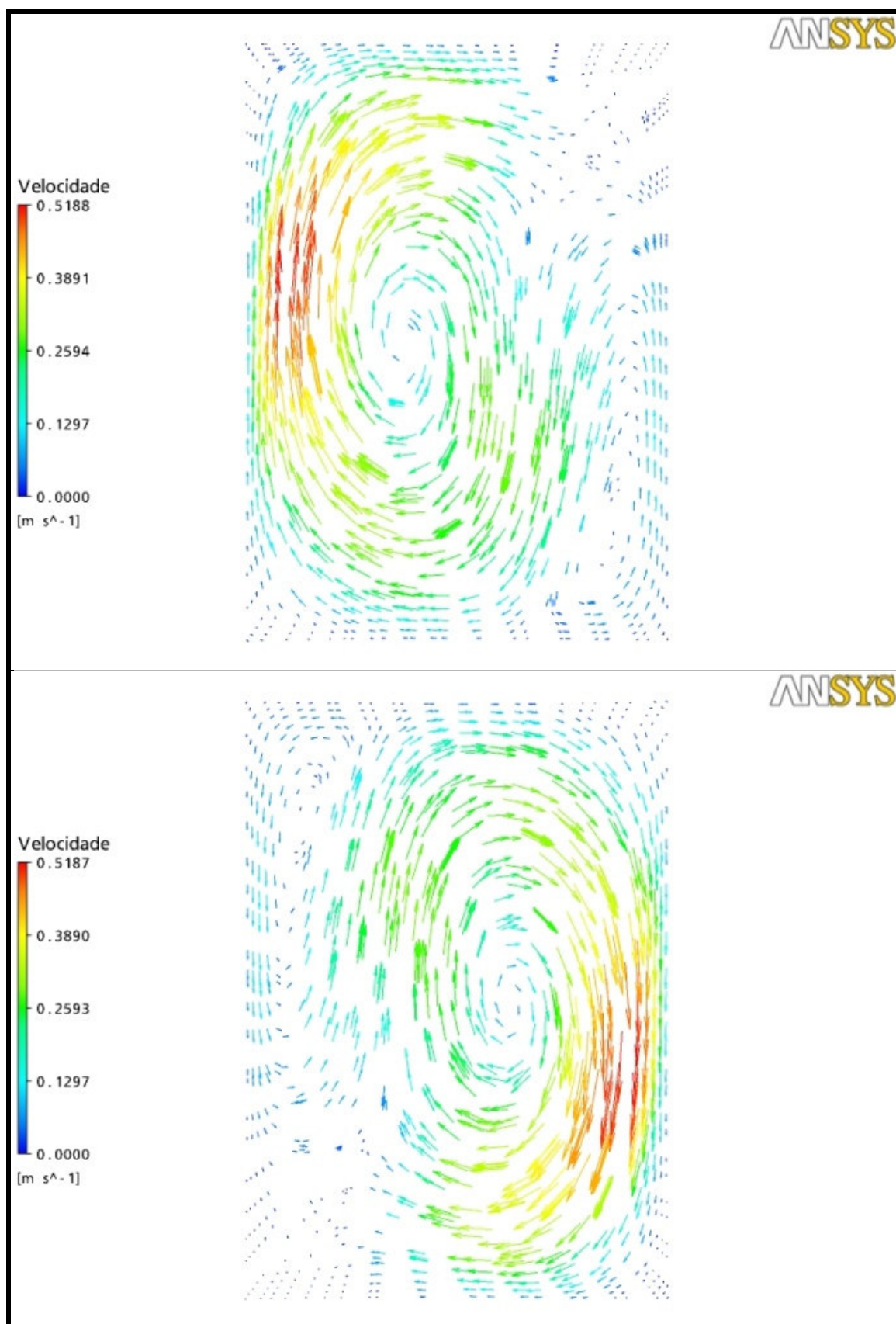


Figura 83 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M2 com vazão 9 ml/min (Continuação).

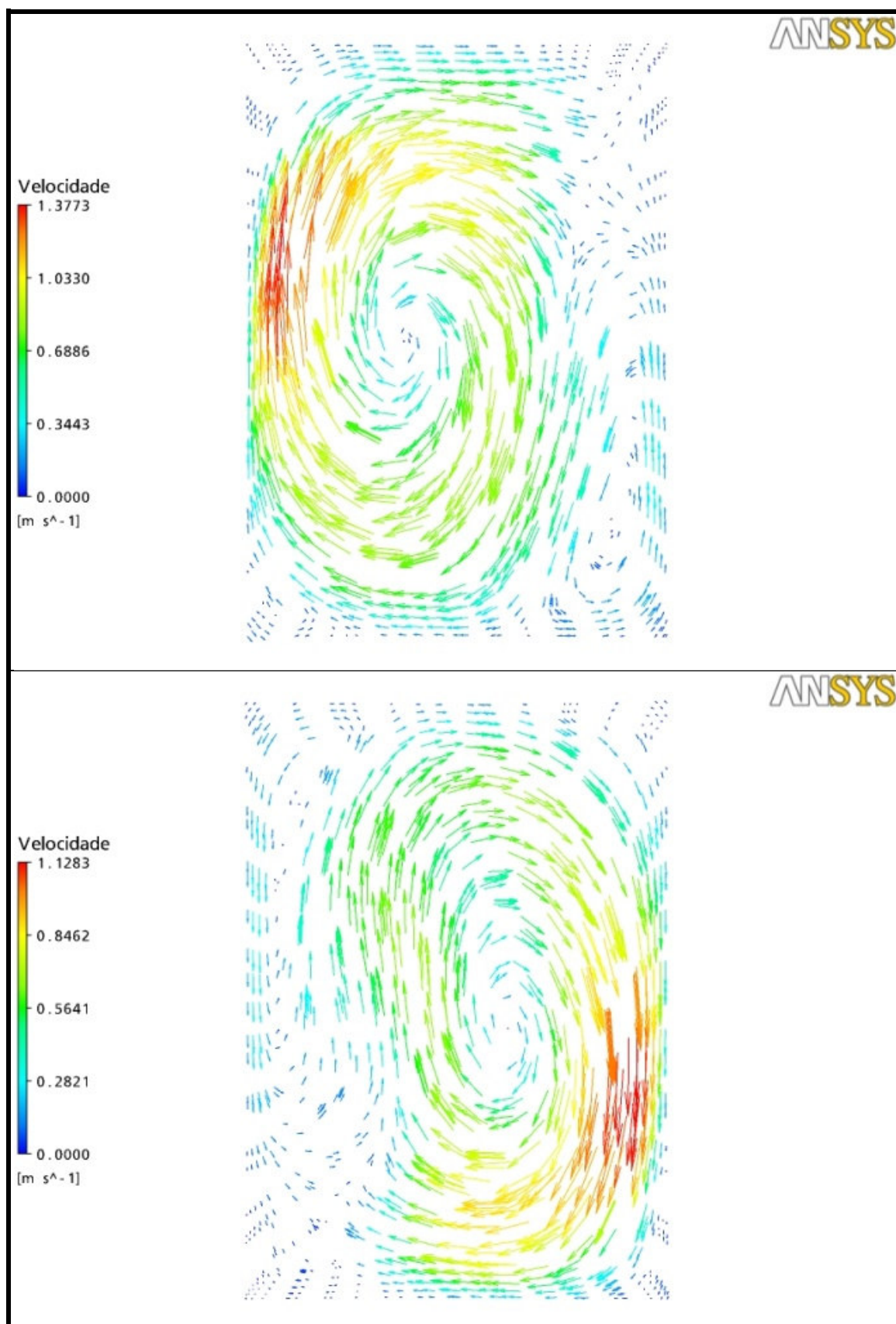


Figura 84 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M2 com vazão 18 ml/min.

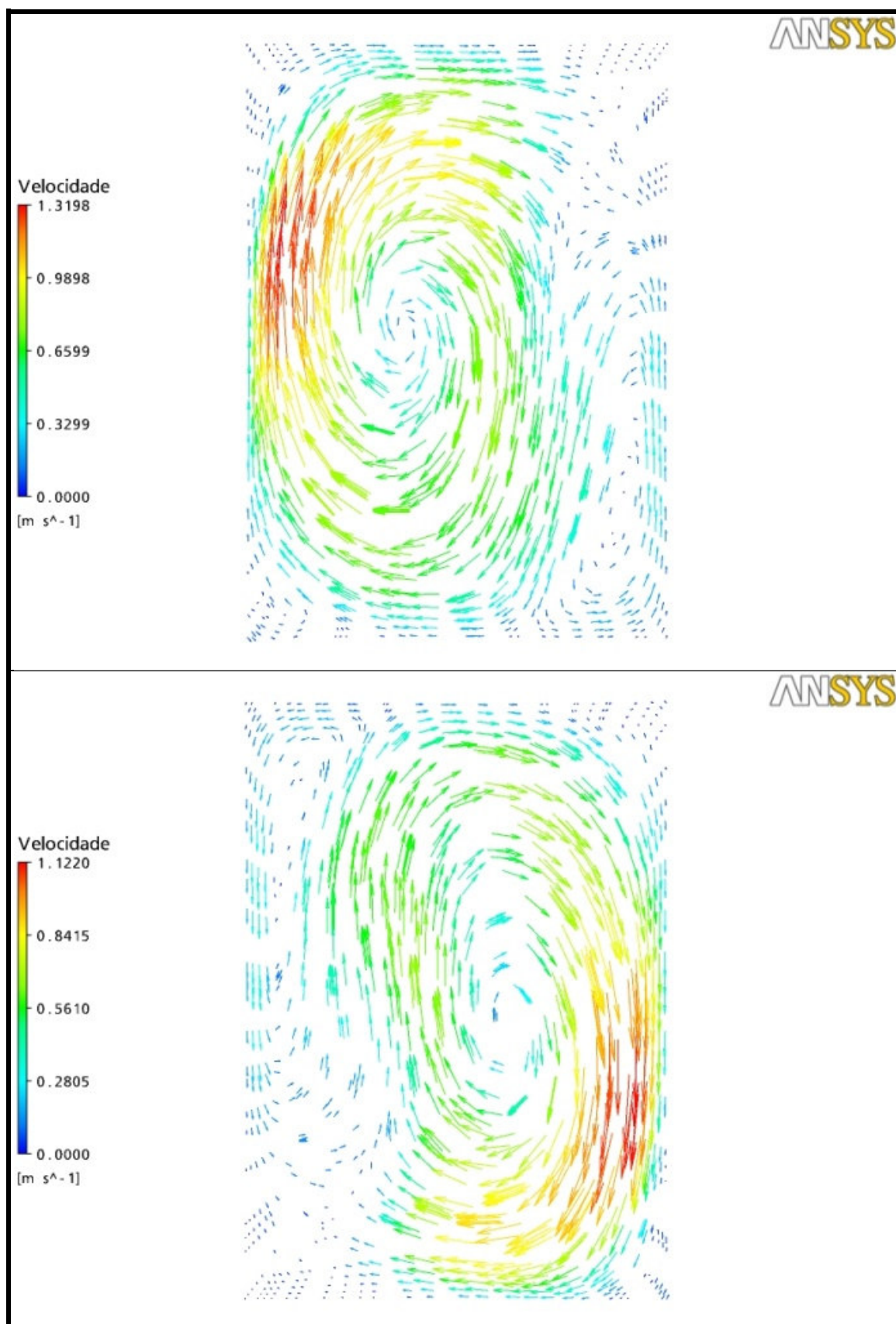


Figura 85 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M2 com vazão 18 ml/min (Continuação).

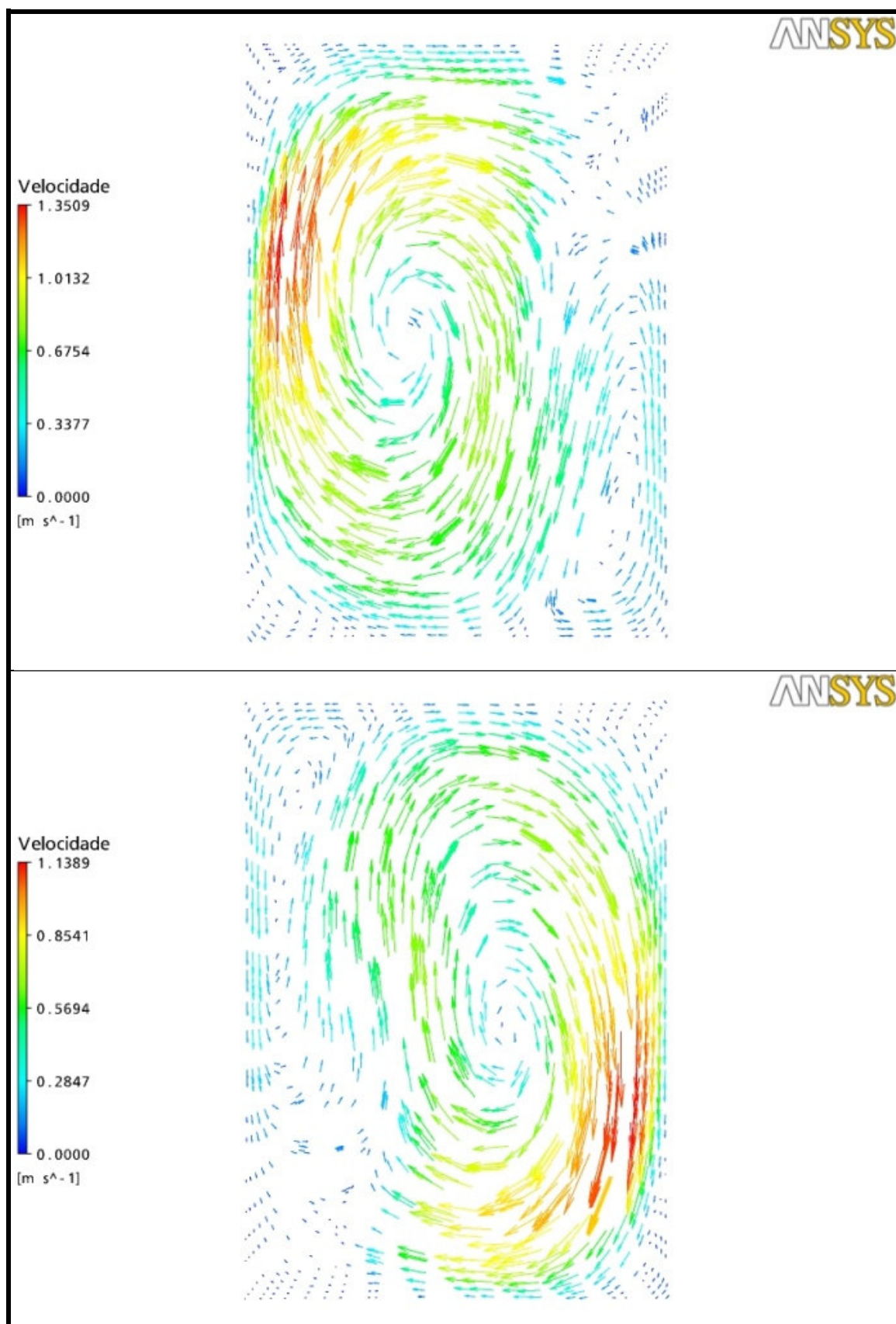


Figura 86 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M2 com vazão 18 ml/min (Continuação).

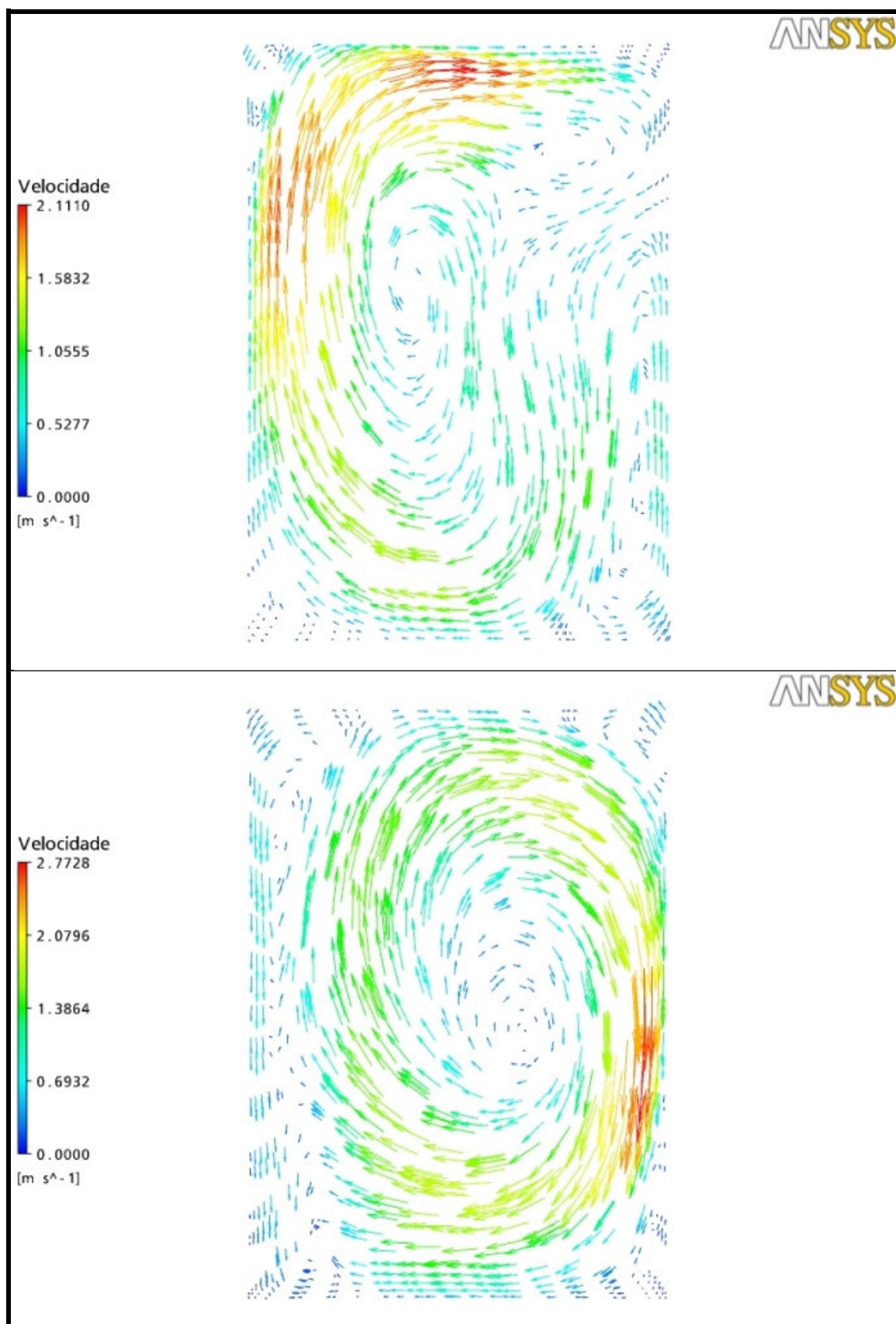


Figura 87 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M2 com vazão 36 ml/min.

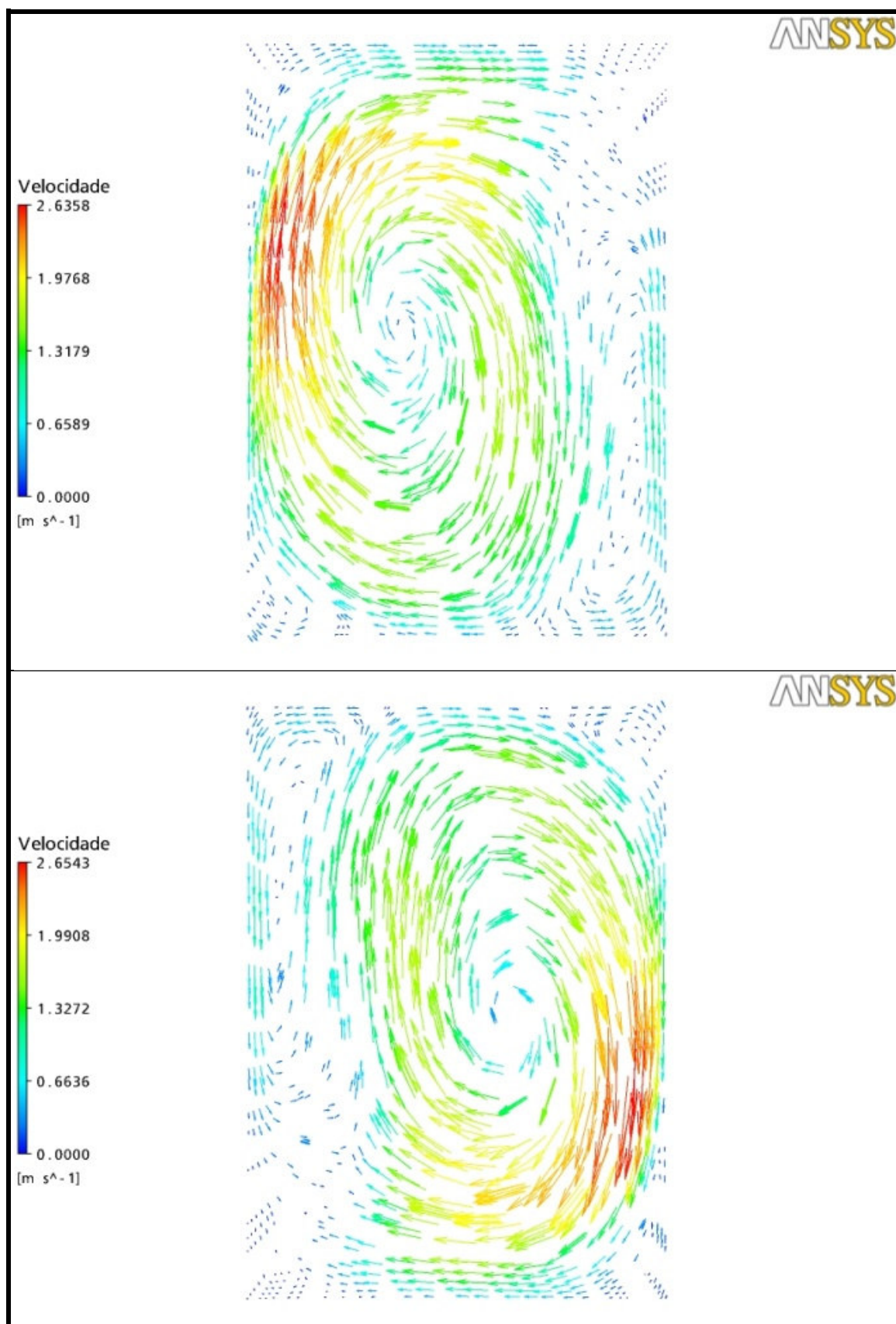


Figura 88 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M2 com vazão 36 ml/min (Continuação).

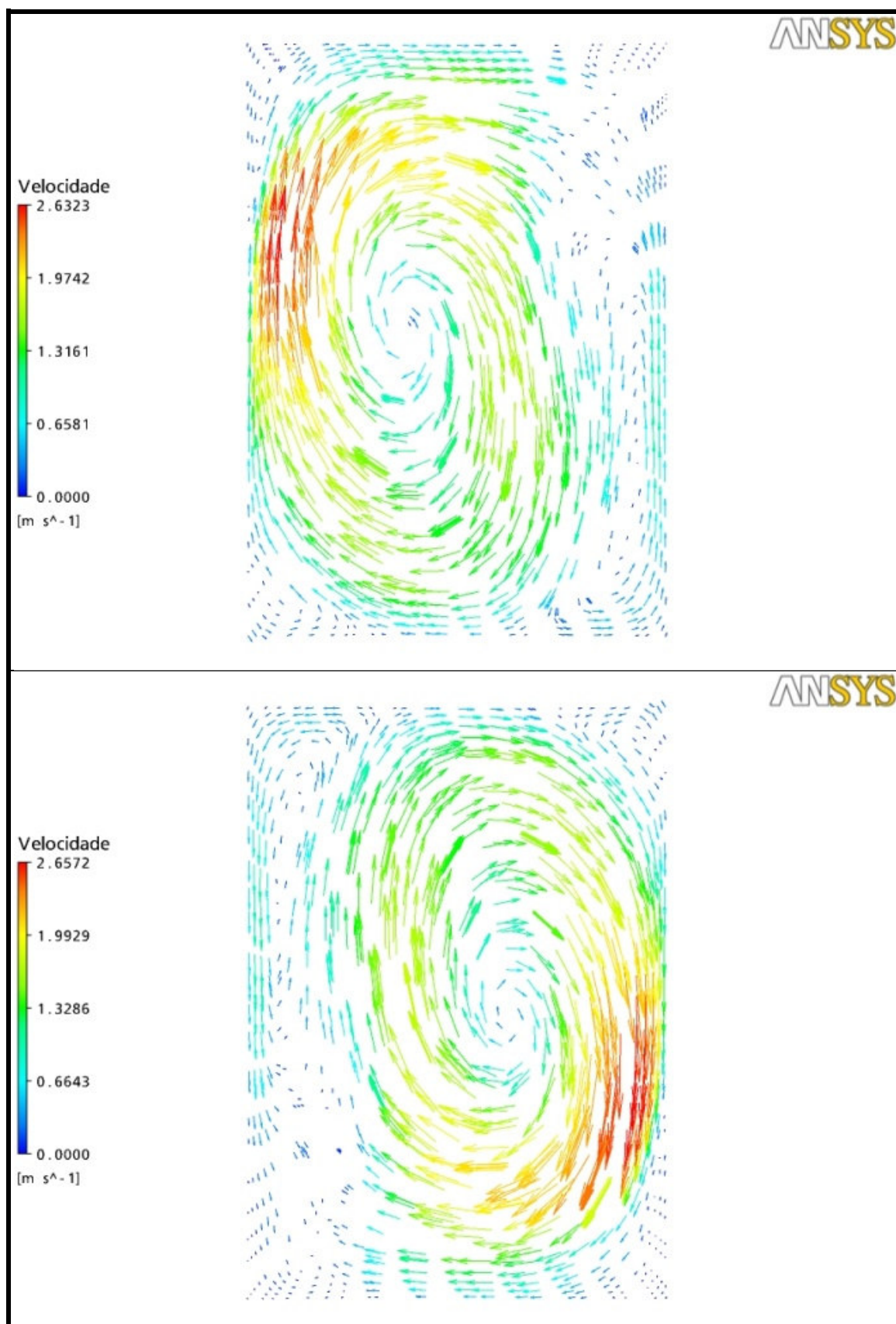


Figura 89 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M2 com vazão 36 ml/min (Continuação).

O escoamento secundário que surge é proporcional à vazão, quanto maior a velocidade axial do escoamento, maior a velocidade máxima dos vórtices, representado aqui pela componente tangencial da velocidade, que surgem no escoamento secundário, mantendo a mesma proporção, conforme a vazão dobra a velocidade tangencial máxima também dobra.

Nas Figuras 90 (a), (b), (c) e (d), pode-se visualizar que os micromisturadores com a vazão de 4,5 ml/min e 9,0 ml/min, apresentam uma velocidade média praticamente constante ao longo do micromisturador. Já nos de vazão 18 ml/min e 36 ml/min, apresentam um maior grau de variação no interior do mesmo. Isso mostra que para os dois primeiros casos o grau de refinamento da malha demonstra resultados consistentes com a equação da continuidade.

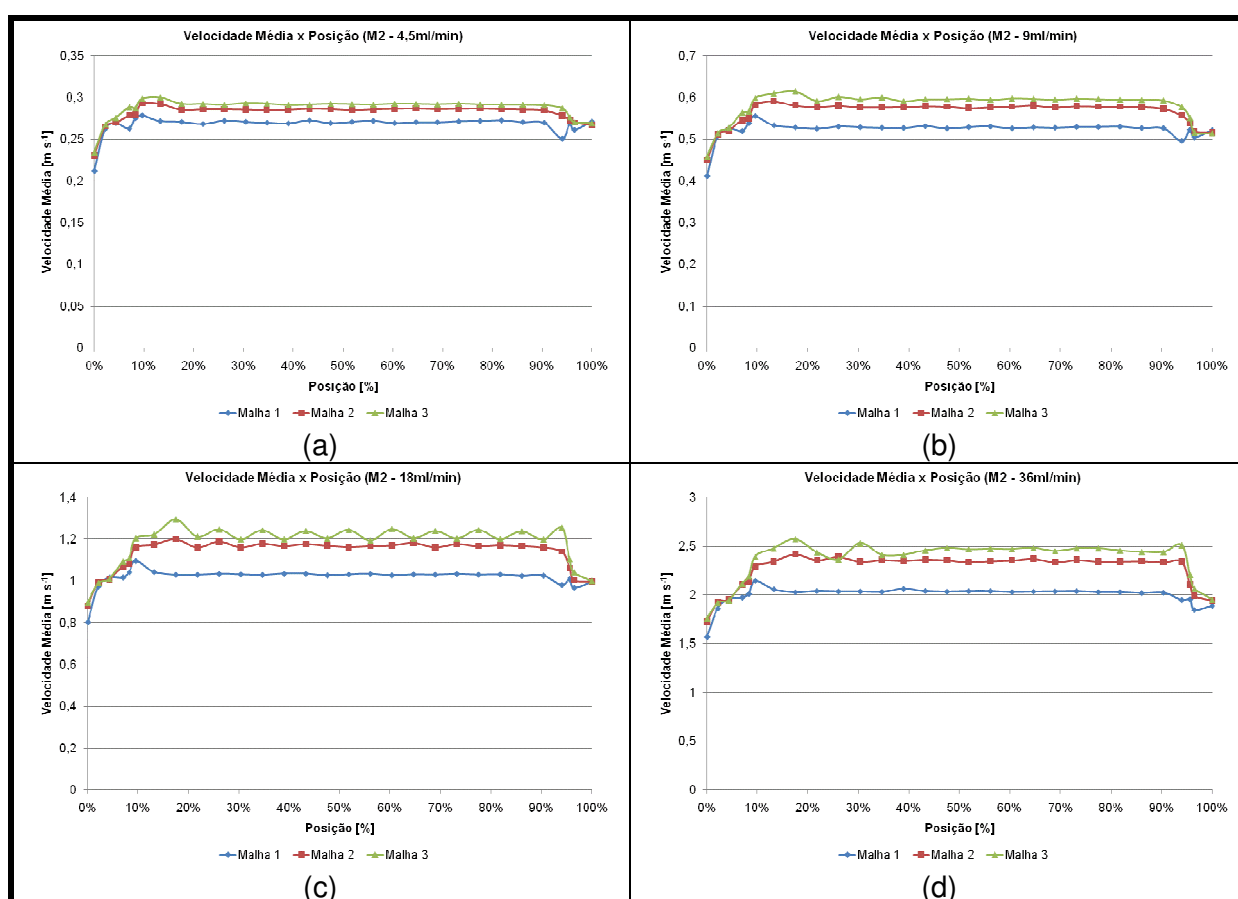


Figura 90 - Velocidade média em função da posição ao longo do micromisturador M1 para as diferentes vazões com diferentes malhas.

Na Figura 91 são apresentados os valores médios da velocidade ao longo do micromisturador M2 para a malha mais refinada das diferentes vazões. Há uma

constância entre a proporção das velocidades médias, assim como há entre as velocidades máxima e as vazões. E para as duas maiores vazões verifica-se que é necessário o refinamento da malha para a correta previsão da velocidade média ao longo do micromisturador.

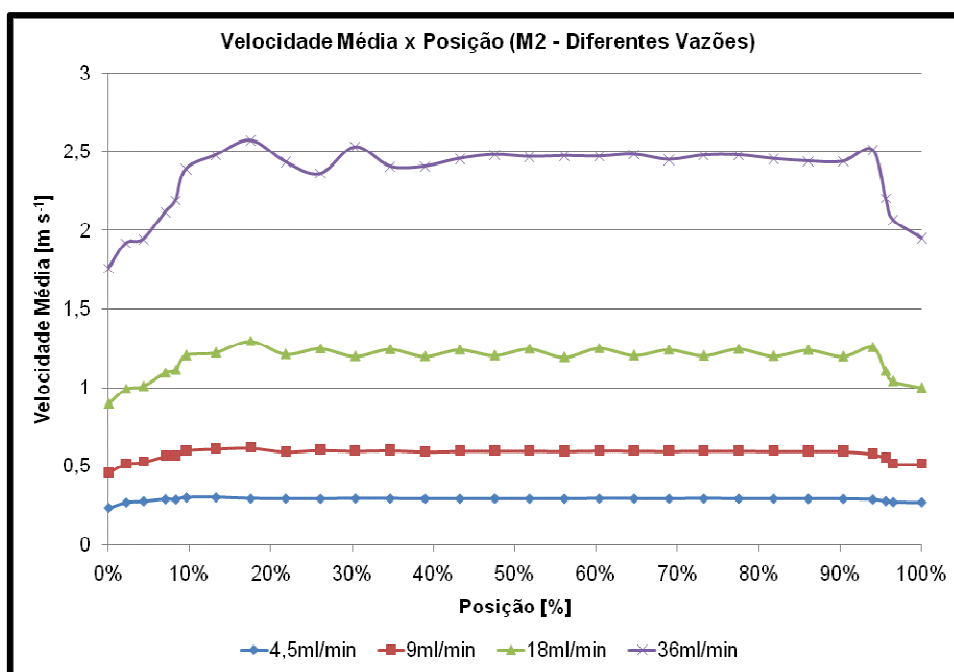


Figura 91 - Comparativo da velocidade média para as malhas mais refinadas do micromisturador M2 nas diferentes vazões.

5.2.4 Perda de Carga de M2

Foi identificado anteriormente que o perfil de pressão obtido era muito dependente do grau de refinamento da malha, como consequência o mesmo ocorre para a perda de carga. Pela Figura 92, tem-se, praticamente, o mesmo resultado para as malhas 2 e 3 e há um bom ajuste com o perfil parabólico esperado, uma vez que a perda de carga é uma função quadrática da vazão.

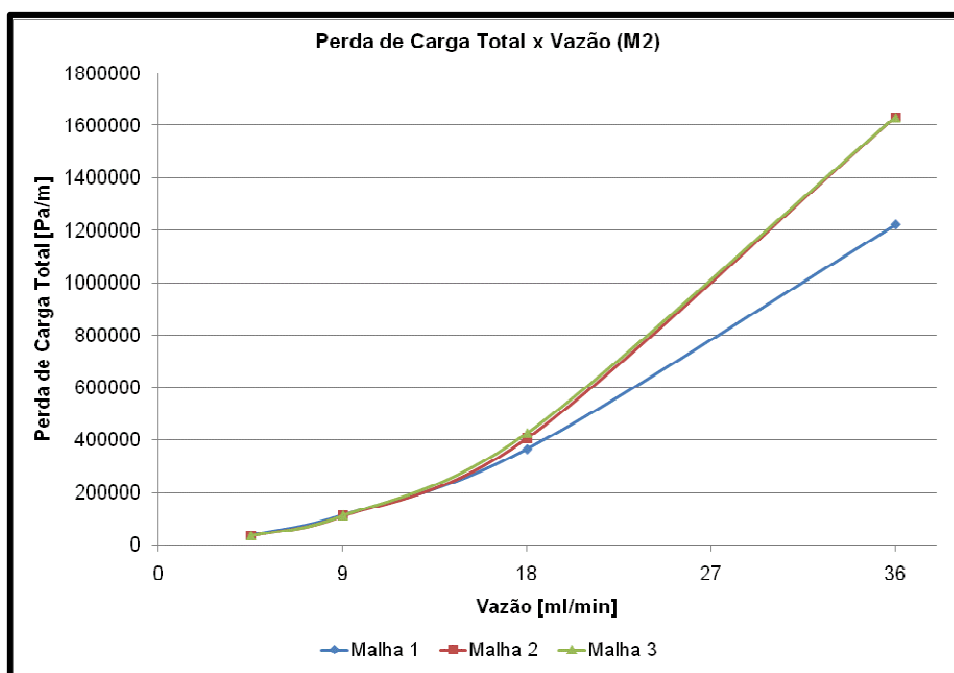


Figura 92 - Perda de carga do micromisturador M2 para as diferentes vazões com diferentes malhas.

5.3 MICROMISTURADOR 3 (M3)

Para o micromisturador M3 foi realizado um teste de independência de malha, assim como realizado para os micromisturadores M1 e M2.

Os desvios apresentados nas Tabelas 13, 14, 15 e 16 foram calculados com base em um levantamento feito em 29 planos ao longo dos micromisturadores, sendo apresentados os desvios máximos encontrados ao longo destes planos. A mesma definição dos desvios dos micromisturadores M1 e M2 foi utilizada para o micromisturador M3.

Nas Tabelas 12, 13, 14, e 15 é verificado que para o micromisturador 3, não há uma concordância entre os valores encontrados e não há proximidade de valores entre a malha 2 e a malha 3. Ocorrem diferenças de até 27% nos valores, diferença está que para fins qualitativos poderá induzir a conclusões errôneas.

Tabela 12 - Comparação entre as malhas do micromisturador M3 - Vazão 4,5ml/min

	D1	D2	D3
Fração Mássica Média	1,74%	0,23%	1,61%
Velocidade Média	22,99%	4,10%	19,70%
Pressão	10,02%	8,58%	8,53%
Qualidade da Mistura	88,76%	17,78%	75,79%
Perda de Carga	3,12%	0,02%	3,14%

Tabela 13 - Comparação entre as malhas do micromisturador M3 - Vazão 9ml/min

	D1	D2	D3
Fração Mássica Média	1,67%	0,40%	1,54%
Velocidade Média	24,55%	5,36%	20,27%
Pressão	16,10%	6,79%	11,17%
Qualidade da Mistura	60,02%	13,48%	41,01%
Perda de Carga	2,57%	1,94%	0,64%

Tabela 14 - Comparação entre as malhas do micromisturador M3 - Vazão 18ml/min

	D1	D2	D3
Fração Mássica Média	1,63%	0,46%	1,51%
Velocidade Média	26,86%	10,04%	18,70%
Pressão	23,50%	15,19%	10,81%
Qualidade da Mistura	33,97%	19,54%	31,17%
Perda de Carga	9,87%	0,38%	10,21 %

Tabela 15 - Comparação entre as malhas do micromisturador M3 - Vazão 36ml/min

	D1	D2	D3
Fração Mássica Média	1,61%	0,73%	1,50%
Velocidade Média	28,60%	12,53%	20,24%
Pressão	39,05%	26,28%	20,22%
Qualidade da Mistura	33,70%	19,54%	38,72%
Perda de Carga	14,67%	5,70%	19,27%

5.3.1 Qualidade da Mistura de M3

Nas Figuras 93 (a), (b), (c) e (d) é possível acompanhar os contornos da evolução da fração mássica ao longo do micromisturador para as diferentes vazões simuladas, sendo (a) a menor vazão e (d) a maior vazão.

O contorno externo mostra que são necessários aproximadamente dois elementos de mistura para se alcançar a mistura completa na menor vazão, enquanto que para a maior um único elemento é suficiente. Com uma maior vazão, tem-se um menor tempo de residência no interior do micromisturador, se a transferência de massa fosse dominada única e exclusivamente pela difusão, para um menor tempo de residência ter-se-ia uma pior qualidade da mistura com o aumento da vazão, porém isso não é constatado, logo, a mistura foi obtida pelo transporte convectivo de massa.

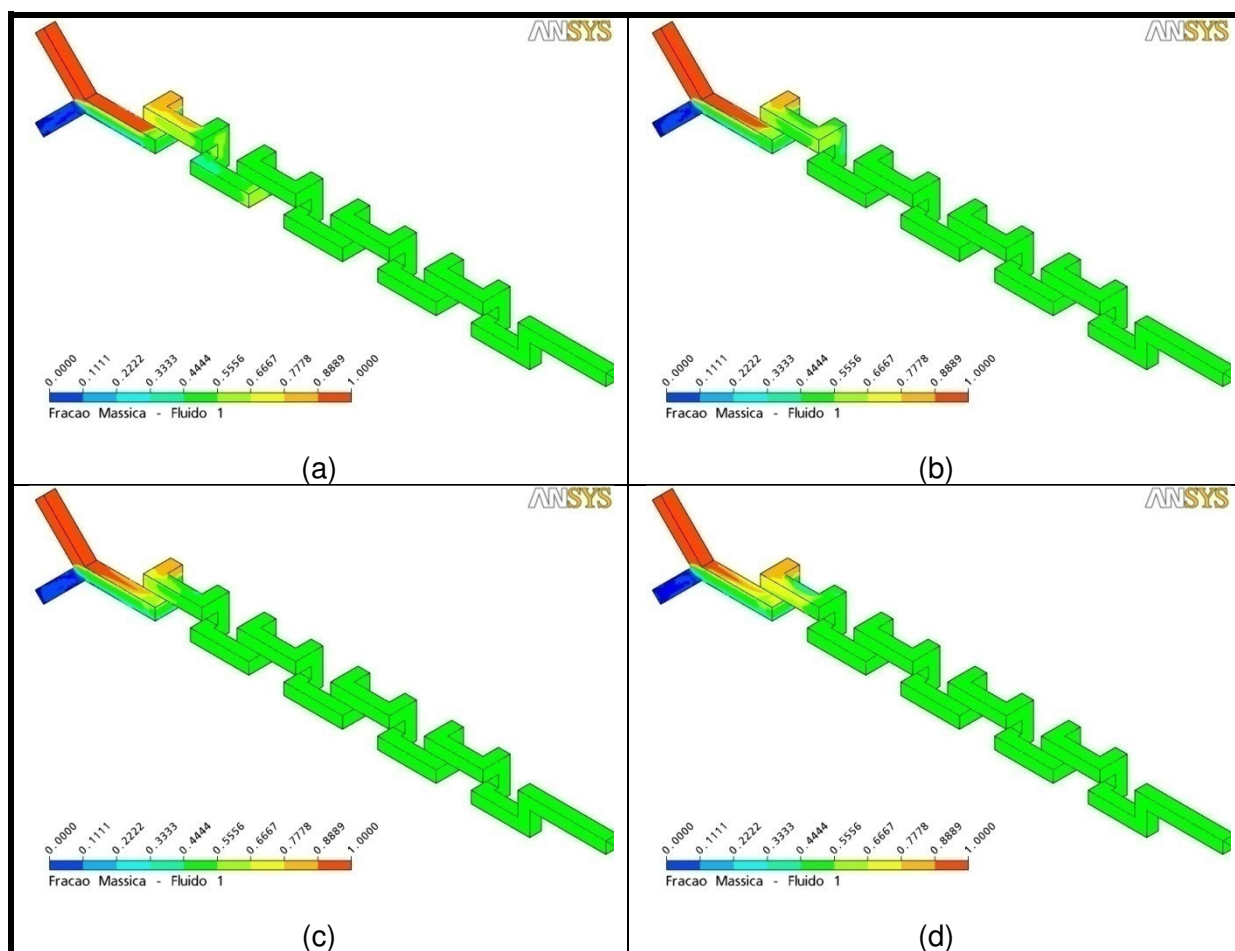


Figura 93 - Contornos de Fração Mássica para o micromisturador M3 para as diferentes vazões.

Nas Figuras 94, 95, 96 e 97 (em ordem crescente de vazão) nota-se que para a menor vazão por volta do décimo-primeiro plano a mistura completa é atingida enquanto que para a maior vazão no quinto plano a mesma já foi alcançada.

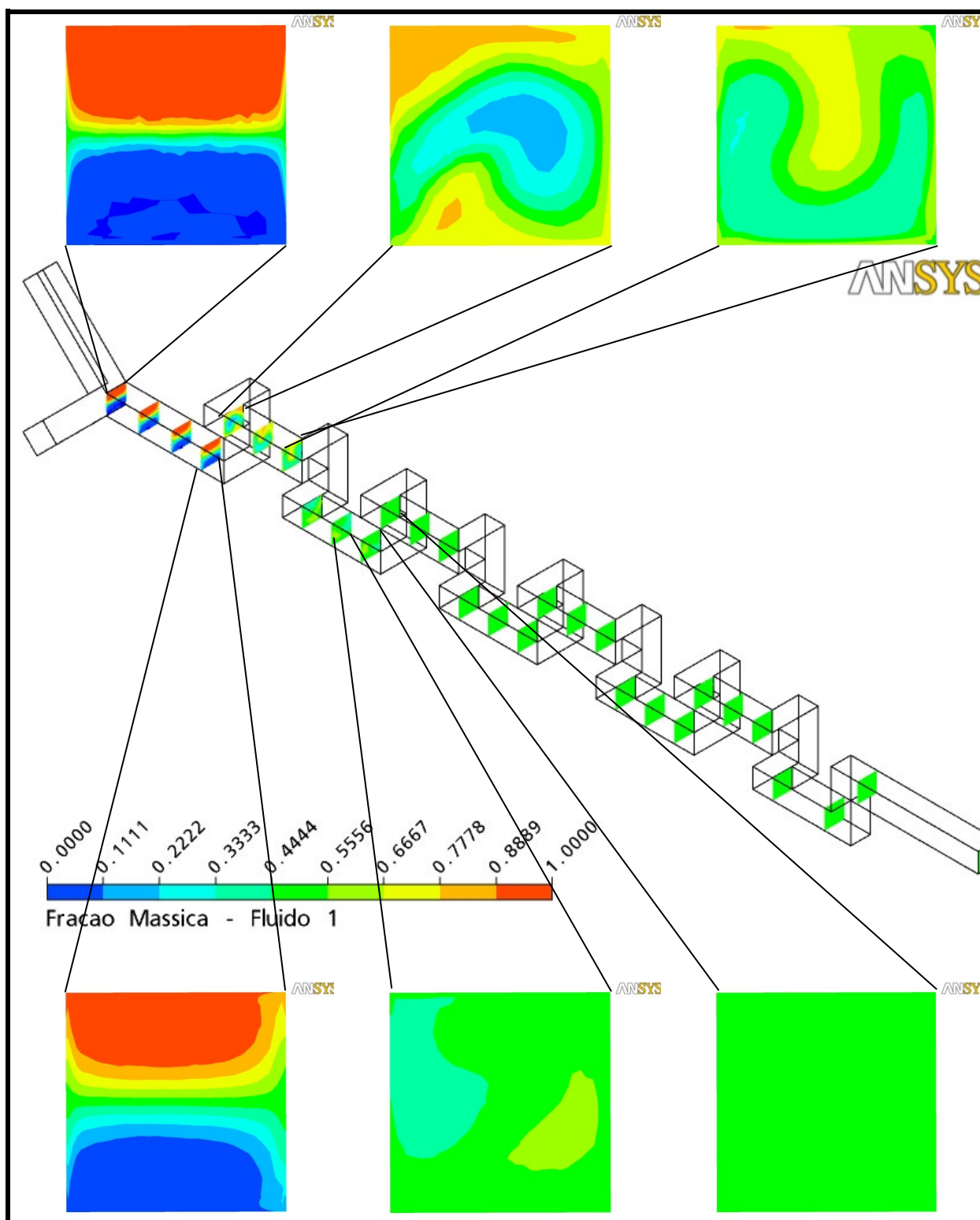


Figura 94 - Detalhes dos contornos de fração mássica para vazão de 4,5 ml/min no micromisturador M3.

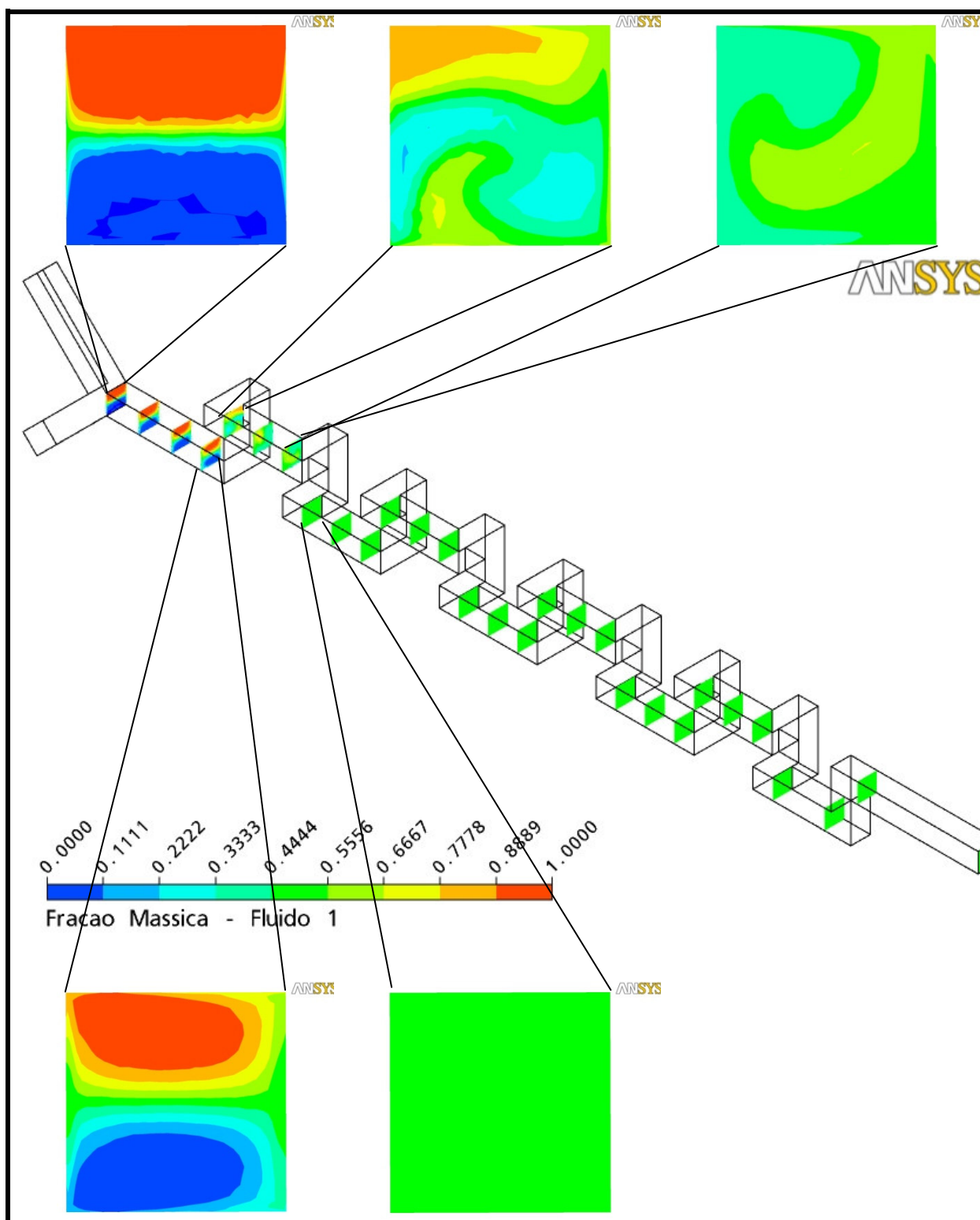


Figura 95 - Detalhes dos contornos de fração mássica para vazão de 9 ml/min no micromisturador M3.

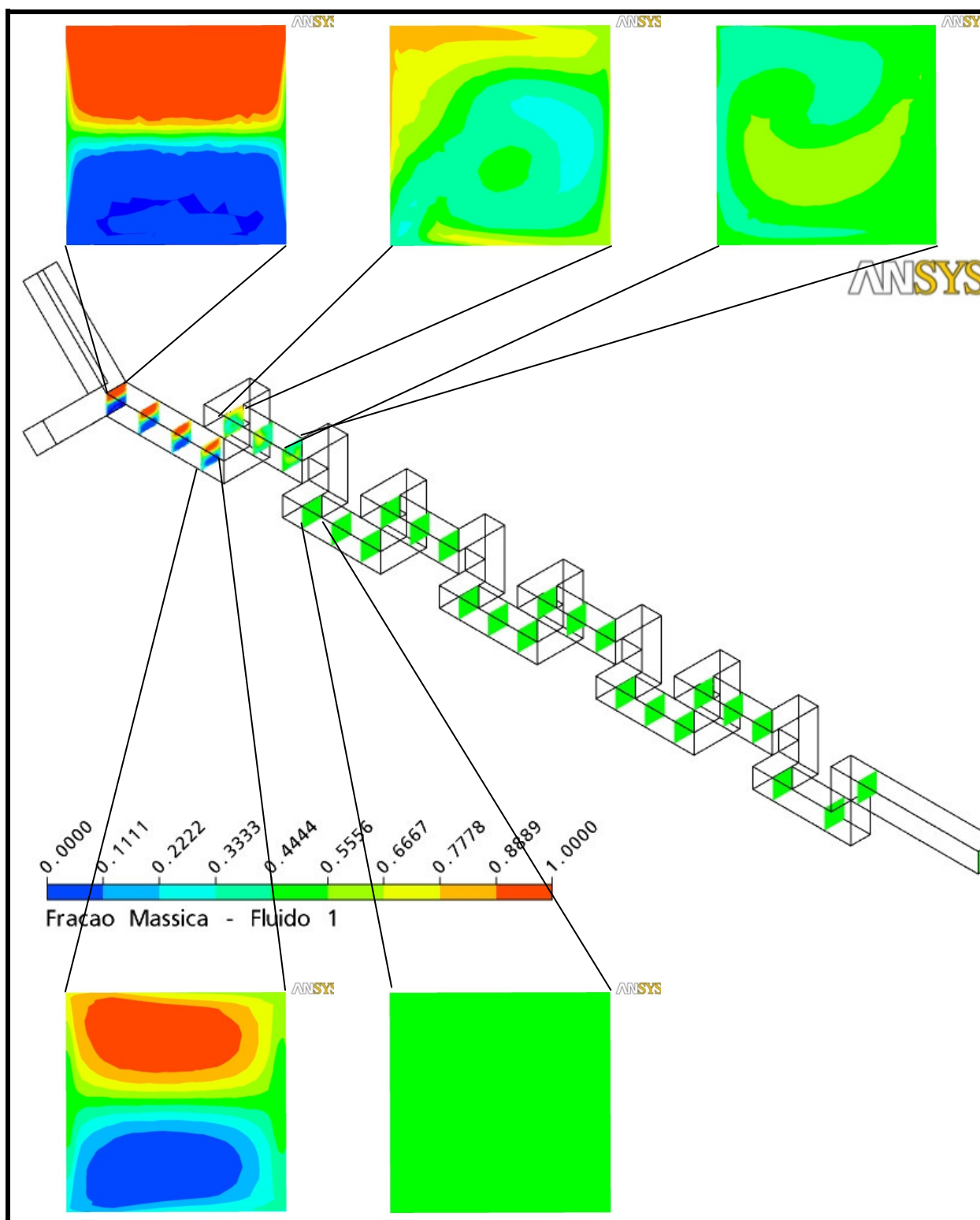


Figura 96 - Detalhes dos contornos de fração mássica para vazão de 18 ml/min no micromisturador M3.

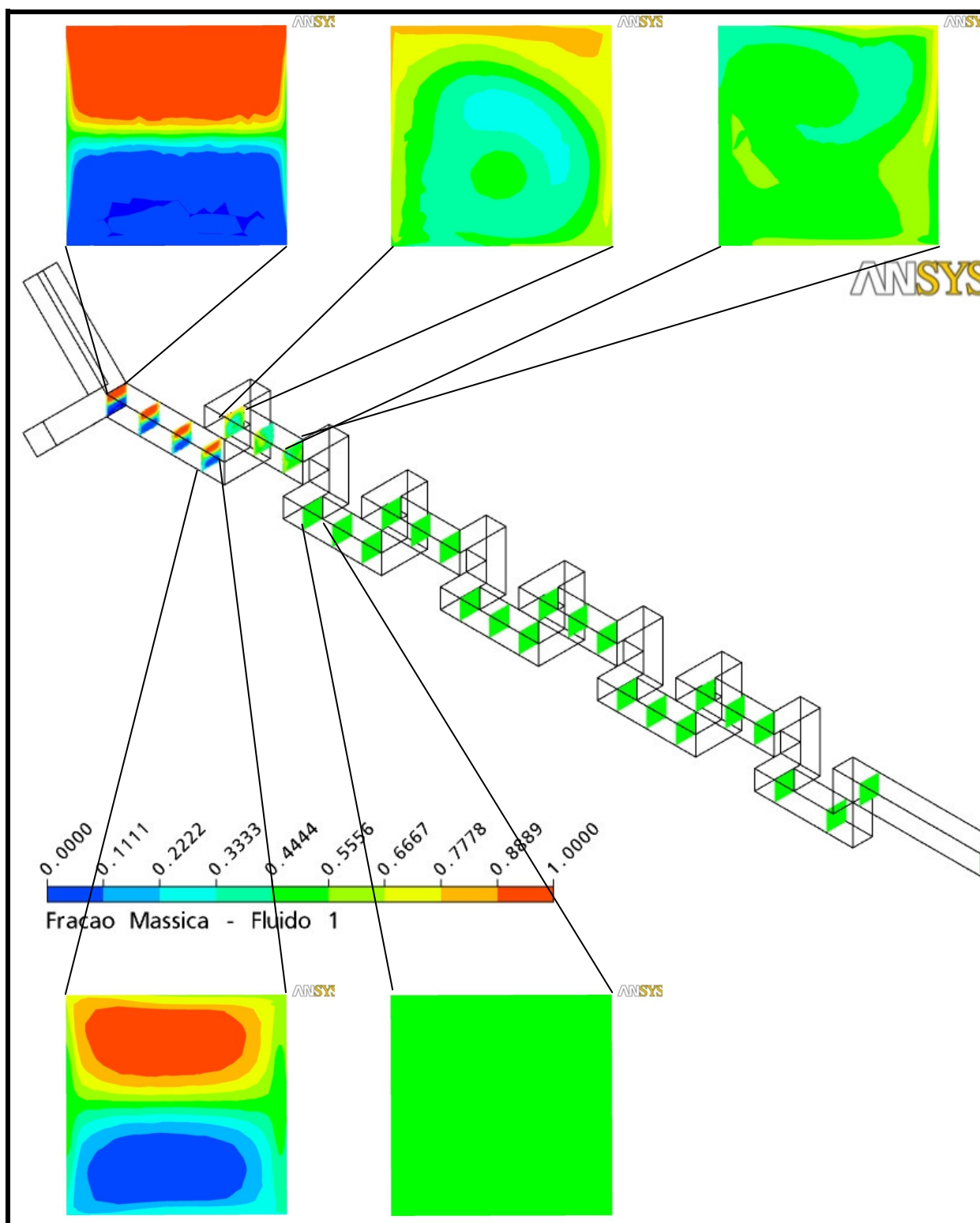


Figura 97 - Detalhes dos contornos de fração mássica para vazão de 36 ml/min no micromisturador M3.

Assim como ocorreu no micromisturador M1 é possível notar que no trecho reto do micromisturador, antes de ocorrer à primeira mudança de direção do

escoamento, as frações mássicas possuem contornos simétricos, porém após adentrarem o primeiro elemento de mistura tal simetria desaparece.

Tem-se o mesmo comportamento de mistura em todas as vazões e percebe-se que uma torção do Fluido 1 em volta do Fluido 2, fato demonstrado nos contornos a partir do plano 5 em que existem frações mássicas maiores que 0,5 na região próxima às paredes do micromisturador e frações mássicas iguais a zero no centro do micromisturador, apesar da forma de alimentação do micromisturador. Comportamento inverso ao detectado no micromisturador M2.

Em função do número de Reynolds há uma maior ou menor dispersão das frações mássicas no início do misturador.

Nas Figuras 98 (a), (b), (c) e (d), é apresentado um comparativo do avanço da qualidade da mistura em função da posição normalizada como definida para o micromisturador M1, para todas as malhas e condições de escoamento.

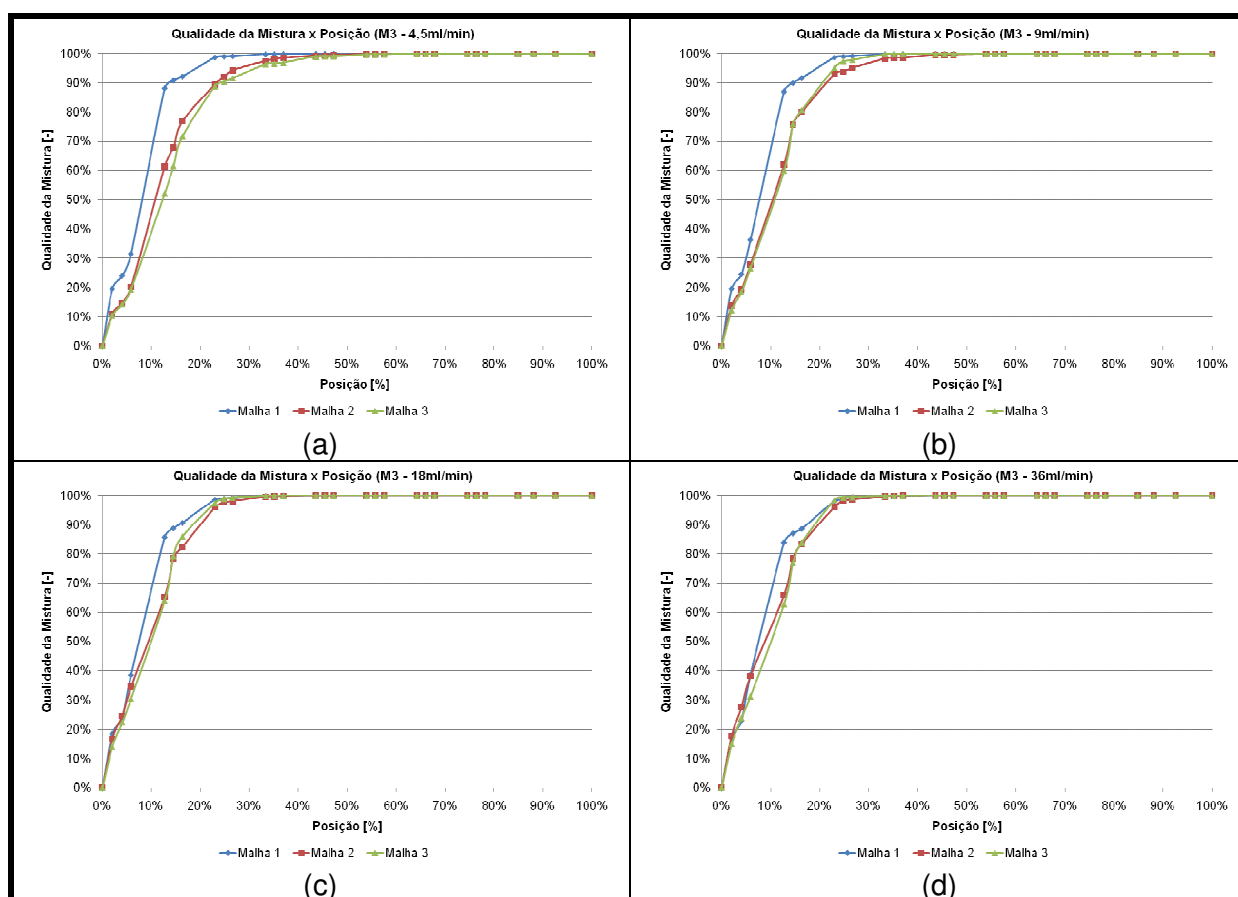


Figura 98 - Parâmetro da qualidade da mistura em função da posição ao longo do micromisturador M3 para as diferentes vazões com diferentes malhas.

Para todas as condições, pode-se observar que há uma forte influência do resultado obtido em função do grau de refinamento da malha. Isso pode ser um indício de que os mecanismos de mistura os quais surgem nessas condições de operação são diferentes, e uma malha com menor grau de refinamento não é capaz de captar essa condição.

A Figura 99 apresenta um comparativo das malhas mais refinadas para as diferentes vazões. Com a menor vazão o micromisturador alcança a completa mistura dos componentes em uma posição mais à frente do que com relação as outras condições, para as quais em 40% do micromisturador a mistura completa já foi alcançada.

Para as vazões de 9,0 ml/min, 18 ml/min e 36 ml/min, verifica-se que o perfil de qualidade de mistura ao longo do micromisturador é praticamente idêntico, portanto, independente da vazão.

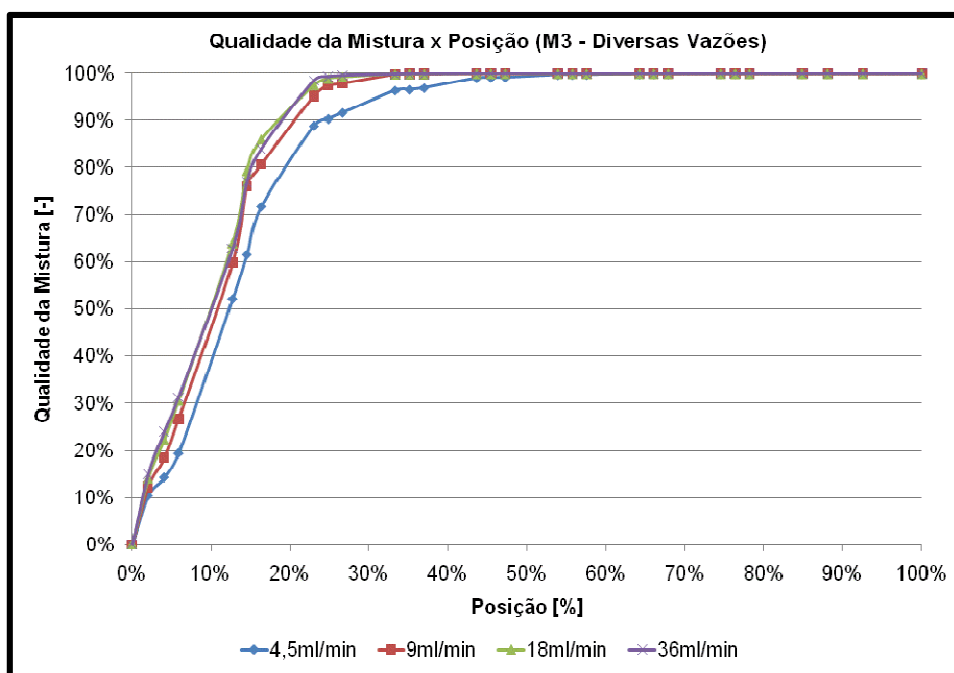


Figura 99 - Comparativo da qualidade da mistura para as malhas mais refinadas do micromisturador M3 nas diferentes vazões.

5.3.2 Perfil de Pressão de M3

Nas Figuras 100 (a), (b), (c) e (d) é possível identificar que um mesmo perfil de pressão se desenvolve durante o escoamento dos fluidos no interior do micromisturador. Porém, como já era esperado, quanto maior a vazão maior o nível de pressão envolvido.

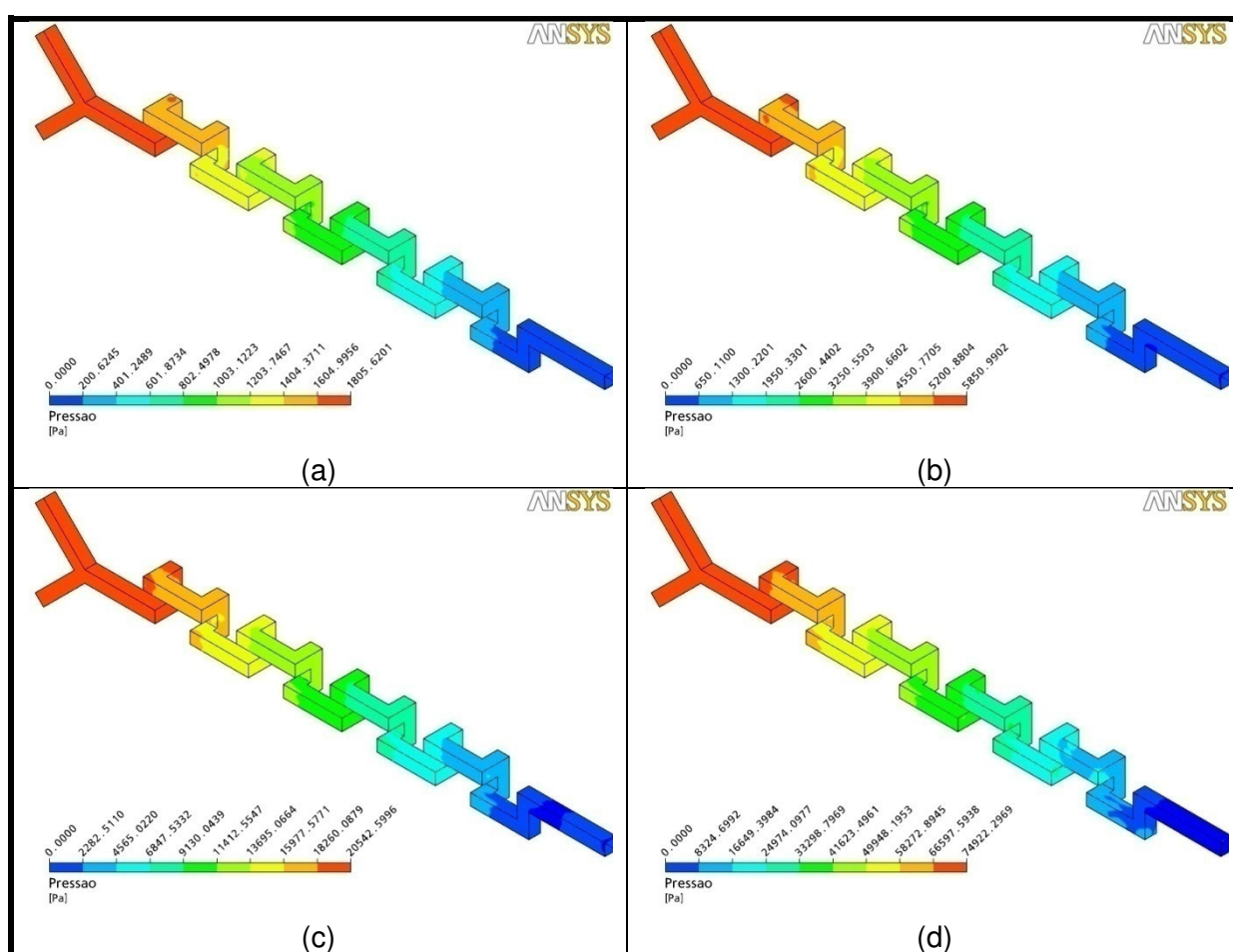


Figura 100 - Contornos de Pressão para o micromisturador M3 para as diferentes vazões.

Para o micromisturador M3, tem-se os níveis de pressão máxima muito próximo dos apresentados pelo micromisturador M2, para este caso a mesma ficou na faixa $1,8 \text{ kPa} < P_{\text{total}} < 75,0 \text{ kPa}$.

O conhecimento prévio das pressões envolvidas no regime de operação destes equipamentos é decisivo na escolha de materiais e processos de fabricação,

direcionando a escolha para àqueles que possuam a resistência mecânica adequada.

Nas Figuras 101 (a), (b), (c) e (d) é possível verificar um comportamento linear da pressão ao longo do misturador, o que demonstra aderência com o modelo de perda de carga que será utilizado no cálculo do fator de atrito, em que a perda de carga é linearmente dependente do comprimento.

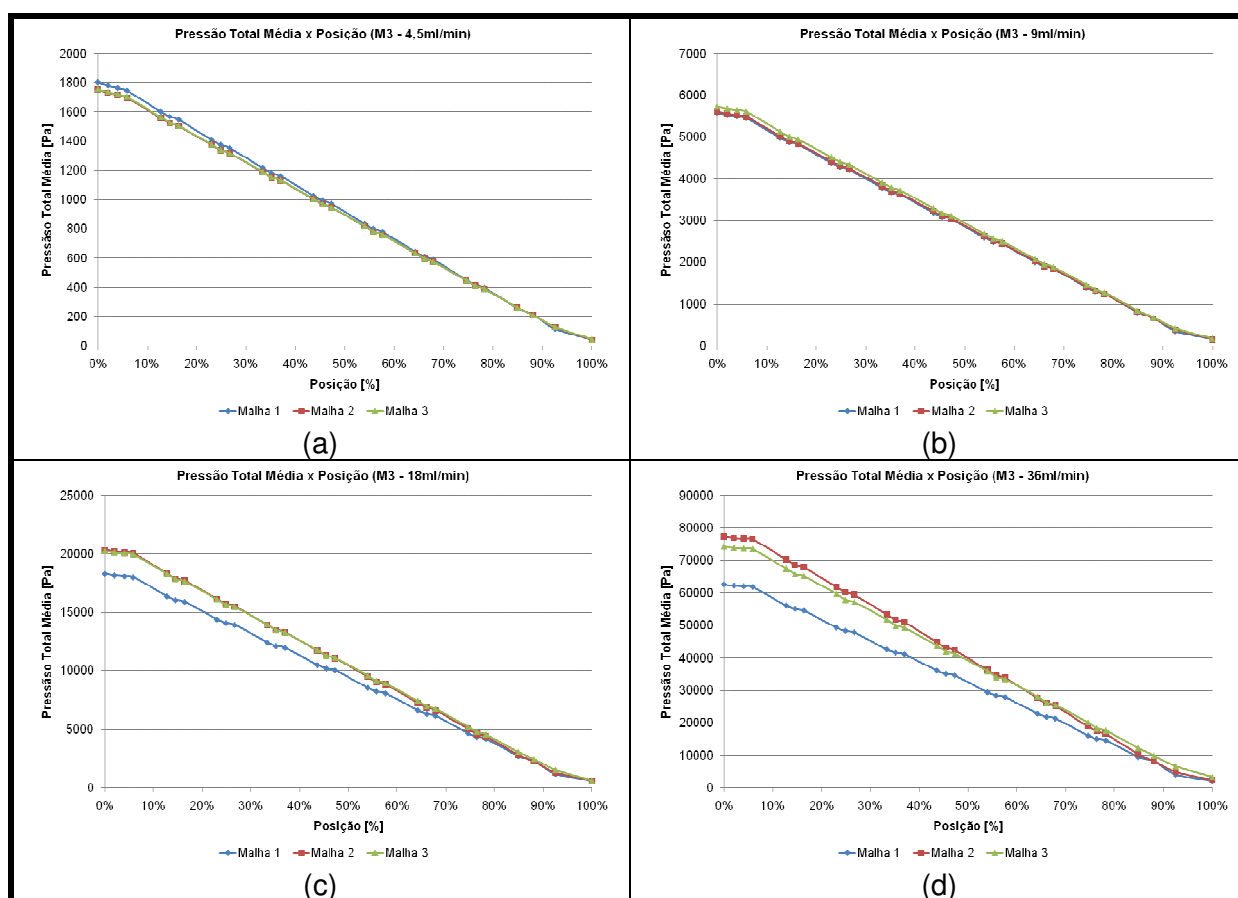


Figura 101 - Pressão total média em função da posição ao longo do micromisturador M3 para as diferentes vazões com diferentes malhas.

Ao contrário do que ocorre com o micromisturador M1 tem-se uma diferença da ordem de 27% entre a pressão prevista pela malha 1 e as outras duas malhas para as duas maiores vazões. Portanto, não se pode utilizar as malhas indistintamente para tirar conclusões com relação à perda de carga.

5.3.3 Perfil de Velocidade de M3

Nas Figuras 102 (a), (b), (c) e (d) são apresentadas as linhas de corrente para os diferentes regimes simulados. É possível identificar regiões de baixa velocidade e recirculação nos cantos externos superiores e inferiores, demonstrando a existência de um caminho preferencial para o escoamento dos fluidos, quanto maior o volume de tais regiões maior o tempo de residência que os fluidos terão no interior do micromisturador.

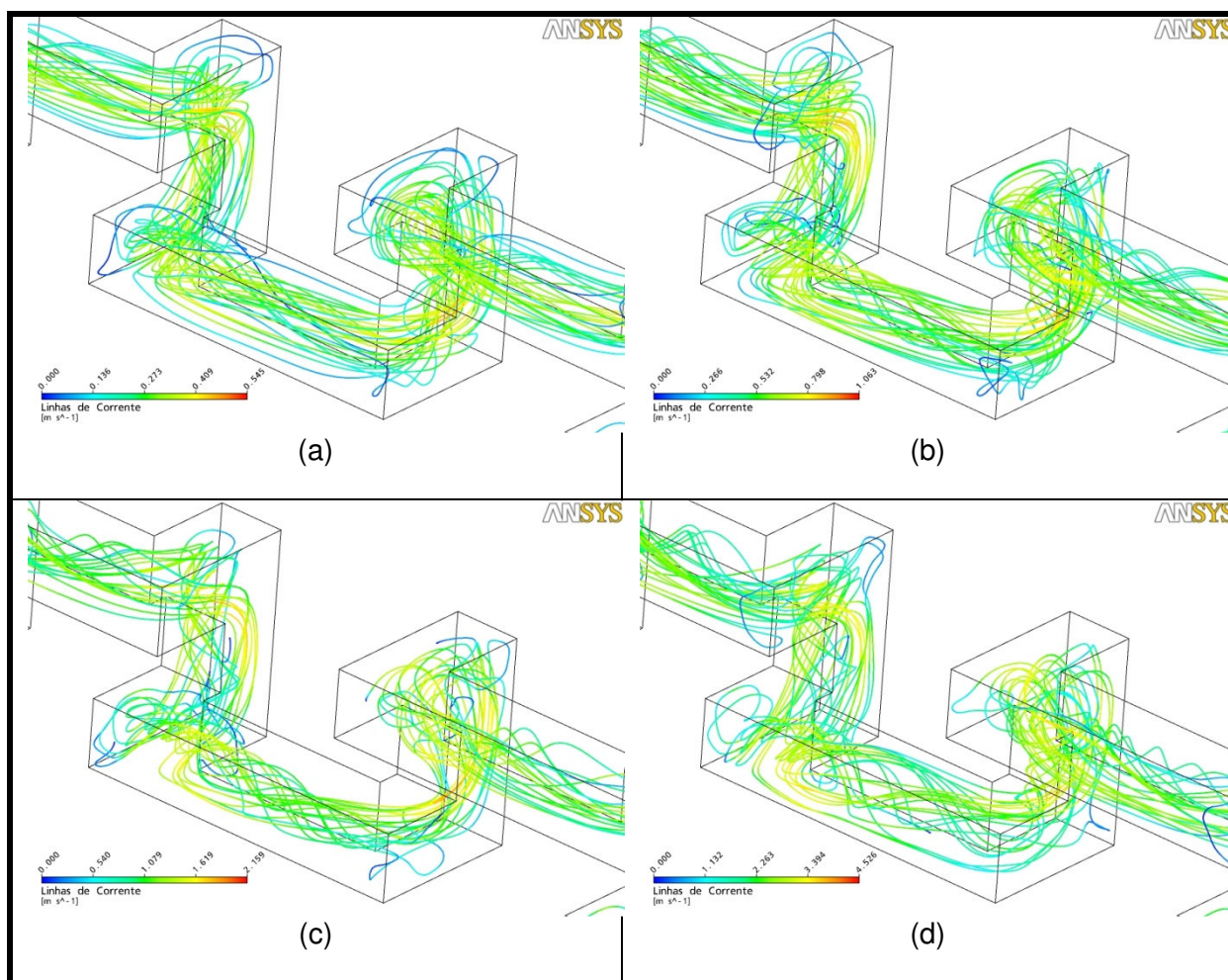


Figura 102 - Linhas de corrente de velocidade para o micromisturador M3 para as diferentes vazões.

Como esperado, quanto maior a vazão maior a velocidade no interior do micromisturador. Tem-se velocidades na faixa de 0,54 m.s⁻¹ a 4,53 m.s⁻¹, mantendo a mesma proporção entre as vazões. As velocidades máximas do micromisturador M3 são superiores às dos micromisturadores M1 e M2.

Comparando com as linhas de corrente apresentadas pelos micromisturadores M1 e M2, aparentemente, o micromisturador M3 apresenta um maior quantidade de linhas, as quais apresentam uma velocidade baixa, restringindo-se às duas faixas iniciais da legenda.

Para mostrar o escoamento secundário que surge no interior do micromisturador são apresentadas as projeções tangenciais dos vetores velocidades para 6 planos distintos no interior do micromisturador M3, para as quatro vazões simuladas nas Figuras 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113 e 114.

Os planos utilizados para demonstrar a componente transversal da velocidade no interior do micromisturador M3 estão localizados em regiões próximos a mudança de direção e por esta razão algumas aparentam não possuírem a parede na região inferior, a qual poderia ser identificada por vetores de pequena magnitude.

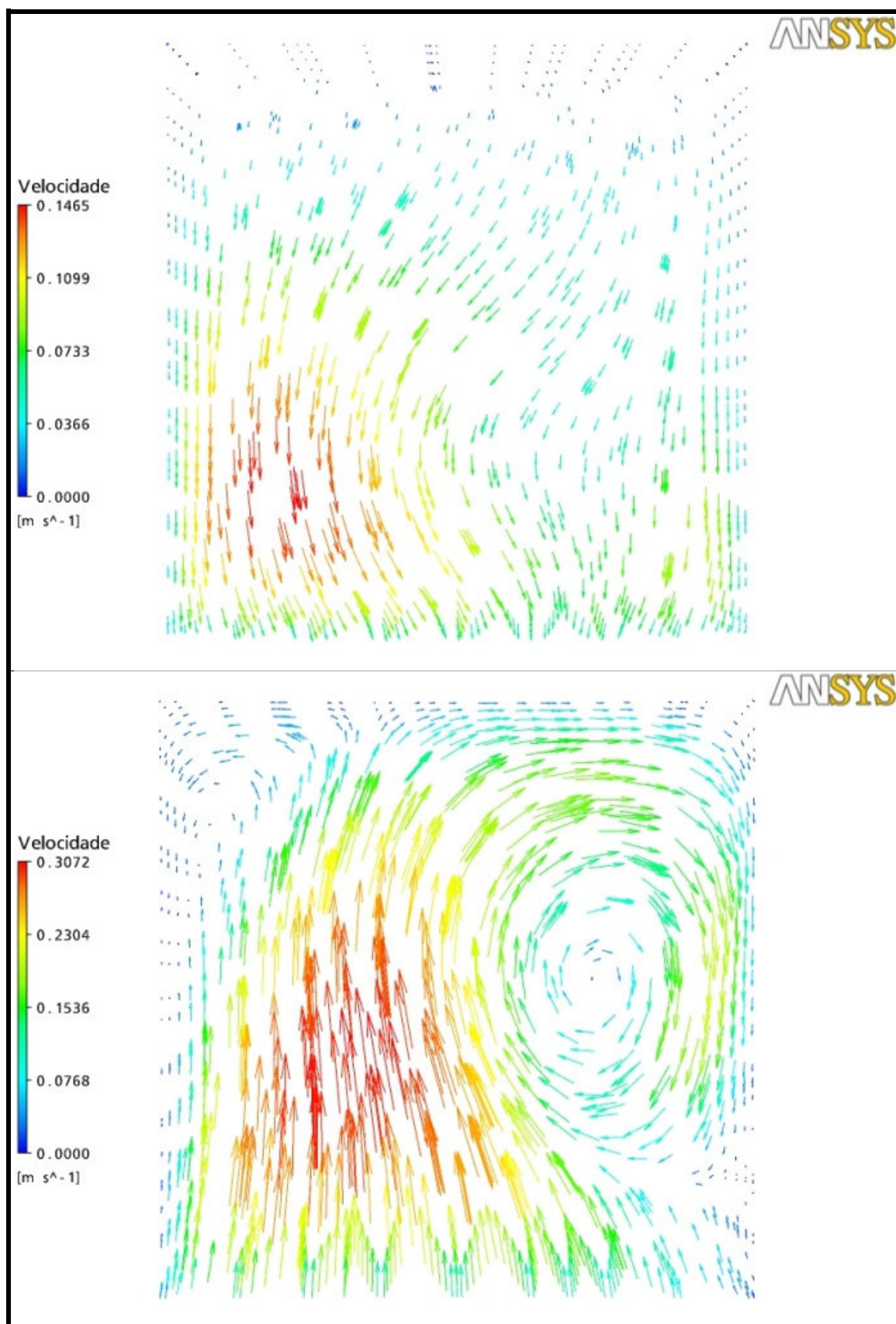


Figura 103 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M3 com vazão 4,5 ml/min.

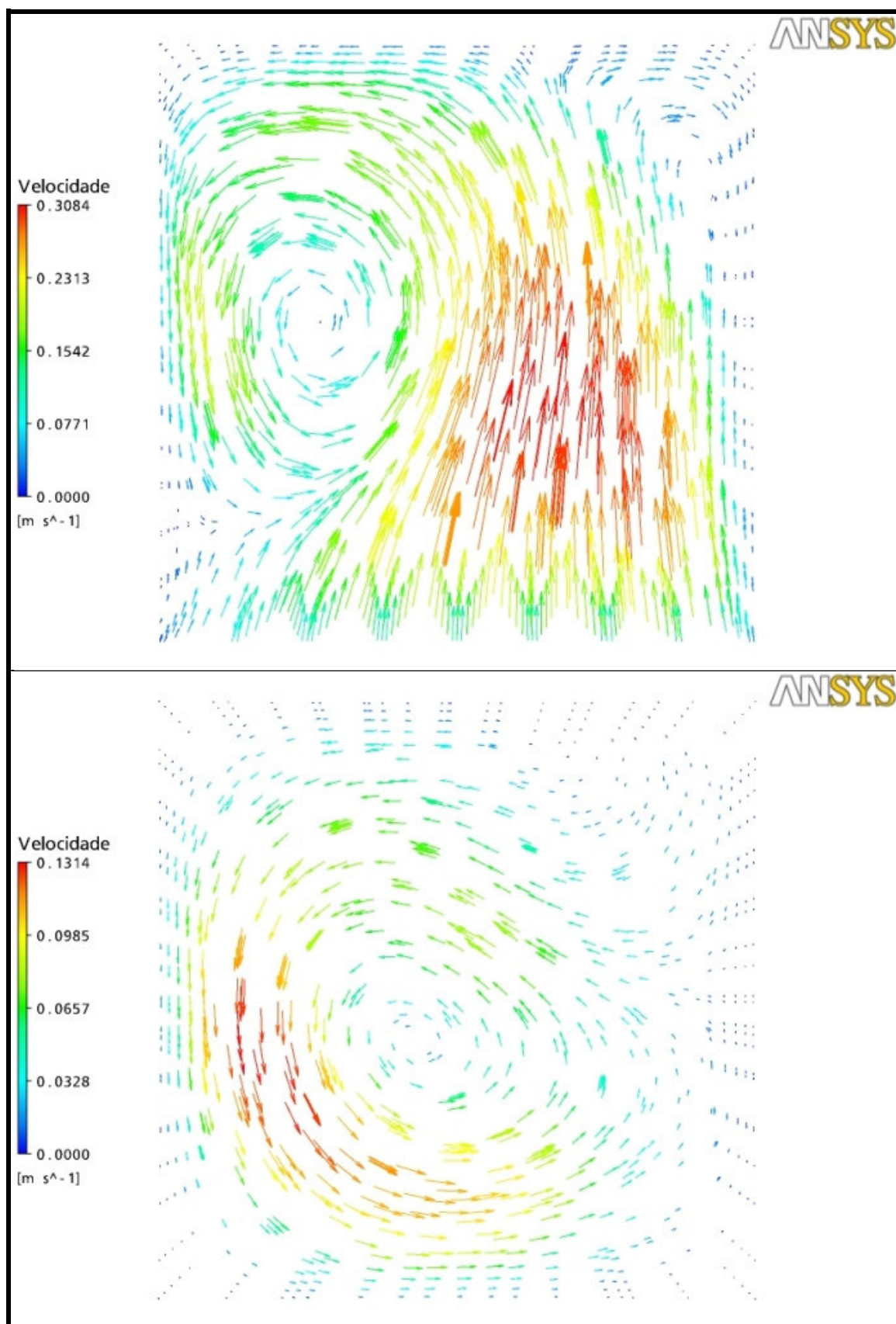


Figura 104 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M3 com vazão 4,5 ml/min (Continuação).

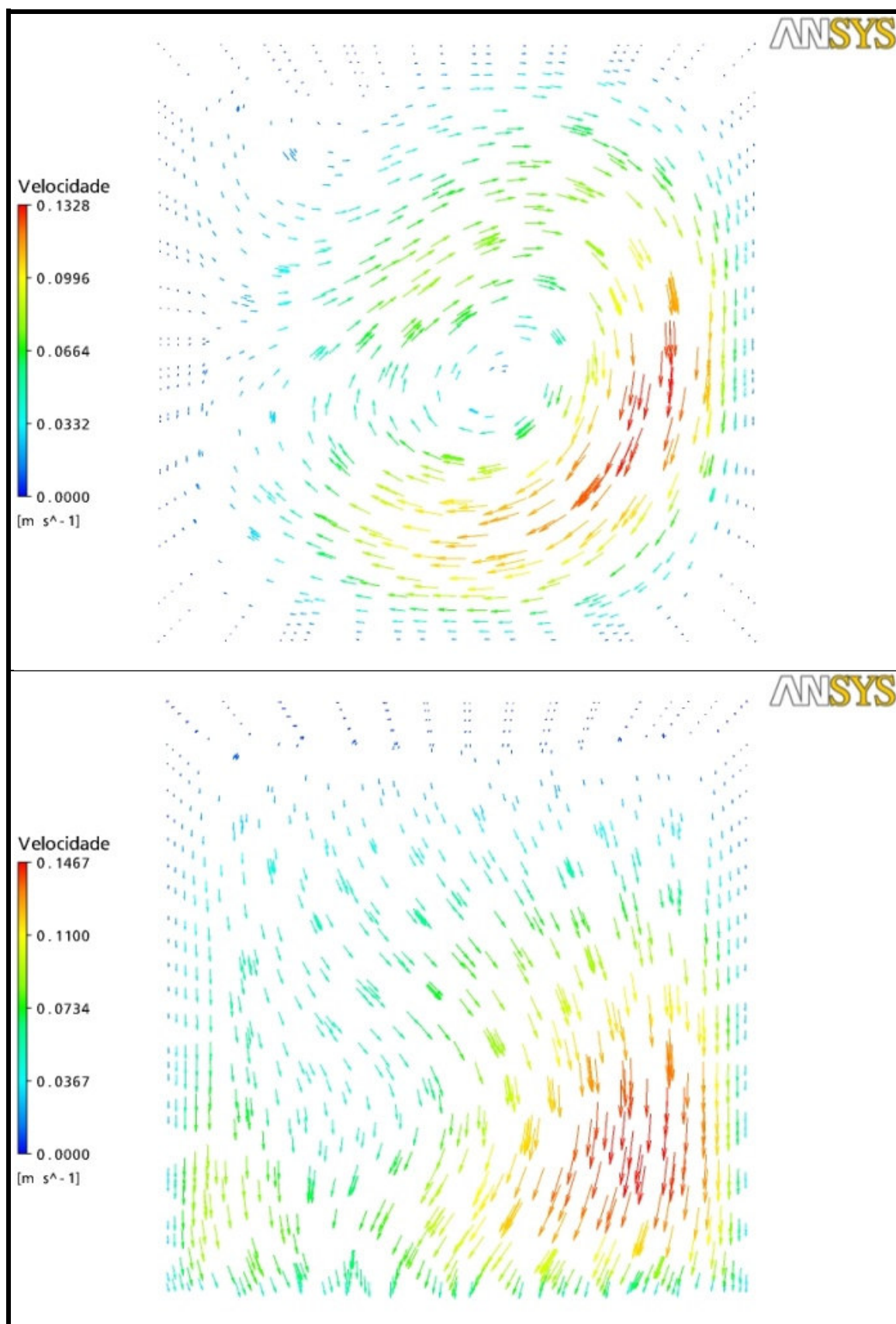


Figura 105 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M3 com vazão 4,5 ml/min (Continuação).

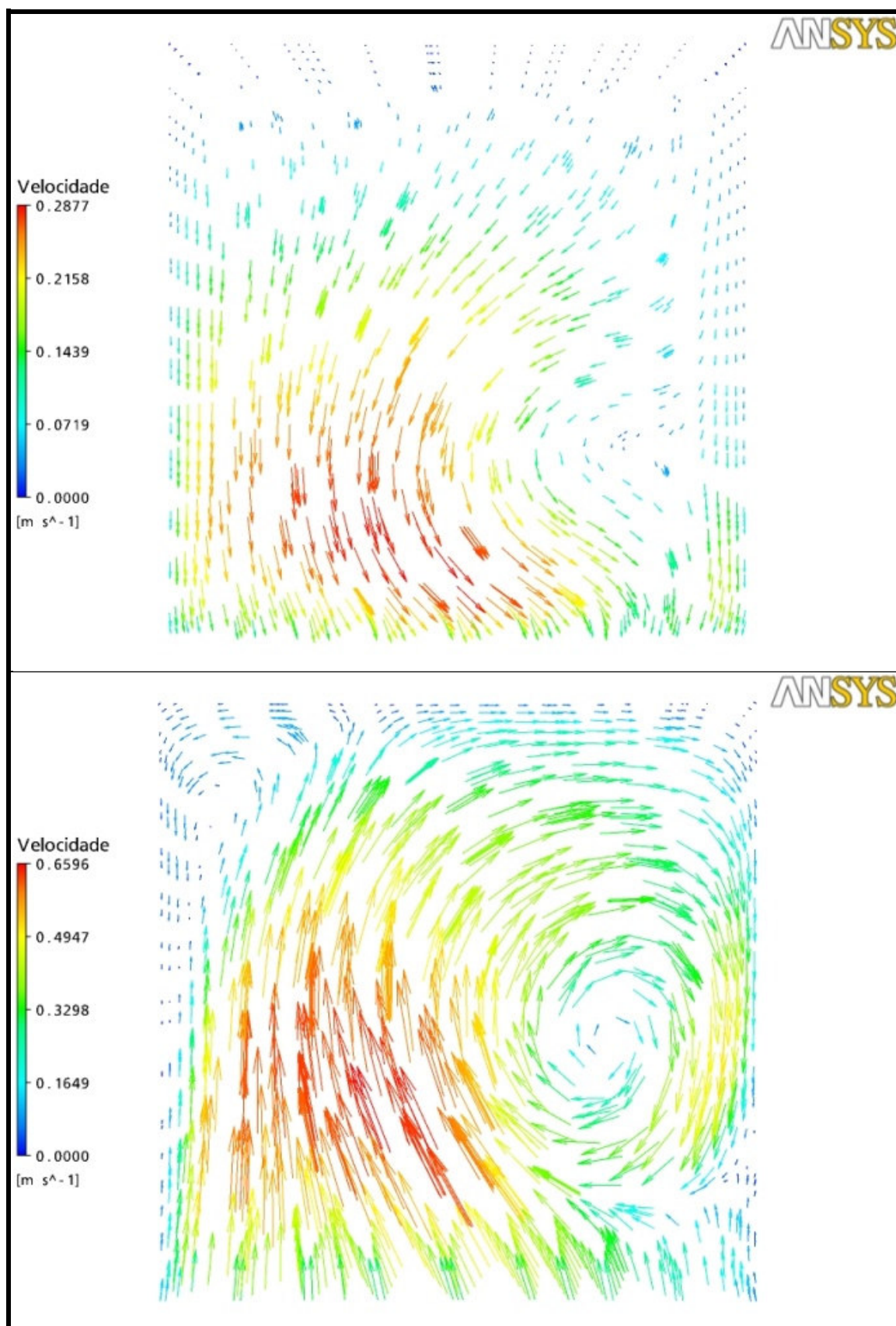


Figura 106 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M3 com vazão 9 ml/min.

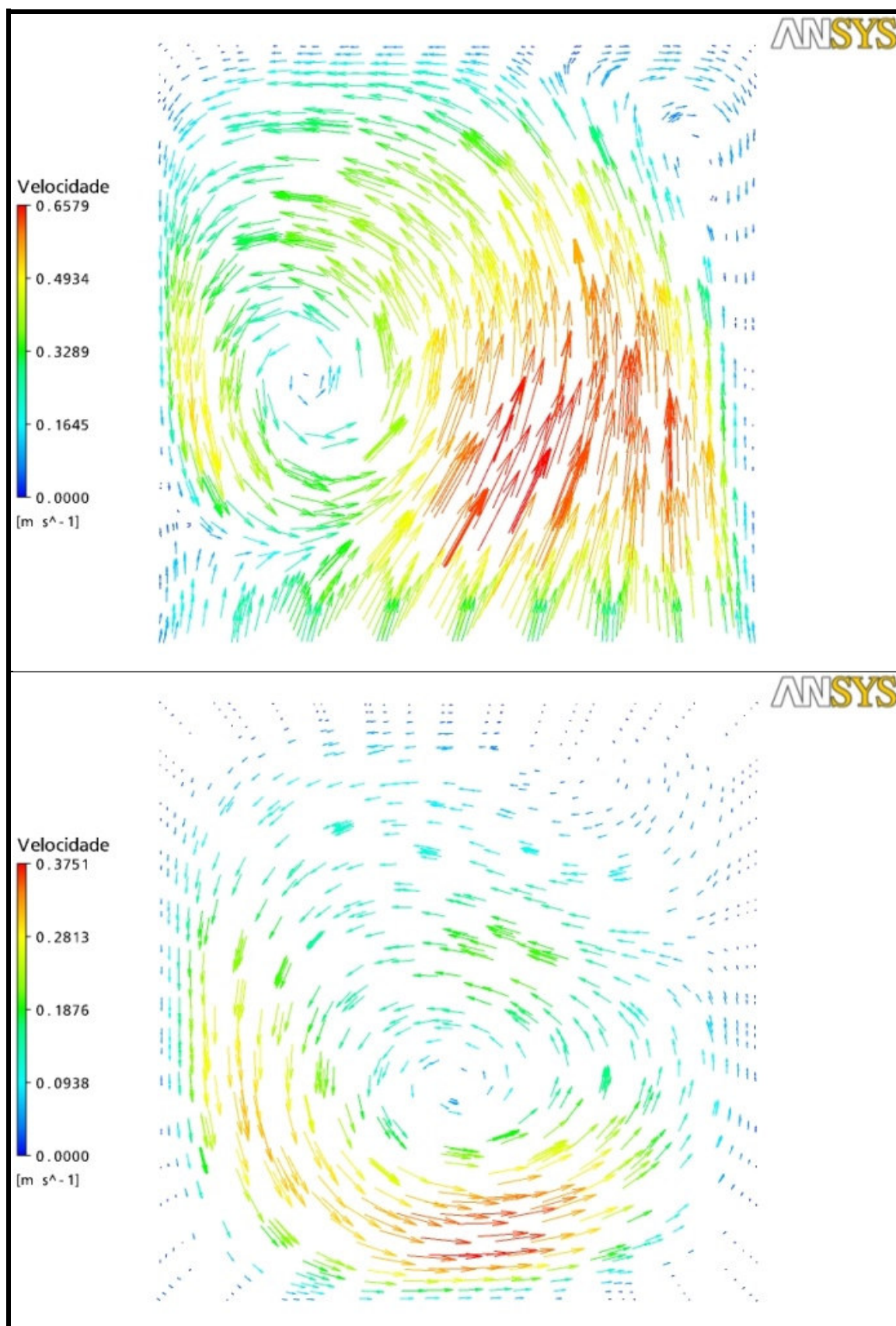


Figura 107 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M3 com vazão 9 ml/min (Continuação).

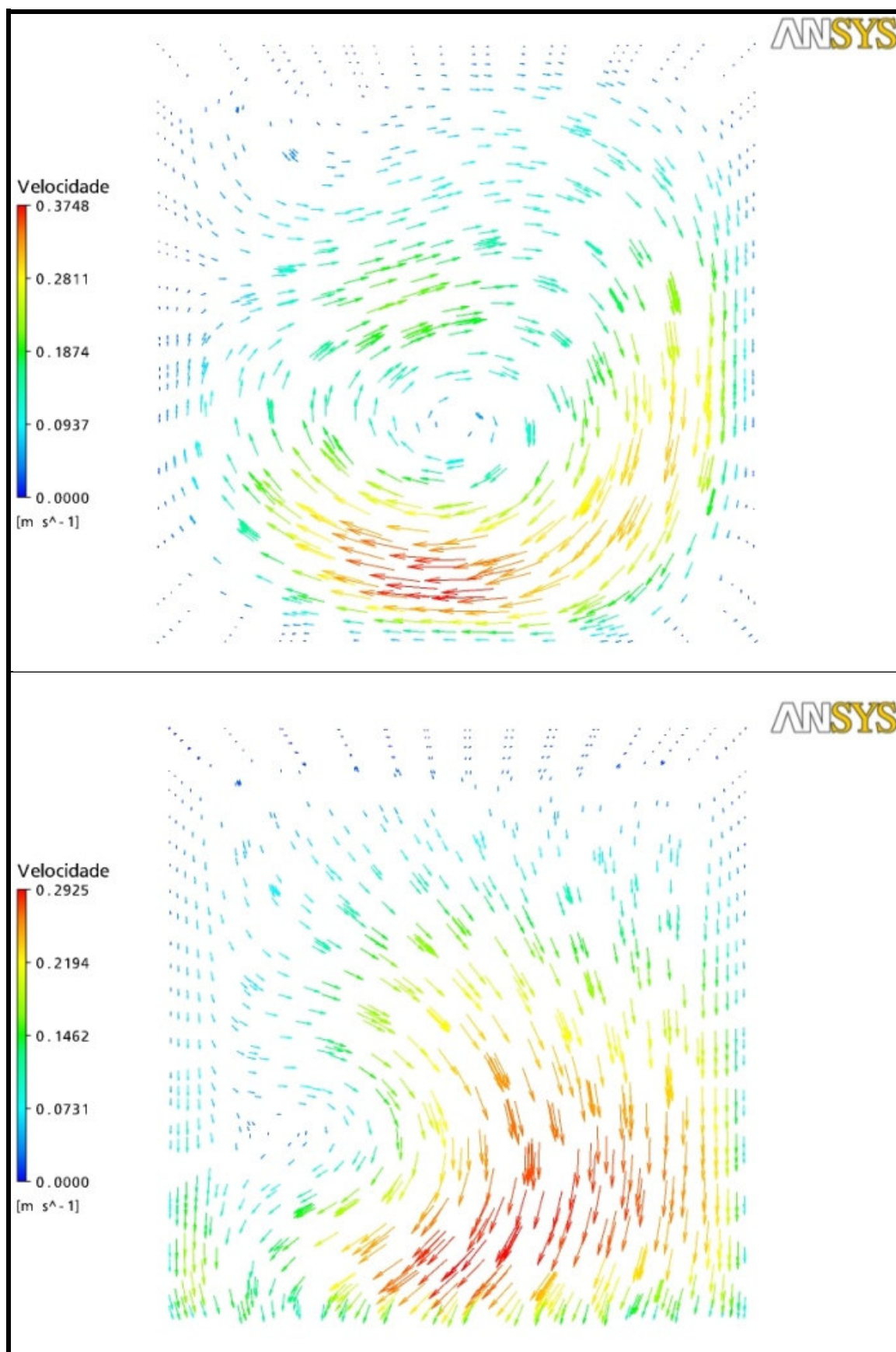


Figura 108 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M3 com vazão 9 ml/min (Continuação).

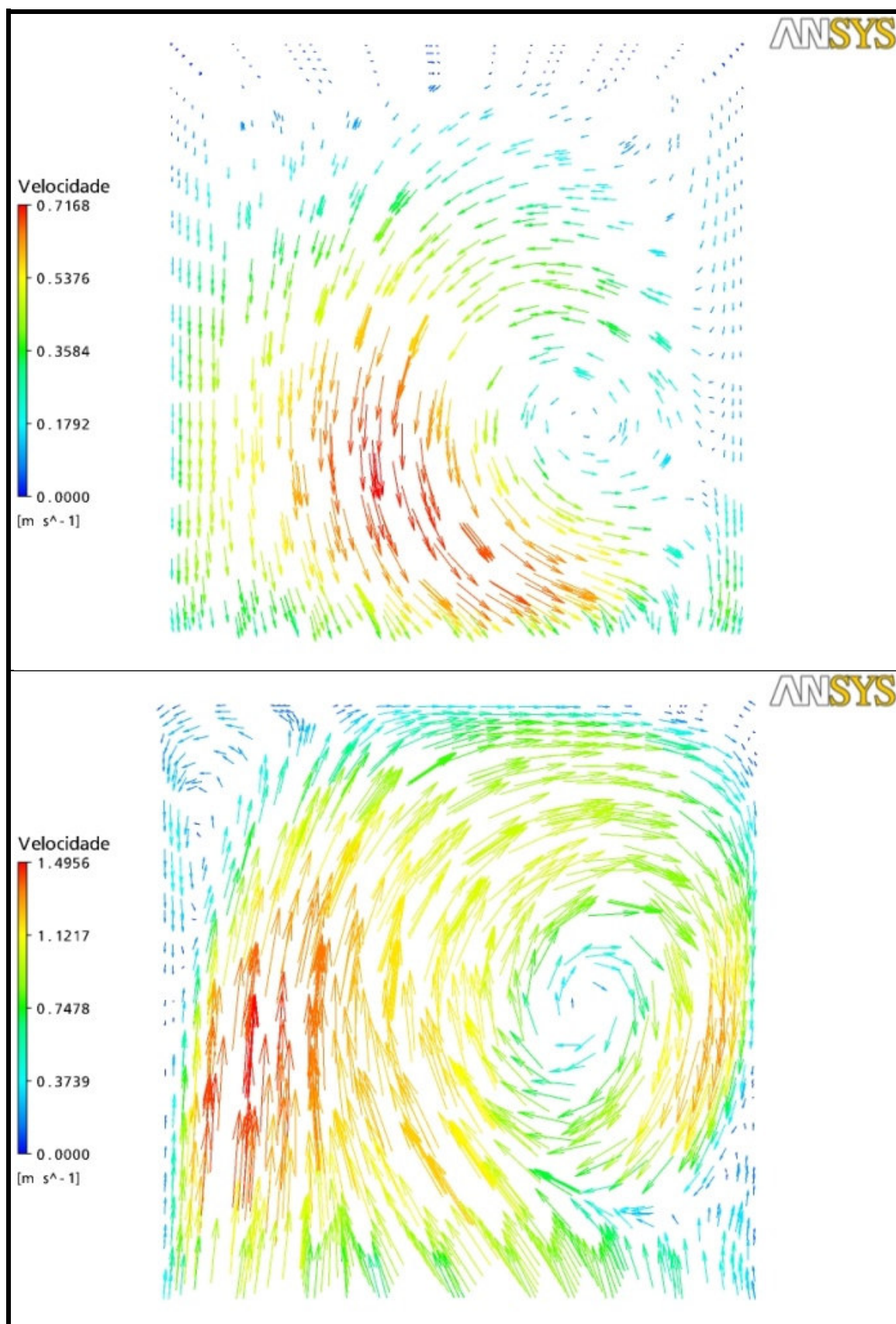


Figura 109 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M3 com vazão 18 ml/min.

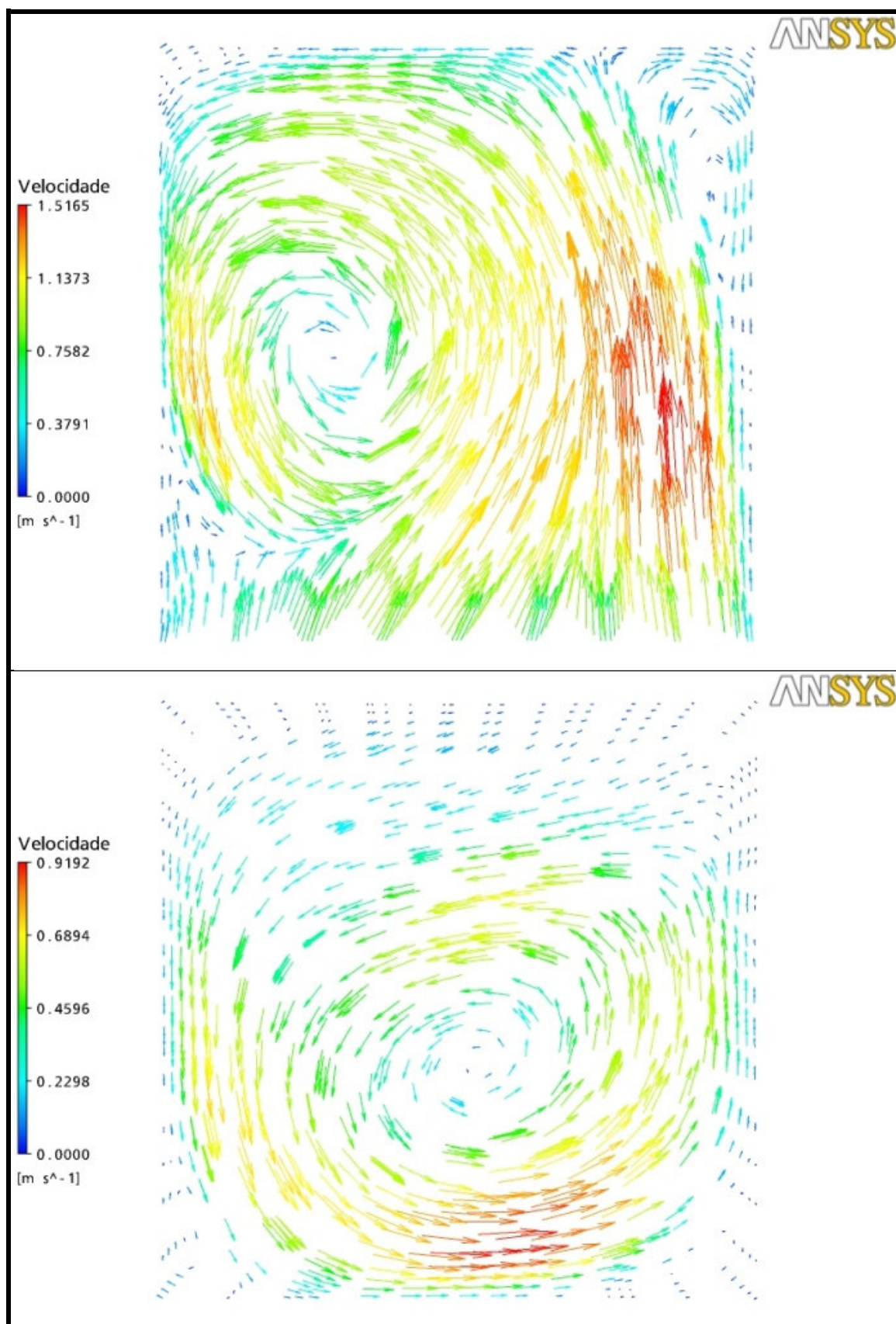


Figura 110 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M3 com vazão 18 ml/min (Continuação).

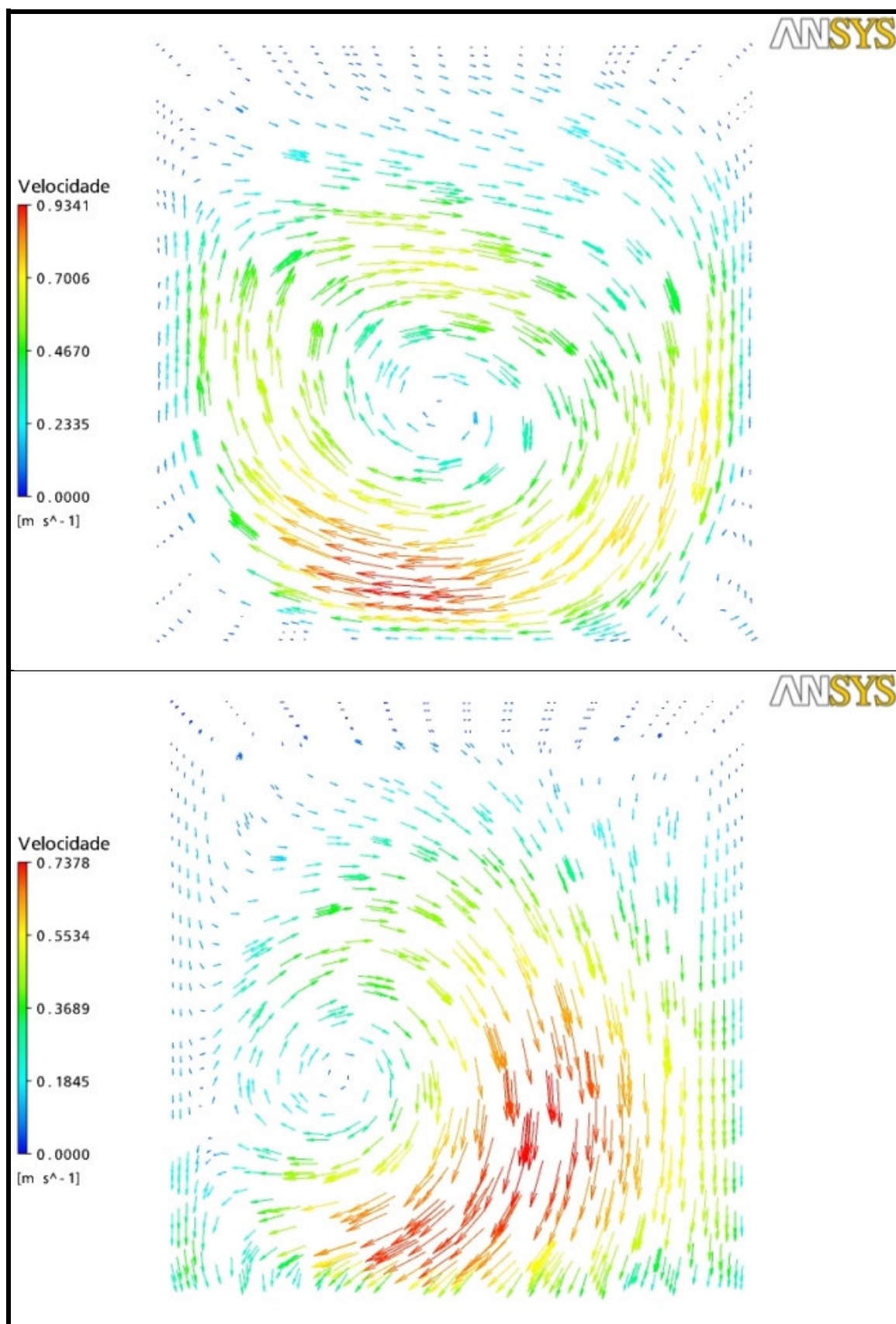


Figura 111 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M3 com vazão 18 ml/min (Continuação).

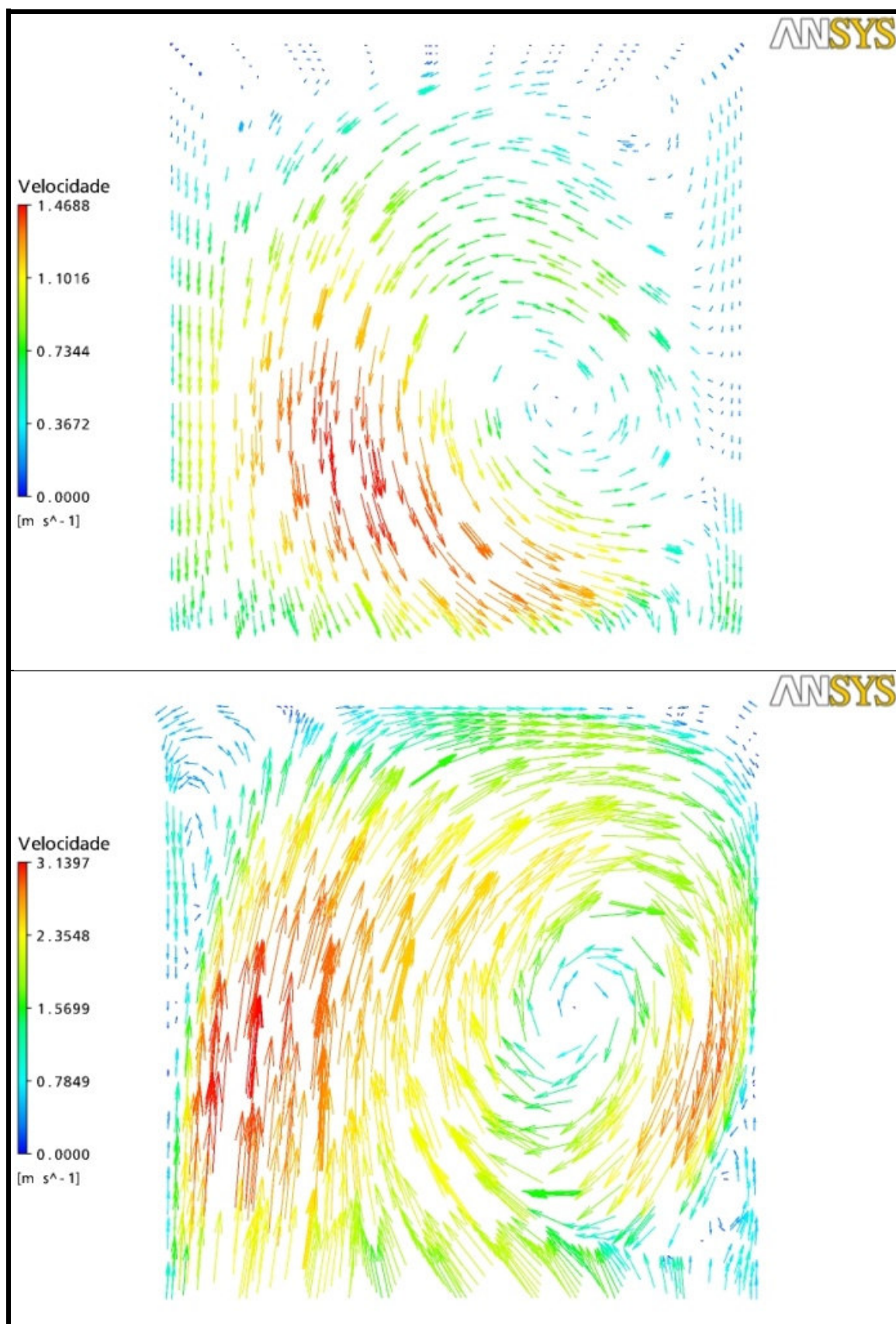


Figura 112 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M3 com vazão 36 ml/min.

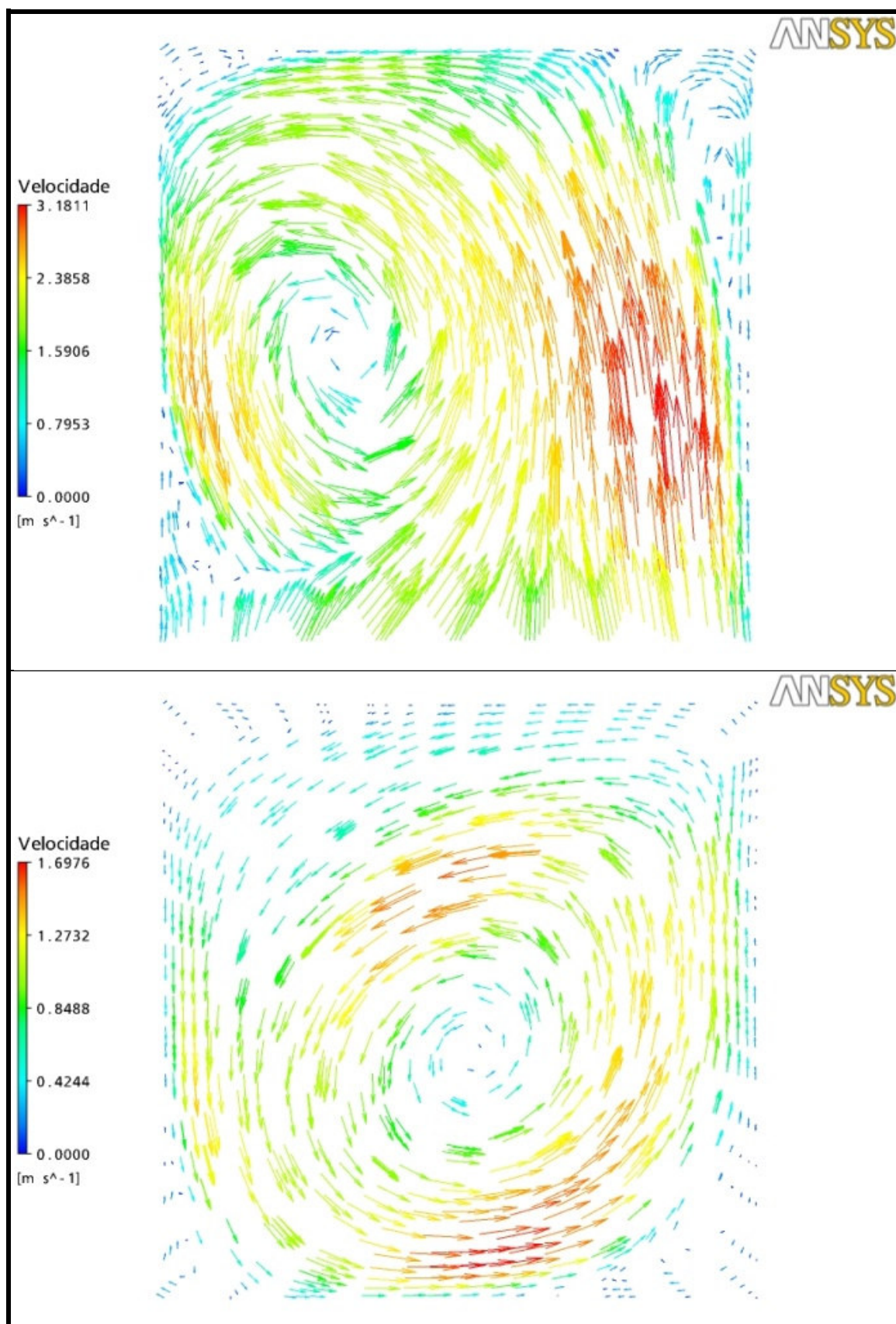


Figura 113 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M3 com vazão 36 ml/min (Continuação).

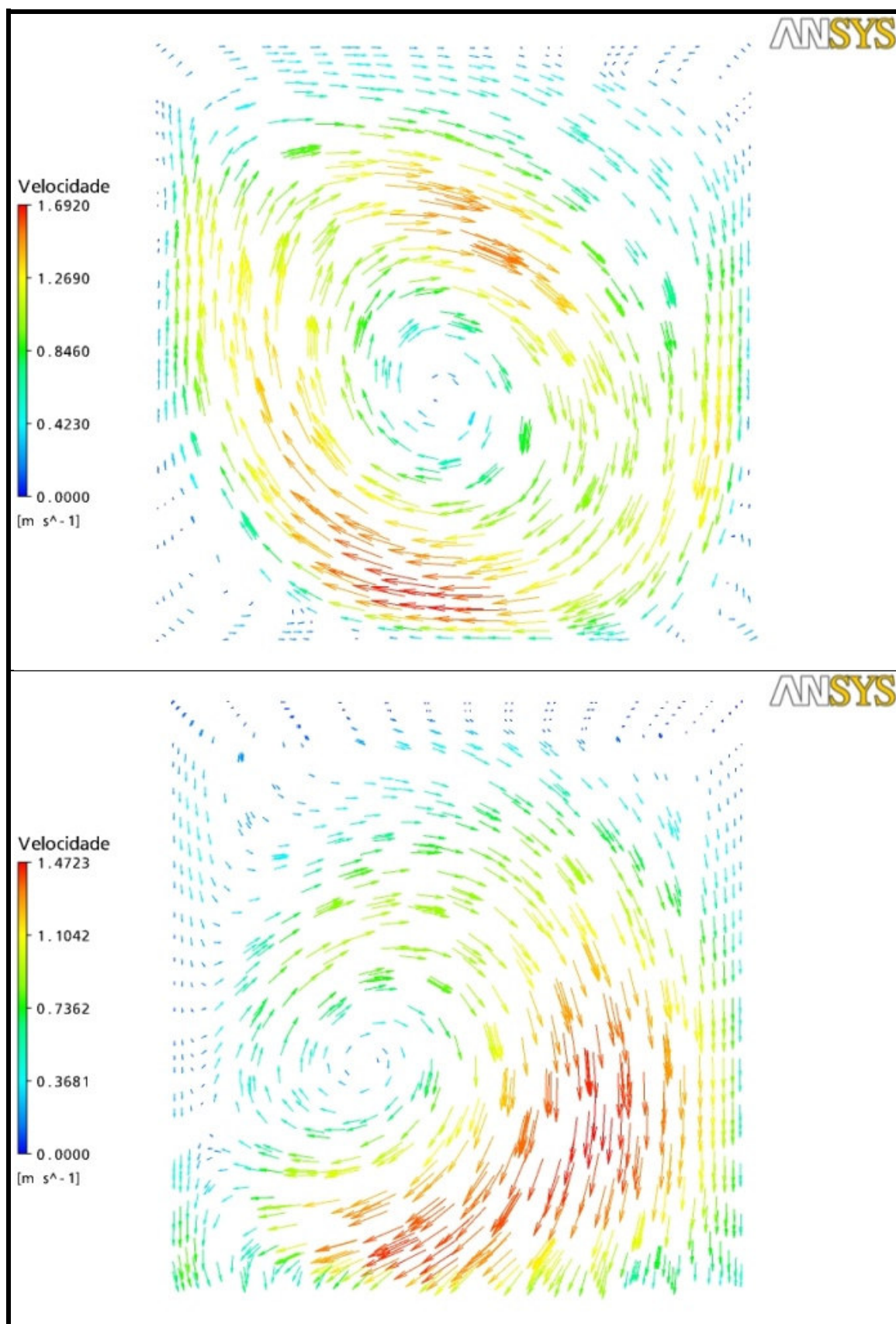


Figura 114 - Projeção dos vetores velocidade em diferentes seções transversais no interior do micromisturador M3 com vazão 36 ml/min (Continuação).

Para todas as vazões é verificado que o escoamento não é simétrico e um único vórtice surge no interior do micromisturador, e pela evolução do escoamento nota-se que a maior velocidade se desloca ao longo do micromisturador. Outra característica do escoamento que surge no interior do micromisturador M3 é que a intensidade do escoamento secundário ao longo do micromisturador não é constante, as velocidades aumentam e diminuem enquanto o fluido percorre o micromisturador.

Contudo, o escoamento secundário que surge é proporcional à vazão, quanto maior a velocidade axial do escoamento, maior a velocidade máxima do vórtice que surge no escoamento secundário, mantendo a mesma proporção, conforme a vazão dobra a velocidade máxima também dobra.

Portanto, assim como no micromisturador M1 e M2, existem evidências de que há ocorrência de escoamento caótico enquanto o fluido atravessa as regiões com obstáculos que possam perturbar o escoamento laminar.

Nas Figuras 115 (a), (b), (c) e (d) são apresentados os valores médios da velocidade ao longo do micromisturador. Ao contrário do que era esperado, de que as velocidades seriam constantes ao longo do micromisturador, verifica-se que ocorrem oscilações da velocidade média ao longo do micromisturador evidenciando a necessidade de refinamento da malha. Observa-se que a malha sendo grosseira não é capaz de prever corretamente o perfil de velocidade.

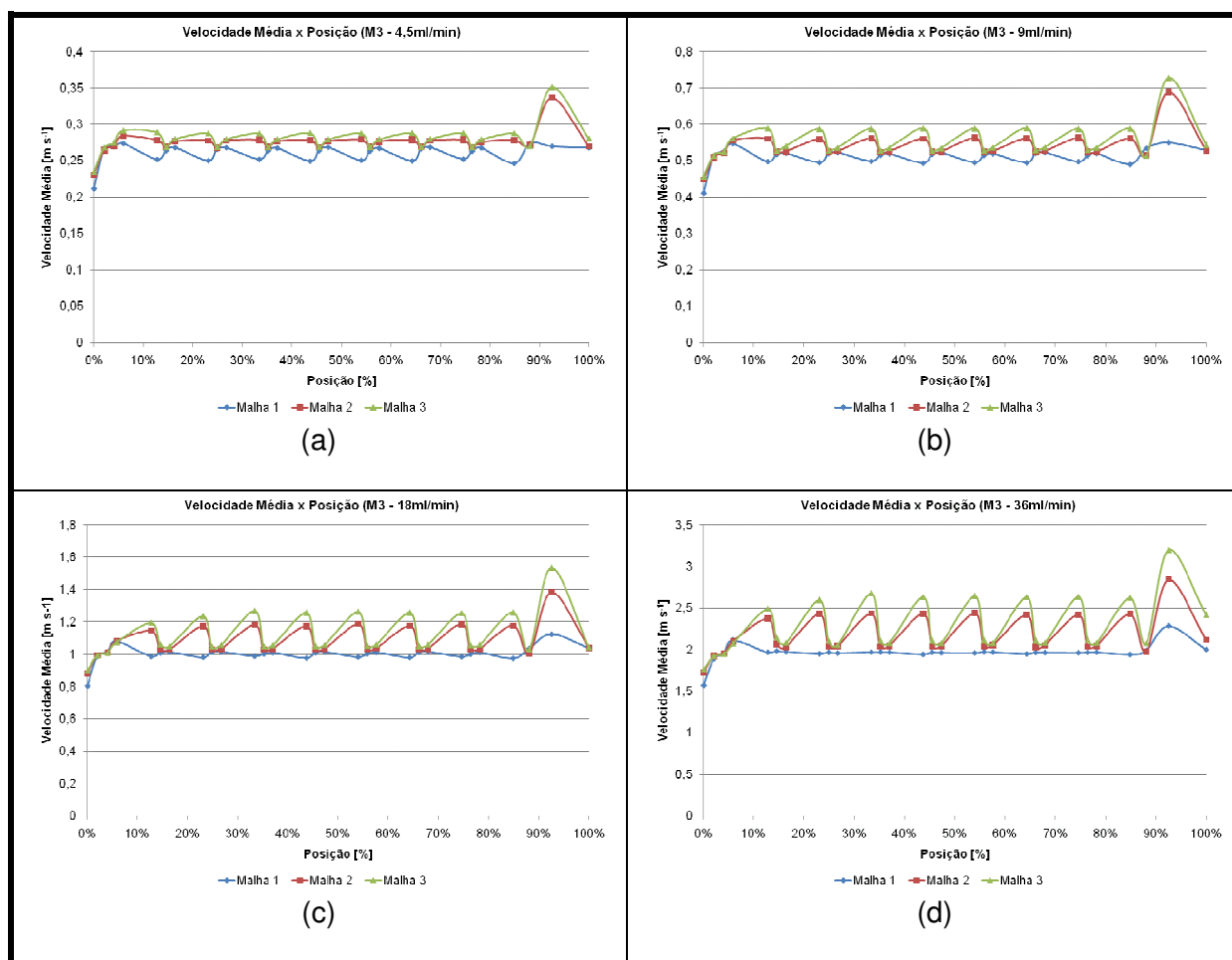


Figura 115 - Velocidade média em função da posição ao longo do micromisturador M3 para as diferentes vazões com diferentes malhas.

Na Figura 116 observa-se que o micromisturador com a vazão de 4,5 ml/min, apresenta uma velocidade média praticamente constante ao longo do micromisturador. Já o de vazão 36 ml/min é o que possui o maior grau de variação no interior do mesmo, portanto, quanto maior a vazão, maior a necessidade de refinamento da malha.

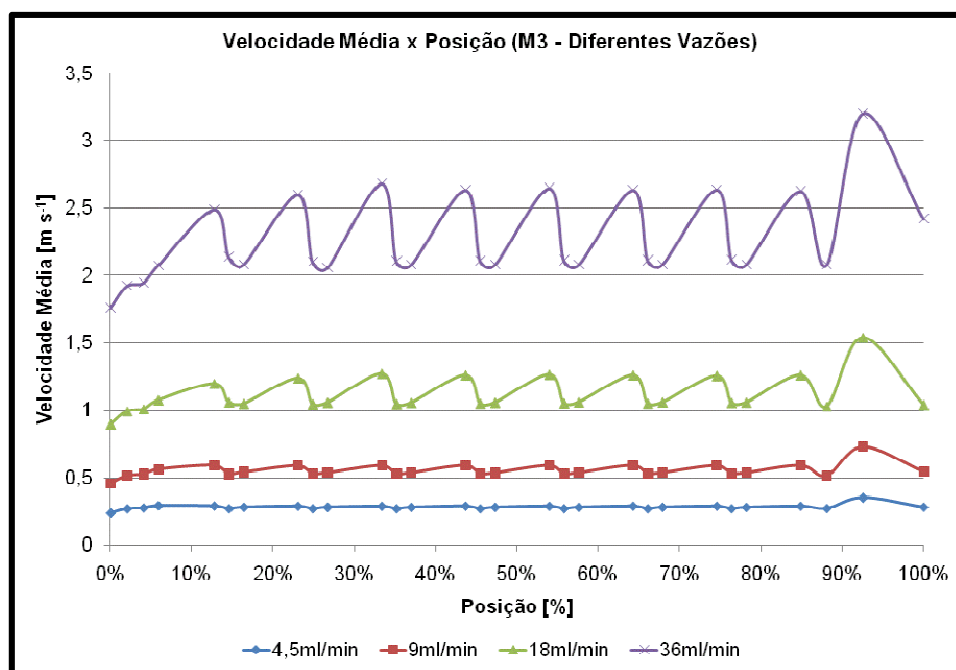


Figura 116 - Comparativo da velocidade média para as malhas mais refinadas do micromisturador M3 nas diferentes vazões.

Deve-se ressaltar que o efeito, o qual ocorre nas vistas dos vetores velocidade, pode estar sendo introduzido no cálculo da velocidade média em função da posição em que o plano para este fim foi tomado no interior do micromisturador. Ou seja, este plano pode estar localizado em uma posição de mudança de direção do escoamento podendo levar a falsas conclusões.

5.3.4 Perda de Carga de M3

Foi identificado anteriormente que o perfil de pressão obtido foi fortemente influenciado pelo grau de refinamento da malha para as maiores vazões e, portanto, para a maior vazão deve-se utilizar o valor da malha mais refinada, para fins comparativos entre os micromisturadores. Pela Figura 117, há um bom ajuste com o perfil parabólico esperado, uma vez que a perda de carga é uma função quadrática da vazão.

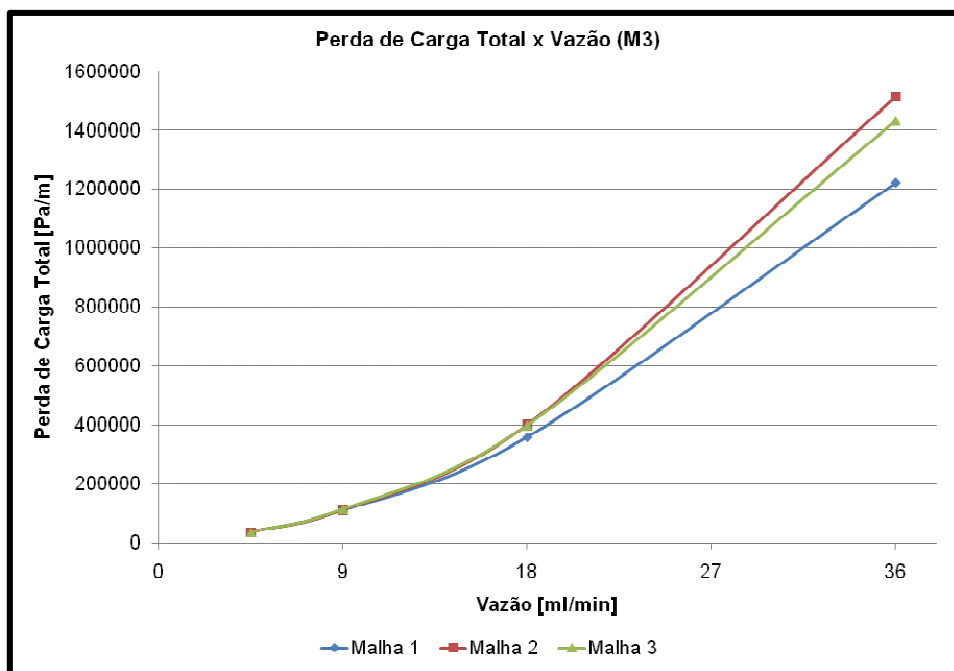


Figura 117 - Perda de carga do micromisturador M3 para as diferentes vazões com diferentes malhas.

5.4 COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO

Algumas comparações foram realizadas com respeito à qualidade de mistura, perfil de pressão e perfil de velocidade ao longo dos micromisturadores e também com relação à perda de carga de maneira a identificar àquele que apresenta o melhor desempenho de mistura com a menor perda de carga. Em seguida apresenta-se alguns dos resultados experimentais de Costa (2003) apresentados em Cunha (2007).

5.4.1 Qualidade da Mistura

Nas Figuras 118 (a), (b), (c) e (d) é possível visualizar que para a vazão de 4,5 ml/min tem-se que o micromisturador M1 não é capaz de misturar completamente os dois fluidos, enquanto que os micromisturadores M2 e M3 realizam esta tarefa quando o fluido percorre aproximadamente 50% do comprimento dos respectivos micromisturadores. Para as outras três vazões simuladas os fluidos são completamente misturados, porém, os fluidos sempre devem percorrer uma distância maior no interior do micromisturador M1 para alcançar a mesma qualidade de mistura.

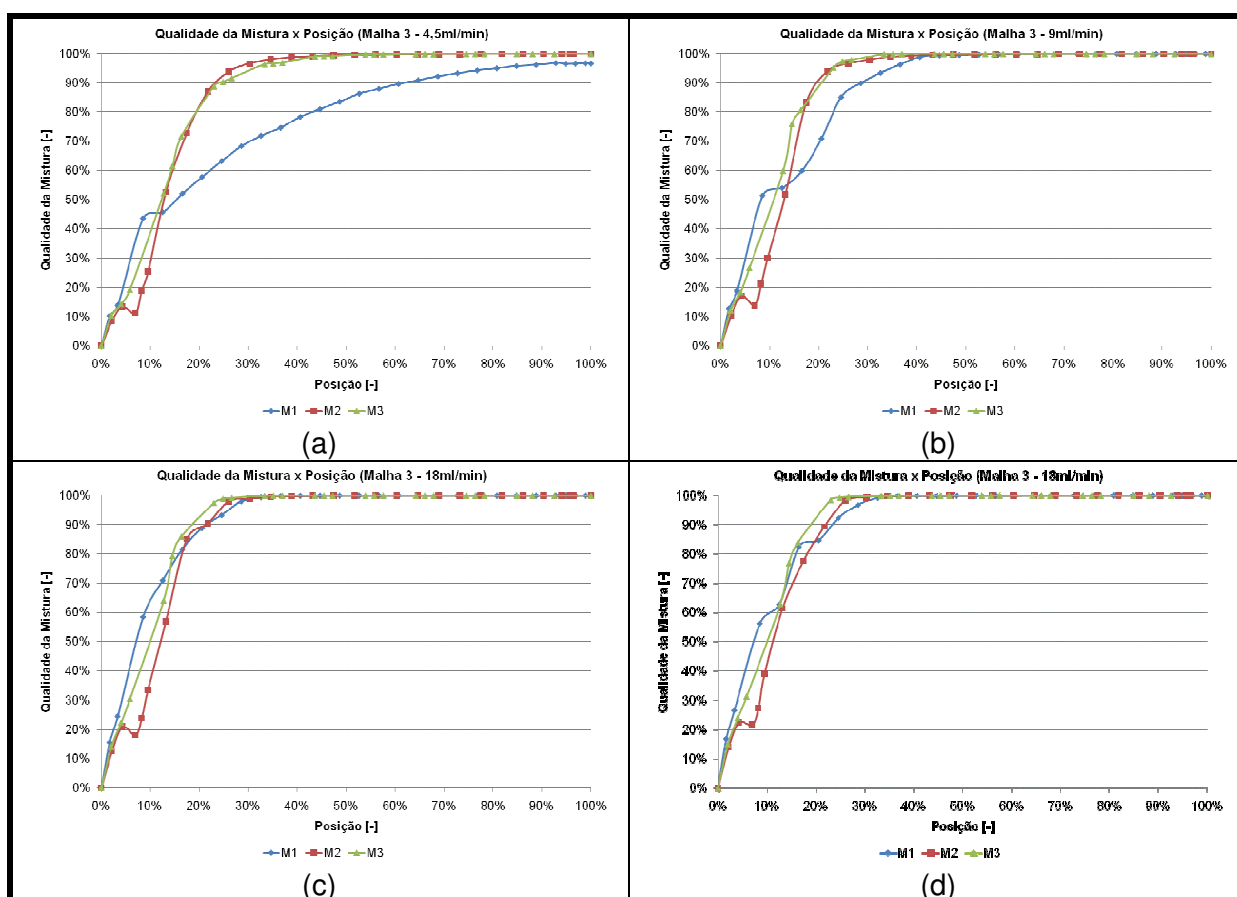


Figura 118 - Comparativo de qualidade de mistura em função da posição para os diferentes micromisturadores para as vazões simuladas.

Com relação aos micromisturadores M2 e M3 é difícil distinguir em qual os fluidos devem percorrer uma distância menor para alcançar a completa mistura, portanto, a característica definitiva para indicar qual o melhor misturador será com o auxílio do valor de perda de carga encontrado.

5.4.2 Perfil de Pressão

Nas Figuras 119 (a), (b), (c) e (d) é possível notar que o micromisturador M1 em todas as condições de operação simulada sempre apresenta os maiores níveis de pressão, e, portanto, quando da fabricação deste equipamento, um maior cuidado deverá ser tomado na escolha dos materiais.

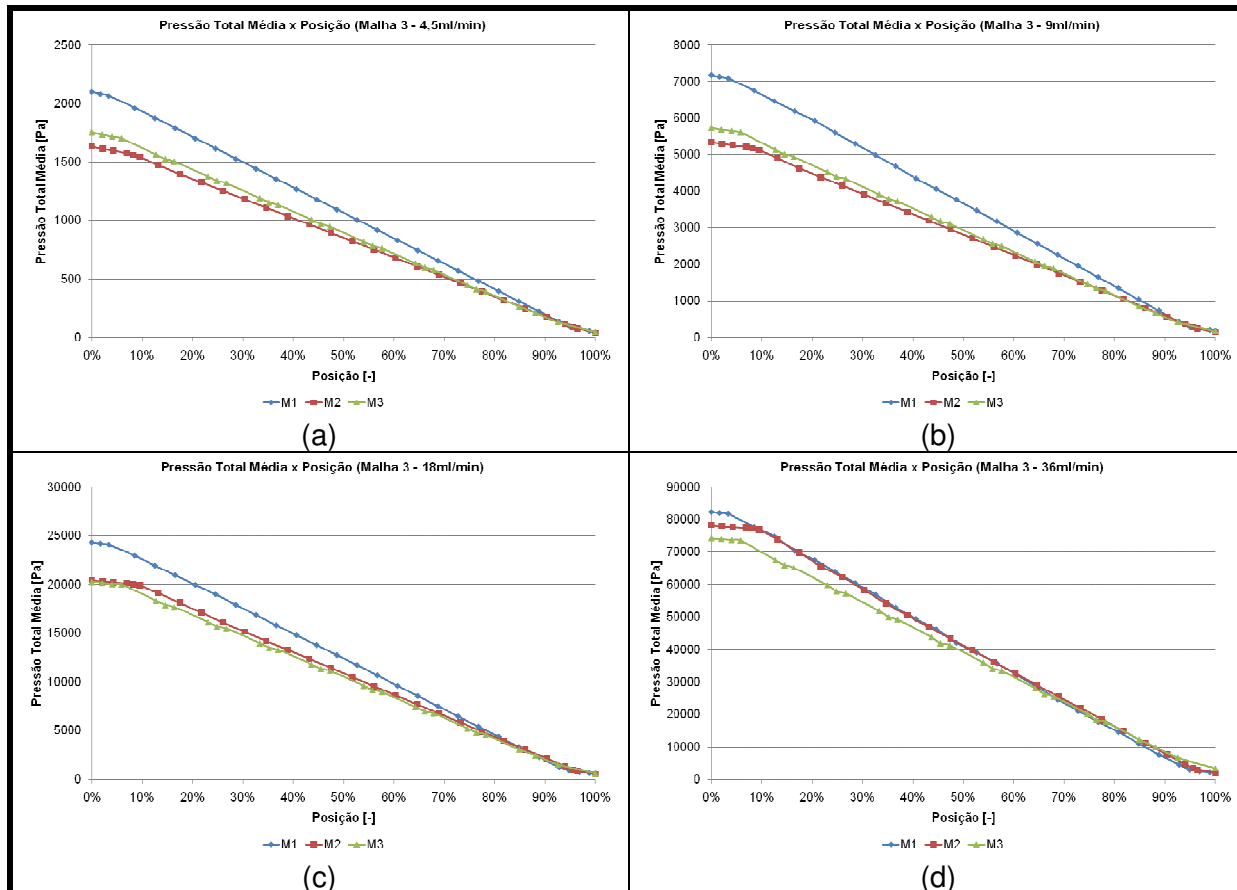


Figura 119 - Comparativo de pressão em função da posição para os diferentes micromisturadores para as vazões simuladas.

Com relação aos micromisturadores M2 e M3, há uma alternância de comportamento, para as duas menores vazões o micromisturador M3 apresenta um maior nível de pressão, enquanto que para as duas maiores vazões os papéis se invertem.

5.4.3 Perfil de Velocidade

As Figuras 120 (a), (b), (c) e (d) demonstram que o micromisturador M1 apresenta um comportamento adverso ao da qualidade da mistura, enquanto que os fluidos devem percorrer uma distância maior em seu interior para alcançar a completa mistura, em todas as condições simuladas ele faz com que os fluidos desenvolvam as maiores velocidade médias, apesar do micromisturador M3 apresentarem as maiores velocidade máximas.

Outro fato relevante é a comparação entre os micromisturadores M2 e M3, que assim como ocorre no perfil de pressão, os maiores valores de velocidade para as vazões mais baixas pertencem ao micromisturador M2 e nas maiores vazões esses papéis se invertem, apesar da velocidade do micromisturador M3 oscilar ao longo do micromisturador.

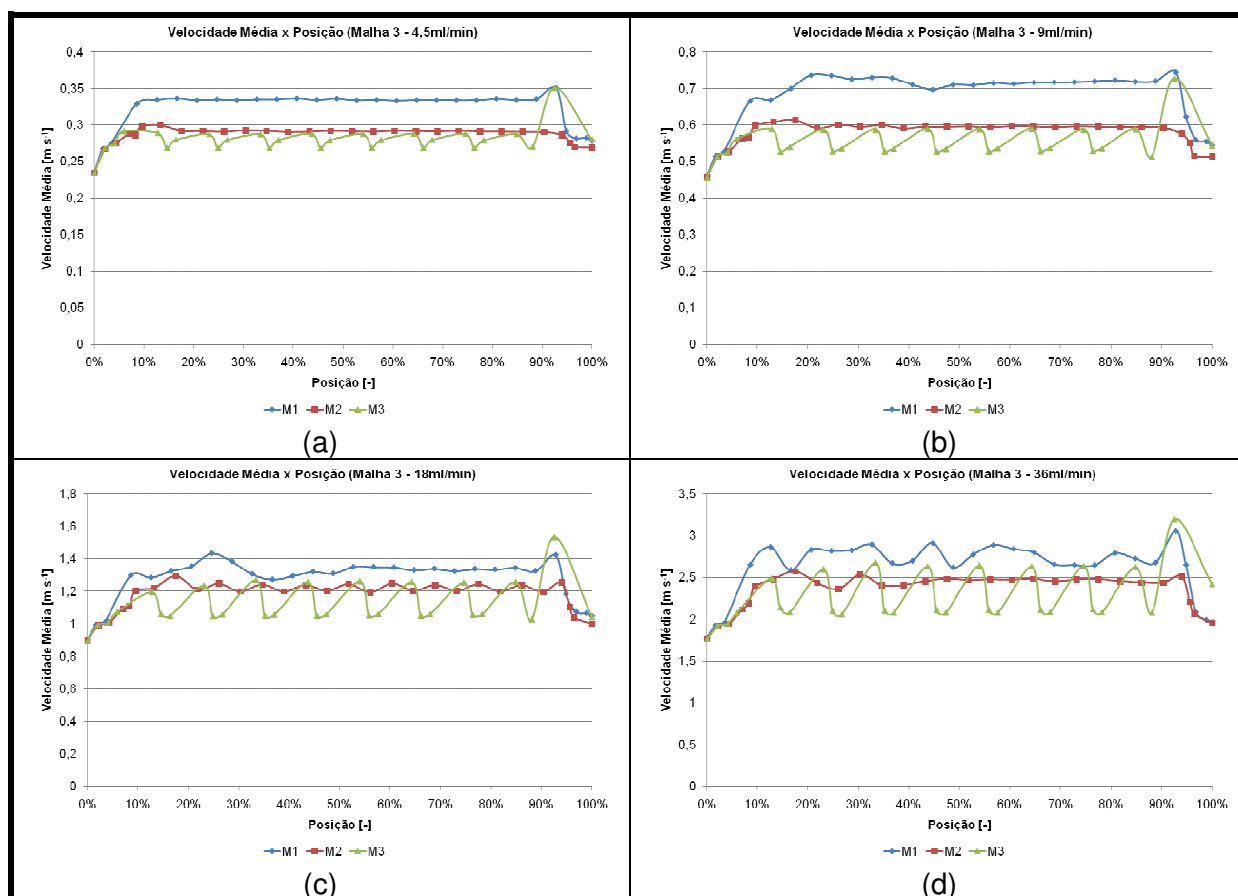


Figura 120 - Comparativo de velocidade em função da posição para os diferentes micromisturadores para as vazões simuladas.

5.4.4 Perda de Carga

Como os micromisturadores simulados não apresentam o mesmo comprimento efetivo, para comparar as perdas de carga envolvidas, que além de ajudarem o fluido escoar, também fornece a energia necessária para a mistura entre os dois fluidos, deve-se dividir a perda de carga total pelo comprimento do micromisturador para se ter o mesmo parâmetro de comparação. Com isso é possível notar na Figura 121 que os micromisturadores que apresentam a melhor eficiência de mistura também apresentam as maiores perdas de carga.

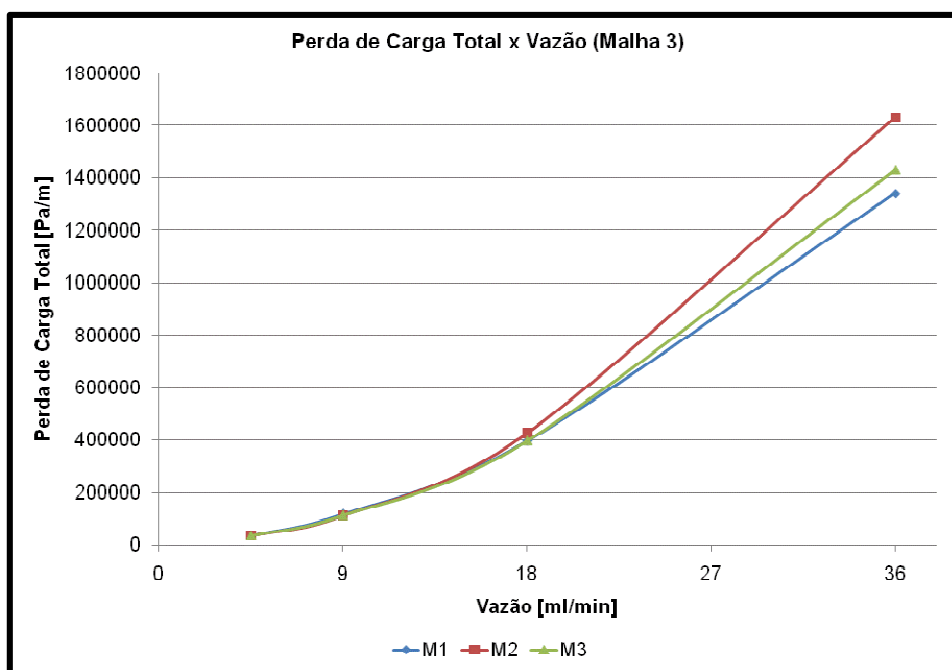


Figura 121 - Comparativo de perda de carga para os diferentes micromisturadores para as vazões simuladas.

Os micromisturadores M2 e M3 apresentam a maior perda de carga para o escoamento dos fluidos em todas as vazões.

5.4.4.1 Fator de Atrito

Uma das maneiras encontradas para validar as simulações computacionais realizadas para os micromisturadores foi fazer o levantamento de um parâmetro conhecido como fator de atrito.

Uma vez que o comprimento equivalente das curvas e cotovelos para as dimensões do micromisturador são desconhecidas, a validação do fator de atrito foi realizada pela simulação de um trecho reto com seção quadrada com mesmas dimensões da seção transversal dos micromisturadores M1, M2 e M3 e com 1200 μm de comprimento.

Com relação às vazões adotaram-se os valores de velocidades correspondentes a uma única entrada dos micromisturadores, o que resultou na variação do número de Reynolds na faixa de $60 < Re < 600$, característico de um regime laminar, portanto, sendo válida a aplicação do equacionamento apresentado no item 2.8.

A malha utilizada para estes casos foi a com maior grau de refinamento, porém alterando-se a quantidade de elementos gerados com o comando “inflation”, comando este que gera os elementos próximos a parede. Não sendo utilizada nenhuma camada para a malha A, uma única camada para a malha B e cinco camadas para a malha C.

Uma das premissas adotadas no item 2.8 é de que o escoamento deve estar completamente desenvolvido, o que para o regime laminar em um duto de seção circular, é caracterizado por um perfil parabólico da velocidade no interior do dispositivo. De maneira a garantir tal condição, foram realizadas duas simulações consecutivas para cada malha e vazão.

Com a primeira obteve-se o perfil desenvolvido na saída do microcanal, o mesmo pôde ser exportado e aplicado como condição de contorno da entrada para a segunda simulação.

Para um canal de seção quadrada foi demonstrado no item 2.8 que o valor do número de Poiseuille deve ser em torno de 14,23. Na Figura 122, tem-se a apresentação dos valores calculados para as diferentes malhas aplicadas, pode-se notar que a malha que não possui uma camada de elementos prismáticos próximos às paredes, é a que leva às maiores diferenças do valor teórico.

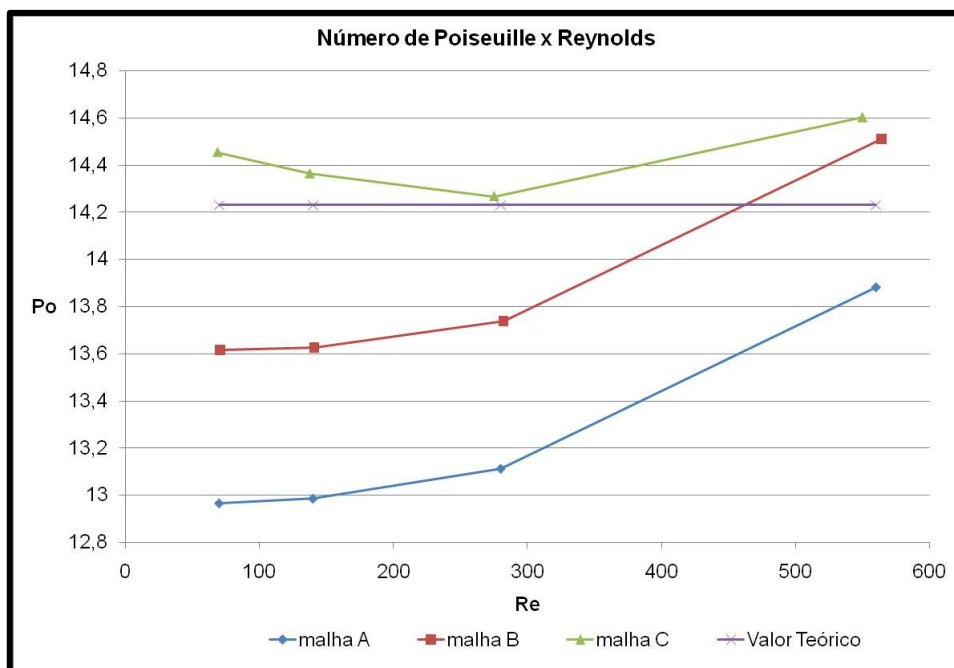


Figura 122 - Número de Poiseuille em função do número de Reynolds para as diferentes malhas.

Na Figura 123 é apresentado o fator de atrito em função do número de Reynolds para os casos simulados, porém não é possível identificar grandes diferenças de valor em função da escala logarítmica, geralmente utilizada para apresentar os resultados.

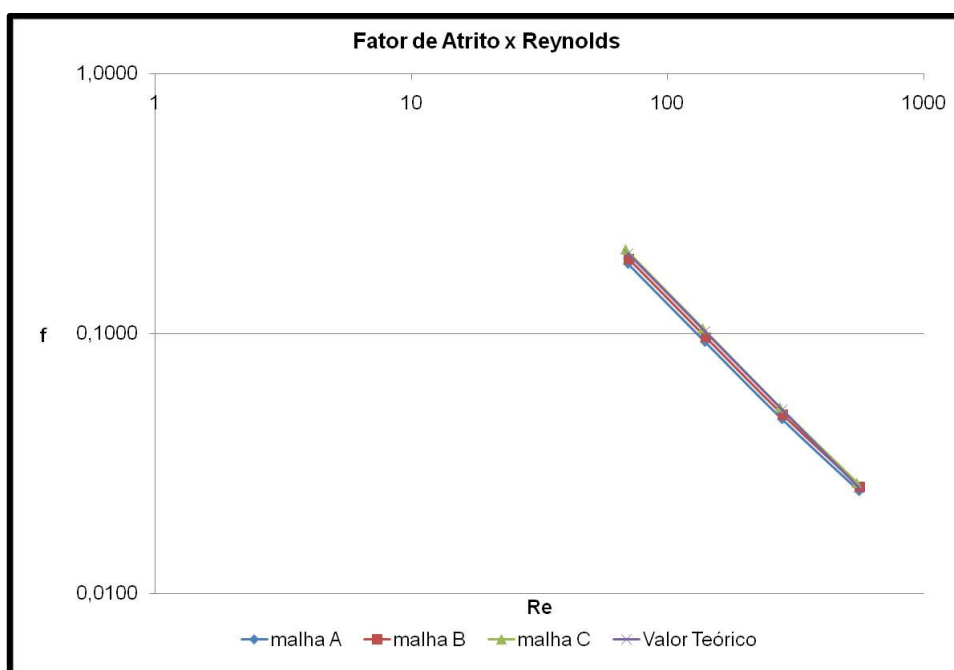


Figura 123 - Fator de atrito em função do número de Reynolds para as diferentes malhas.

Para se apresentar as diferenças reais, fez-se o gráfico apresentado na Figura 124, no qual se tem os desvios dos valores simulados do fator de atrito com relação aos valores teóricos $[f = 14,23/Re]$, os quais foram calculados conforme a definição a seguir:

$$[Erro = ((f_{simulado} - f_{teórico})/f_{teórico}) \times 100]$$

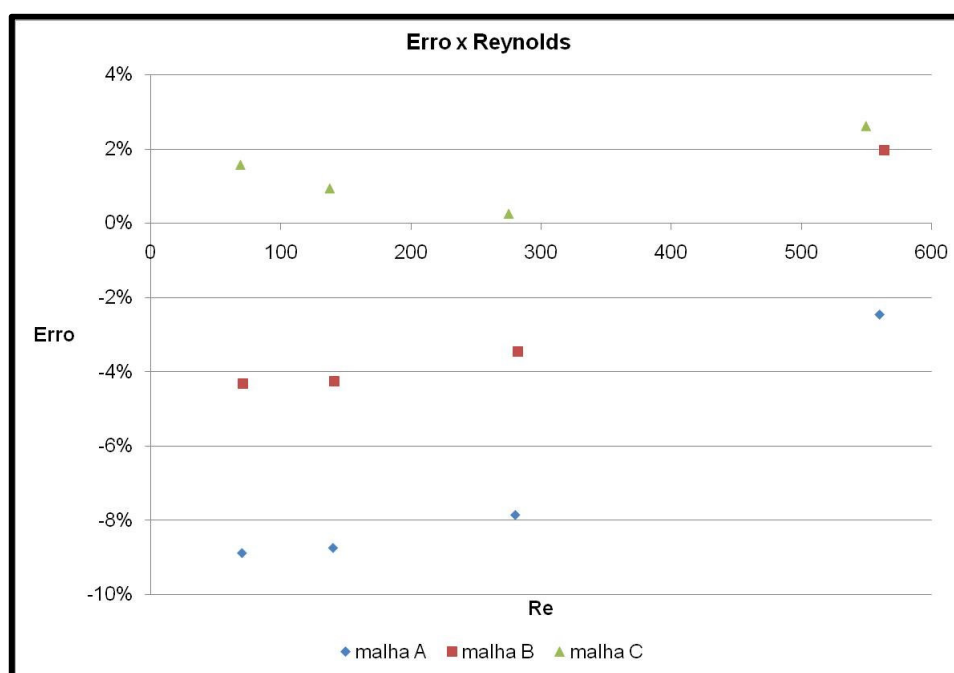


Figura 124 - Desvio do fator de atrito simulado em função do número de Reynolds.

Verifica-se que para a malha A o desvio chega a quase 10% e para a malha C fica na faixa de 3%, porém tendo um mínimo para o número de Reynolds igual a 280. Este fato é indicativo de que diferentes graus de refinamento devem ser utilizados para cada faixa de número de Reynolds.

5.4.4.2 Volume Morto

Com a falta de recursos computacionais que permitiriam a realização das simulações para o levantamento do tempo de residência, foi calculado um parâmetro, o qual será identificado como volume morto, que está relacionado com o volume dos micromisturadores que é ocupado pelos fluidos com velocidade menor do que 1% do valor da velocidade máxima.

Ao se considerar o volume total dos micromisturadores o resultado da diferença dos comprimentos totais deixa de influenciar os resultados.

Verifica-se na Tabela 16 que a tendência é de quanto maior a vazão, ou velocidade máxima, menor é o volume morto para todas as três geometrias.

Quando comparadas as três geometrias identifica-se que o micromisturador M2 é o que apresenta os menores volumes mortos, e, portanto, poderá apresentar o menor tempo de residência médio.

Tabela 16 - Volume morto.

Misturador/ Vazão	Velocidade Máxima m s ⁻¹	1% da Velocidade Máxima m s ⁻¹	Volume do Micromisturador m ³	Volume com V<0,01*Vmax m ³	Percentual de Volume Morto [%]
M1/ 4,5	0,5246	0,00525	2,4876E-08	2,5815E-09	10,3778
M1/ 9	1,1157	0,01116	2,4876E-08	2,1011E-09	8,4463
M1/ 18	2,1312	0,02131	2,4876E-08	1,1865E-09	4,7698
M1/ 36	4,1193	0,04119	2,4876E-08	1,0875E-09	4,3717
M2/ 4,5	0,4638	0,00464	1,9006E-08	9,7390E-10	5,1241
M2/ 9	0,9246	0,00925	1,9006E-08	8,5619E-10	4,5047
M2/ 18	1,8536	0,01854	1,9006E-08	8,0166E-10	4,2178
M2/ 36	3,8238	0,03824	1,9006E-08	7,4737E-10	3,9322
M3/ 4,5	0,5453	0,00545	2,0304E-08	1,1991E-09	5,9060
M3/ 9	1,0635	0,01063	2,0304E-08	1,0194E-09	5,0207
M3/ 18	2,1589	0,02159	2,0304E-08	8,9345E-10	4,4004
M3/ 36	4,5259	0,04526	2,0304E-08	8,5873E-10	4,2295

5.4.5 Apresentação dos Resultados Experimentais

No trabalho de Cunha (2007) são apresentados os resultados reproduzidos na Tabela 17 a respeito da distribuição granulométrica das partículas preparadas utilizando-se os três micromisturadores estudados.

Como podemos visualizar, se o interesse for menor diâmetro de partícula para a vazão de 18 ml/min o micromisturador M2 é o que melhor se aplica, mas para a vazão de 36 ml/min o melhor micromisturador é o M1. Contudo se o enfoque for menor dispersão do valor médio, o micromisturador M3 é o melhor equipamento para a menor vazão e o micromisturador M2 para a maior vazão.

Tabela 17 - Distribuição granulométrica de partículas utilizando os micromisturadores M1, M2 e M3 (CUNHA, 2007).

Dispositivo / Vazão	$d_{(4,3)}$ (μm)	$d_{(w;0,1)}$ (μm)	$d_{(v;0,5)}$ (μm)	$d_{(v;0,9)}$ (μm)	Span
M1/Q18	26,71	8,52	36,06	70,07	1,71
M1/Q36	9,00	1,42	11,15	39,25	3,39
M2/Q18	23,87	8,89	31,25	57,36	1,55
M2/Q36	9,04	1,60	11,47	32,85	2,72
M3/Q18	30,89	15,54	38,65	61,91	1,20
M3/Q36	9,73	1,74	11,65	38,12	3,12

$d_{(4,3)}$ (μm) Diâmetro médio em volume (Diâmetro médio de partícula);

$d_{(v;0,1)}$ (μm) Diâmetro da partícula correspondente a 10% da distribuição acumulada.

$d_{(v;0,5)}$ (μm) Diâmetro da partícula correspondente a 50% da distribuição acumulada.

$d_{(v;0,9)}$ (μm) Diâmetro da partícula correspondente a 90% da distribuição acumulada.

Span Medida indireta da dispersão ou largura da distribuição granulométrica.

Igual a $[d_{(v;0,9)} - d_{(v;0,1)}] / d_{(v;0,5)}$;

O uso de modelos físicos que representassem corretamente as condições operacionais reais, testadas em laboratório, foi restringido pelos recursos computacionais disponíveis, portanto, não foi possível a correta modelagem de um escoamento bifásico como o que ocorre na preparação de emulsões. Contudo, ficam registrados os resultados experimentais levantados por Cunha (2007) e Costa (2003) a cerca da operação dos micromisturadores M1, M2 e M3 para as condições de vazão de alimentação dos reagentes iguais a 18 ml/min e 36 ml/min.