

# OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA DO FUTURO TÚNEL DE VENTO DO IMT VIA CFD

Gabriela Yumi Araki Morimoto <sup>1</sup>; Joseph Youssif Saab Jr. <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluna de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2</sup> Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

**Resumo.** *A presente pesquisa amplia as especificações geométricas do futuro túnel de vento didático e de pesquisa do IMT tendo em vista a melhoria do seu desempenho dinâmico e economia energética na operação. Durante o projeto conceitual anteriormente realizado do túnel de vento, que é do tipo Eiffel, as áreas úteis das seções transversais de todos os segmentos, da admissão à descarga, foram dimensionadas com base nos requisitos fixados, o que permitiu conhecer a dimensões básicas e a potência de acionamento necessária para efeito de planejamento de instalação e custos. No desenho preliminar, no entanto, todas as seções transversais são quadradas em função da facilidade de fabricação que apresentam. Não obstante, dada a importância do desenvolvimento da camada limite interna ao túnel para a qualidade do escoamento na seção de testes atmosférica (aeronáutica), decidiu-se pela ampliação da investigação numérica a fim de comparar o desempenho da seção quadrada com uma octogonal e com uma circular de referência. A simulação foi realizada em domínio de cálculo de escala reduzida, porém, com número de Reynolds por metro de  $5,9E+05$  @  $25^{\circ}C$ , compatível com o aparecimento de transição e regime turbulento, fenômenos modelados na simulação numérica e importantes para o estudo da camada limite. A robustez da simulação foi verificada por estudos de sensibilidade de malha e de número de iterações e o resultado indica a mudança da seção transversal escolhida anteriormente.*

## Introdução

Um túnel de vento é um equipamento fluidodinâmico que permite análise experimental do escoamento em torno de modelos para a resolução de problemas de mecânica dos fluidos. A semelhança dinâmica ou completa que se espera entre os escoamentos estudados em torno de modelos e de protótipos determina as dimensões das seções de testes e as faixas de números de Reynolds e Mach para os quais um túnel de vento deve ser projetado. A Tabela 1 mostra os requisitos fixados para o futuro túnel de vento do IMT, com base na pesquisa realizada com os diversos pesquisadores e professores do IMT (Lee & Saab Jr, 2018).

Tabela 1 – Requisitos para o novo túnel de vento do IMT

Velocidade de referência nas seções de teste	30 [m · s <sup>-1</sup> ]
Visualização do escoamento	Fumaça
Fluido do escoamento	Ar, @ temperatura ambiente 25°C
Sessões de trabalho (uso contínuo máximo)	≤ 90 [min]
Nível de turbulência na seção de teste atmosférica	< 1%
Equipamentos para medição (diversos tipos)	Velocidade, força e pressão
Área frontal máxima de blocagem	≤ 5% área da seção transversal
Comprimento total	30 [m]
Seção transversal I (atmosférica)	1,6 × 1,6 [m] (seção quadrada)
Comprimento da seção I	2,4 [m]
Seção transversal II (camada limite)	1,6 × 1,6 [m] (seção quadrada)
Comprimento da seção II	2,4 [m]
Número de Reynolds máximo estimado, com base na aresta da seção de testes @ 25°C:	~3 · 10 <sup>6</sup>
Número de Mach máximo estimado @ 25°C:	0,09

<b>Perfil usado na contração</b>	Polinômio de quinto grau (Bell & Mehta, 1988).
<b>Razão de contração</b>	6
<b>Potência estimada</b>	108,7 [kW]

Fonte 1 - (Lee & Saab Jr, 2018)

Os requisitos levaram ao dimensionamento preliminar de um equipamento semelhante ao túnel de vento de circuito aberto e baixa velocidade do Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA (Aeronautics Research Mission Directorate - NASA, 2008), p.7-8. Os requisitos fixados para as duas seções de testes previstas para o equipamento futuro do IMT, uma de escoamento uniforme (seção atmosférica ou aeronáutica) e outra de escoamento turbulento (seção de camada limite), estão destacados na Tabela 2.

**Tabela 2 - Requisitos de cada seção de teste.**

<b>Requisito</b>	<b>Seção Aeronáutica</b>	<b>Seção de Camada Limite</b>
<b>Velocidade de Referência [<math>m \cdot s^{-1}</math>]</b>	30	30
<b>Área [<math>m^2</math>]</b>	2,56	2,56
<b>Perfil de Velocidade</b>	Uniforme	Lei do Expoente 1/7

Fonte 2 - (Lee & Saab Jr, 2018)

Os requisitos adicionais de qualidade do escoamento adotados para as seções de teste estão listados na Tabela 3, juntamente com as referências empregadas.

**Tabela 3 - Critérios de análise adotados.**

<b>Critério</b>	<b>Indicador adotado</b>	<b>Referência</b>
<b>1 Uniformidade do escoamento na seção atmosférica.</b>	do Maior área possível com escoamento uniforme, usando como referência a velocidade central no duto.	(Barlow, Rae Jr., & Pope, 1999), p.73
<b>2 Nível de turbulência máximo na seção atmosférica.</b>	< 0,5% para uso didático < 0,1% para uso de pesquisa.	(Barlow, Rae Jr., & Pope, 1999), p.137
<b>3 Perfil turbulento na seção de camada limite.</b>	$\frac{u}{U} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{7}}$	(White, 2018)

O critério de uniformidade na seção de testes atmosférica é o mais fundamental objetivo a ser alcançado para um túnel de vento dessa natureza (Barlow, Rae Jr., & Pope, 1999) e constitui o principal motivo da investigação da seção transversal mais apropriada que é o objeto da presente pesquisa. A uniformidade do escoamento pode ser verificada numericamente, ainda na etapa de projeto, graças à aplicação do método CFD-RANS (Versteeg & W.Malalasekera, 2007), mediante modelagem apropriada.

Por outro lado, o requisito de máximo nível de turbulência não pode ser apropriadamente avaliado pelo mesmo método numérico, já que o emprego das equações de Navier-Stokes promediadas, a base do método CFD-RANS, filtra as flutuações temporais dos campos de velocidade e pressão, modelando apenas os campos médios. A solução completa do campo turbulento demandaria uma Simulação Numérica Direta, ou DNS (Versteeg & W.Malalasekera, 2007) que não pode ser replicada atualmente para a faixa de número de Reynolds de interesse. Após a construção do túnel de vento, esse requisito e também o que demanda perfil turbulento plenamente desenvolvido na seção de testes de camada limite, poderão ser medidos experimentalmente e ajustados pela eventual instalação de telas de retificação de fluxo, geradores de vórtices e *trip strips* em posições apropriadas (Barlow, Rae Jr., & Pope, 1999). P. 310.

Para verificar a característica desejada do critério 1, descrito na Tabela 3, recorreu-se ao uso de um domínio de cálculo reduzido, passível de ser resolvido com os recursos computacionais disponíveis aos pesquisadores do IMT, empregando o código ANSYS CFX®.

O crescimento da camada limite interna efetivamente reduz a área de escoamento uniforme disponível para testes e depende do comprimento percorrido, do regime de escoamento e dos gradientes de pressão adversos e favoráveis que surgem em função das geometrias do túnel. A camada limite e o nível de turbulência no escoamento são também afetados e amplificados pela interferência entre camadas-limite que se desenvolvem sobre superfícies adjacentes. Esse tipo de interferência poderia ser minimizado pela adoção de uma seção circular em todo o equipamento, no entanto, a seção circular é de difícil construção e operação, trazendo inconvenientes para a instalação da mesa de ensaios rotativa e dos ensaios de visualização. Assim, a seção circular será adotada apenas como referência para o estudo da espessura da camada limite na seção de testes atmosférica, contra a qual serão comparados os resultados das seções quadrada e octogonal.

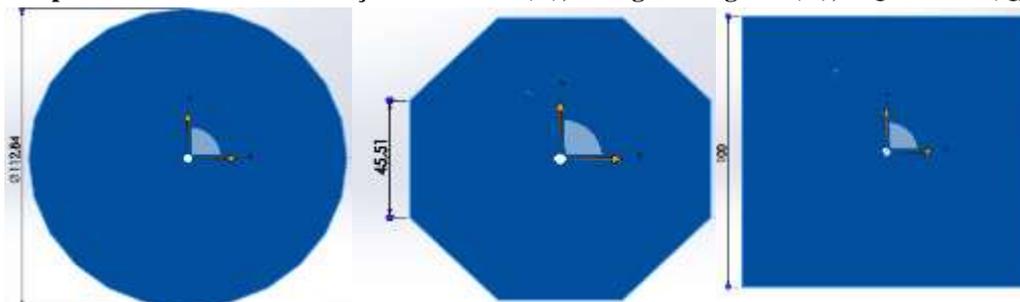
Portanto, o objetivo principal da pesquisa é a seleção numericamente fundamentada da seção transversal mais apropriada a ser empregada no refinamento do projeto do túnel de vento do IMT e as metas específicas para alcançá-lo, são: (i) o estudo da evolução da camada limite nas paredes de dutos com diferentes seções transversais, considerando a interferência entre duas camadas limites contíguas (arrasto de interferência); (ii) o estudo de como a seção transversal afeta a área de escoamento uniforme disponível para testes; e (iii) estudos de sensibilidade dos resultados das simulações de CFD em função da resolução geométrica da malha empregada e do número de iterações de cada caso simulado.

## **Materiais e Métodos**

A avaliação numérica da espessura da camada limite e da uniformidade na seção de testes em função do tipo de seção transversal foram realizadas com o auxílio de uma licença didática e outra de pesquisa do ANSYS CFX, versão 2019R2. Com o auxílio da ferramenta foi possível discretizar o domínio de cálculo (2,0 m x 0,1 m x 0,1 m) em milhões de volumes finitos e resolver as Equações de Conservação da Massa e de Navier Stokes promediadas, além das equações de transição ( $\gamma - Re_\theta$ ) (Wilcox, 2010) e modelo de turbulência empregado (SST) (Wilcox, 2010), no domínio de cálculo.

Como o crescimento da camada limite no túnel de vento é um fenômeno local que ocorre próximo à parede, seria desejável a realização de uma malha cujos elementos fossem capazes de capturar as pequenas escalas dissipativas perto da parede do túnel (Wilcox, 2010). No entanto a realização de tal malha tornaria impraticável a simulação de vários casos e também o uso da licença acadêmica do software. Pela mesma razão não se utilizou o túnel completo como domínio de cálculo (21,6 m x 1,6 m x 1,6 m). Assim, a metodologia empregada limitou os resultados a uma comparação de desempenho relativo entre as 3 geometrias propostas. Não obstante, para assegurar que o regime de escoamento de transição e turbulência pudesse ser alcançado o domínio de cálculo foi dimensionado para resultar em um número de Reynolds baseado no comprimento dos dutos da ordem de  $1,23 \times 10^6$ , para todas as seções transversais simuladas, conforme a Figura 1. Na impossibilidade de colocar o primeiro nó da malha dentro da subcamada laminar, a camada limite foi resolvida com o auxílio de uma função de parede padrão (White, 2018) na maioria dos casos. As superfícies foram consideradas hidraulicamente lisas e o esquema de interpolação empregado em todas as equações foi de alta ordem.

**Figura 1 – Seções transversais de mesma área cujos desempenhos foram numericamente comparados nas mesmas condições: Circular (C); Octogonal regular (O); e Quadrada (Q).**



As figuras empregadas foram todas regulares (altura = largura) pelo fato de o túnel de vento ter uma segunda seção de testes (de camada limite), onde serão testados modelos de construções diversas, incluindo edifícios, que possuem elevada razão de aspecto. Isso levou à rejeição da proposta de uso da proporção de 1,4:1 (L:H) nas seções de teste, indicada como ideal por Bell & Mehta, 1988.

O critério de convergência numérica adotado foi o de redução dos resíduos flutuantes (RMS) da conservação da quantidade de movimento, em todas as direções, além da conservação da massa, em 5 ordens de grandeza, inicialmente. A vazão mássica foi o parâmetro monitorado durante a solução numérica do problema para que se pudesse acompanhar a estabilidade do valor das variáveis físicas durante a solução numérica. Antes da comparação dos resultados entre as seções circular (referência), quadrada e octogonal, foi realizado um estudo de sensibilidade do número de iterações. Finalmente, considerando que os erros da metodologia CFD são fortemente ligados à resolução da malha (Versteeg & W.Malalasekera, 2007), foi realizada uma malha refinada (com distância adimensional da parede até o primeiro elemento de 5 ou menos,  $Y^+ < 5$ ), rodada em uma licença de pesquisa do ANSYS CFX que, apesar da maior demanda computacional, permitiu avaliar a ordem dos erros de modelagem e numéricos decorrentes da adoção da função de parede e da malha mais espaçada na maioria das simulações.

A Tabela 4 e a Tabela 5 detalham as dimensões dos domínios de cálculos e as características das malhas empregadas em todos os casos simulados.

**Tabela 4 - Dimensões do domínio de cálculo (todos os casos)**

Perfil	Dimensão Nominal [m]	Área [ $m^2$ ]	Comprimento [m]
<b>Quadrado</b>	0,10000	0,01	2,0
<b>Circular</b>	0,11284	0,01	2,0
<b>Octógono</b>	0,04551	0,01	2,0

**Tabela 5 - Parâmetros de malha.**

Seção e Casos	Circular C1 e C2	Octogonal O1 e O2	Quadrada Q1 e Q2	Quadrada Q3
<b>Tamanho do menor elemento [m]</b>	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$
<b>Quantidade de elementos</b>	$8,382 \cdot 10^6$	$5,078 \cdot 10^6$	$8,027 \cdot 10^6$	$4,918 \cdot 10^7$
<b>Quantidade de nós</b>	$2,850 \cdot 10^6$	$1,846 \cdot 10^6$	$2,811 \cdot 10^6$	$1,739 \cdot 10^7$
<b>Y+ do primeiro elemento</b>	16,19(méd.)	6,572(méd)	6,475(méd)	< 5,0 (100%)
<b>Qualidade global dos elementos: valor médio (e desvio padrão)</b>	0,79665 (0,15562)	0,62034 (0,275665)	0,52537 (0,28653)	0,99994 (0,32174)

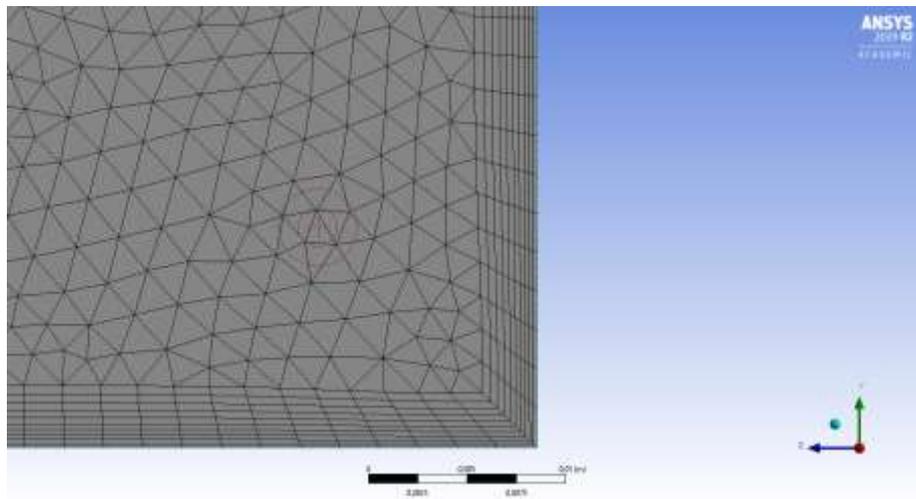
A Tabela 6 mostra as condições de contorno adotadas para todos os casos simulados.

Tabela 6 - Condições de contorno.

Local	Tipo	Condição de contorno
Fluido	Ar à 25°C	Escoamento isotérmico, modelo de turbulência SST, modelo de transição $\gamma$ , $Re_\theta$
Admissão	Inlet	$V = 10[m \cdot s^{-1}]$ , uniforme, nível de turbulência médio (5%)
Saída	Outlet	$P_{m\acute{e}dia\ efetiva} = -57,2[Pa]$ (estimada pela equação de Bernoulli)
Superfície interna	Wall	Condição de aderência, parede hidraulicamente lisa

A Figura 2, mostra detalhes da geometria da malha regular. A malha refinada segue a mesma configuração geral e distribuição de elementos (tetraédricos no centro e prismáticos nas bordas), mas tem elementos até duas ordens de grandeza menores.

Figura 2 - Vista de detalhe da malha. Casos Q1 e Q2.



A

Tabela 7 mostra os números de iterações e resíduos máximos de cada caso simulado. O índice 1 representa o primeiro caso de cada geometria, com menor número de iterações enquanto o índice 2 representa o segundo caso de cada geometria, com maior número de iterações. O índice 3 indica malha de alta resolução e custo computacional, realizada somente para a seção quadrada.

Tabela 7 – Casos simulados.

Caso	Número de iterações	RMS de resíduos fixado para a “convergência”
$C_1$	61	$1 \cdot 10^{-5}$
$C_2$	103	$1 \cdot 10^{-6}$
$Q_1$	250	$1 \cdot 10^{-5}$
$Q_2$	500	$1 \cdot 10^{-6}$
$O_1$	83	$1 \cdot 10^{-5}$
$O_2$	333	$1 \cdot 10^{-6}$
$Q_3$	129	$1 \cdot 10^{-6}$

O problema foi rodado paralelamente em 8 núcleos de processamento. Para os casos de índice 2 os valores dos resíduos permitidos foram reduzidos em uma ordem de grandeza e as soluções numéricas de índice 1 correspondentes foram alimentadas como valores iniciais dos campos de pressão e velocidade, *ceteris paribus*. O tempo característico para rodar cada uma

das simulações de malha regular foi da ordem de 1 hora, enquanto o tempo característico para rodar uma única simulação com malha refinada (Q3) foi de 1 dia, 12 horas e 10 minutos.

Em todos os casos o monitoramento da vazão mássica demonstrou estabilidade de valores antes de alcançar a convergência.

Na análise de pós-processamento foram plotados os gráficos do perfil de velocidade nas seções transversais do tubo localizadas a 0,25, 0,80 e 1,80 m da face de entrada. Os gráficos foram plotados com amostragem de 1.000 pontos, com concentração maior perto das paredes. Essas seções foram selecionadas com base no regime de escoamento predominante em cada uma delas, conforme indicado na Tabela 8.

**Tabela 8 – Seções selecionada para a avaliação dos resultados. Todos os casos.**

<b>Comprimento [m]</b>	<b>0,25</b>	<b>0,80</b>	<b>1,80</b>
<b>Reynolds</b>	1,54E+05	4,93E+05	1,11E+06
<b>Regime</b>	Laminar	Transição	Turbulento

Os déficits de velocidade e quantidade de momento foram também integrados entre uma parede e o centro das seções, ao longo de uma linha, para se estimar a espessura de deslocamento (eq. 1) e a espessura de déficit de quantidade de movimento (eq. 2). Esses parâmetros são importantes por fornecerem uma medida objetiva da camada-limite e por serem os parâmetros intimamente ligados à tensão de cisalhamento na parede do tubo, conforme mostra a equação integral de von Kármán (White, 2018). Lançou-se ainda mão de diversos recursos gráficos disponíveis em CFD para auxiliar na verificação da coerência física da solução, assim como para visualização da região de transição para cada seção, através dos isocontornos de energia cinética turbulenta; dos campos de velocidade e pressão e mapeamento do valor de  $Y^+$  final ao longo da superfície interna do tubo.

$$\text{Espessura de deslocamento: } \delta^* = \int_0^\infty \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \approx \int_0^\delta \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (1)$$

$$\text{Espessura de déficit de quantidade de mov.: } \theta = \int_0^\infty \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \approx \int_0^\delta \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (2)$$

Por fim, a tensão de cisalhamento foi numericamente integrada ao longo da parede interna de cada tubo para retornar uma estimativa da força de cisalhamento total causada pelo atrito viscoso e turbulento em cada caso.

## Resultados e Discussão

Inicialmente realizou-se uma estimativa da ordem dos erros incorridos em função do número de iterações (todas as seções transversais) e da resolução da malha (seção quadrada), conforme mostra a Tabela 9.

**Tabela 9 – Estimativas do valor da Espessura de deslocamento em função da posição no tubo simulado, para diferentes números de iterações (C, O, Q) e diferentes resoluções de malha (somente Q).**

<b>Caso</b>	<b><math>\delta^*</math> @ 0,25 m</b>	<b><math>\delta^*</math> @ 0,80 m</b>	<b><math>\delta^*</math> @ 1,80 m</b>
<b>C1 [m]</b>	2,20E – 03	5,17E – 03	1,08E – 02
<b>C2 (ref)[m]</b>	2,20E – 03	5,16E – 03	9,94E – 03
<b>Dif.[m]</b>	9,00E – 08	–1,18E – 05	–8,75E – 04
<b>Dif. %</b>	0,00%	–0,23%	–8,81%
<b>O1[m]</b>	1,28E – 03	2,58E – 03	4,89E – 03
<b>O2 (ref)[m]</b>	1,28E – 03	2,57E – 03	4,84E – 03
<b>Dif.[m]</b>	3,60E – 07	–6,00E – 06	–4,90E – 05

<b>Dif. %</b>	0,03%	-0,23%	-1,01%
<b>Q1[m]</b>	$1,13E - 03$	$2,56E - 03$	$4,43E - 03$
<b>Q2 (ref)[m]</b>	$1,13E - 03$	$2,56E - 03$	$4,43E - 03$
<b>Dif.[m]</b>	$0,00E + 00$	$0,00E + 00$	$2,60E - 07$
<b>Dif. %</b>	0,00%	0,00%	0,01%
<b>Q2[m]</b>	$1,13E - 03$	$2,56E - 03$	$4,43E - 03$
<b>Q3[m]</b>	$1,09E - 03$	$2,33E - 03$	$4,13E - 03$
<b>Dif.[m]</b>	$-3,98E - 05$	$-2,34E - 04$	$-3,03E - 04$
<b>Dif. %</b>	-3,66%	-10,0507%	-7,3449%

A análise dos resultados apresentados na Tabela 9 sugere que o critério de convergência fixado de  $RMS \leq 10^{-5}$  (casos com índice 1) é suficiente para a estabilização dos parâmetros da camada limite, nos regimes laminar e de transição, visto que as variações de  $\delta^*$  entre os casos de índice 1 e 2 indica diferenças máximas de 1%, exceto no caso de regime turbulento na seção circular, onde o critério mínimo a ser adotado é  $RMS \leq 10^{-6}$ , ou seja, o caso de índice 2.

A comparação dos resultados de  $\delta^*$  das malhas quadradas de resolução regular e alta, por outro lado, indica que a malha regular superestima os valores da espessura de deslocamento entre 3,66% (laminar) e 10,05% (transição). A partir dessas constatações, determinou-se que as análises subsequentes seriam realizadas com base nos casos de índice 2, sabendo-se que os resultados apresentados poderiam ser até 10% superiores aos que seriam obtidos com malhas de alta resolução, no caso de parâmetros que dependem linearmente da velocidade.

Para verificar qual seção transversal resultaria na maior área de escoamento uniforme disponível na seção de testes atmosférica, conforme critério apresentado à Tabela 3, foram adotados três níveis diferentes de tolerância de uniformidade, ou seja, variações de até 1%, 2% ou 5% da velocidade da linha central. Os dados para até 5% de variação constam na Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12, para as seções distantes da entrada de 0,25, 0,80 e 1,80 m, respectivamente. Os valores são expressos em “percentual da área total que apresenta a variação máxima de velocidade prescrita” (área útil) e mostrados juntamente com o isocontornos da região uniforme e os cálculos da espessura de deslocamento ( $\delta^*$ ) e da espessura de quantidade de movimento ( $\theta$ ), em cada seção.

**Tabela 10 - Resultados em  $x = 0,25[m]$ .**

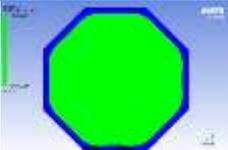
<b>Seção <math>x = 0,25 [m]</math></b>					
<b>Geometria</b>	<b>Caso</b>	<b>Seção de 5%</b>	<b>Área útil</b>	<b><math>\delta^* [m]</math></b>	<b><math>\theta [m]</math></b>
<b>Circular</b>	$C_2$		83,4%	$1,102E - 3$	$0,883 E - 3$
<b>Octogonal</b>	$O_2$		83,1%	$1,277E - 3$	$0,963E - 3$
<b>Quadrada</b>	$Q_2$		82,3%	$1,127E - 3$	$0,828E - 3$

Tabela 11 - Resultados em  $x=0,80[m]$

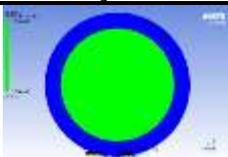
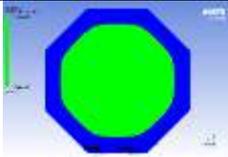
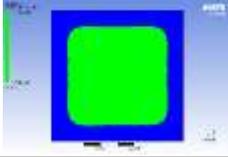
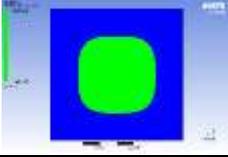
Seção $x = 0,80 [m]$					
Geometria	Caso	Seção de 5%	Área útil	$\delta^* [m]$	$\theta [m]$
Circular	$C_2$		61,3%	$2,578E - 3$	$1,949E - 3$
Octogonal	$O_2$		61,8%	$2,570E - 3$	$1,874E - 3$
Quadrada	$Q_2$		56,6%	$2,559E - 3$	$1,884E - 3$

Tabela 12 - Resultados em  $x=1,80[m]$

Seção $x = 1,80 [m]$					
Geometria	Caso	Seção de 5%	Área útil	$\delta^* [m]$	$\theta [m]$
Circular	$C_2$		31,7%	$4,968E - 3$	$3,749E - 3$
Octogonal	$O_2$		32,2%	$4,842E - 3$	$3,584E - 3$
Quadrada	$Q_2$		34,4%	$4,428E - 3$	$3,226E - 3$

A análise dos resultados com até 5% de tolerância na uniformidade revela que a seção transversal de maior área útil varia para cada regime de escoamento. No regime laminar, as seções são praticamente equivalentes em termos de área útil. No regime de transição a seção octogonal tem praticamente a mesma área útil da circular e oferece significativa vantagem sobre a seção quadrada. No caso do regime turbulento, a seção quadrada oferece vantagem sobre as demais. Duas indicações da plausibilidade física dos resultados são: (i) o aumento da espessura da camada limite e da espessura de deslocamento na medida em que o comprimento aumenta a partir da seção de entrada e (ii) para todos os casos simulados,  $\theta < \delta^*$ .

A Tabela 13 indica a área útil, em cada seção, para todos os casos simulados, incluindo os casos com tolerâncias mais apertadas de escoamento uniforme.

Tabela 13 – Área útil de cada seção transversal para diferentes tolerâncias de uniformidade e comprimentos percorridos dentro do tubo.

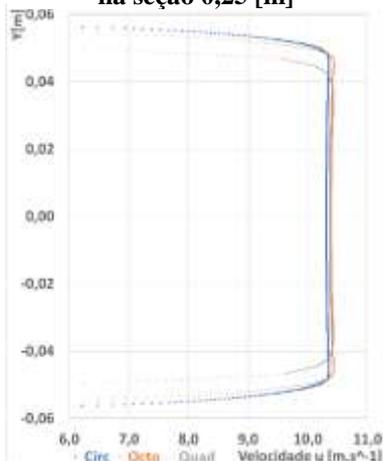
Seção transversal	Comprimento percorrido [m]	Uniformidade (área útil, em % da área total)		
		1%	2%	5%

<b>Circular</b>	0,25	76,1%	79,0%	83,4%
<b>Octogonal</b>		76,8%	79,1%	83,1%
<b>Quadrada</b>		66,6%	74,4%	64,6%
<b>Circular</b>	0,80	50,0%	55,2%	61,3%
<b>Octogonal</b>		49,8%	55,0%	61,8%
<b>Quadrada</b>		39,8%	46,2%	44,5%
<b>Circular</b>	1,80	15,9%	20,7%	31,7%
<b>Octogonal</b>		17,3%	22,1%	32,2%
<b>Quadrada</b>		18,0%	23,3%	27,0%

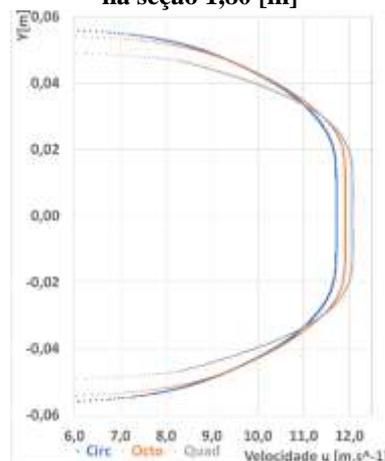
Como em uma simulação tipo RANS o fenômeno da turbulência não é calculado, apenas modelado no escoamento médio, o primeiro ponto de atenção deve ser a seção a 0,25 m da entrada, onde o escoamento é essencialmente laminar e a sua modelagem numérica é bem mais simples e robusta. Nesse regime, a seção octogonal aparece em primeiro lugar, com a maior área útil de escoamento, para os dois critérios de uniformidade mais estreitos, ou seja, 1% e 2% de variação máxima da velocidade na linha central do tubo. Acrescentando a complexidade da modelagem de transição, na seção a 0,80 m da entrada, a seção octogonal apresenta o segundo lugar, muito próximo ao primeiro, para os critérios de uniformidade de 1% e 2% e o primeiro lugar no critério de 5%. Por fim, acrescentando a complexidade da modelagem da turbulência do escoamento médio, na seção a 1,80 m da entrada, a seção octogonal repete o desempenho da região da transição, porém, desta vez perdendo nos critérios mais estreitos de uniformidade para a seção quadrada.

A análise direta dos perfis de velocidade plotados nas seções a 0,25, 0,80 e 1,80 m da entrada é mostrada na Figura 5, Figura 4 e Figura 3.

**Figura 5 - Perfis de velocidades na seção 0,25 [m]**

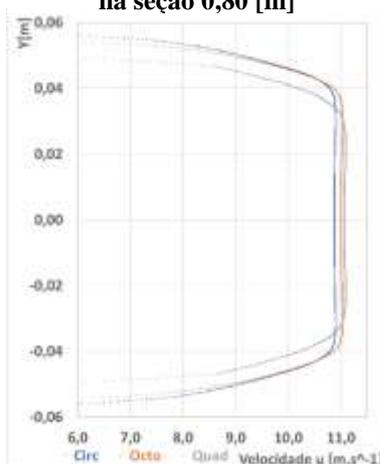


**Figura 3 - Perfis de velocidades na seção 1,80 [m]**



A observação macroscópica dos perfis de velocidade ao longo da distância percorrida mostra o desenvolvimento do escoamento se processando fisicamente, com o efeito da parede se propagando gradativamente em direção ao centro do tubo e afetando a curvatura do perfil. A

**Figura 4 - Perfis de velocidades na seção 0,80 [m]**



presença da parede causa deformações no fluido que propagam mais rapidamente no caso da seção quadrada, sugerindo maior atrito. O bloqueio que ocorre na região periférica, especialmente nos 4 cantos obriga o escoamento ao longe a se deslocar mais rapidamente no centro para atender a conservação da massa. Este bloqueio não está completamente representado na espessura de deslocamento calculada, pois essa estimativa foi feita pela integração da velocidade ao longo do apótema do polígono e não na linha que vai dos vértices ao centro, reforçando a importância do estudo visual do escoamento adicionalmente à análise numérica. Para validar essa hipótese a tensão de cisalhamento foi integrada ao longo de toda a superfície interna dos tubos de diferentes seções transversais e o resultado está mostrado na Tabela 14.

**Tabela 14 - Força de cisalhamento**

Caso	Força de cisalhamento [N]	Dif%
$C_2$	0,211 (ref)	-
$O_2$	0,233	9,7%
$Q_2$	0,247	14,8%

A força de cisalhamento é um indicador direto da potência elétrica requerida para a indução do escoamento quando a mesma vazão mássica ocorre na entrada e a mesma pressão na saída de todas as configurações simuladas. O cálculo indica que a seção octogonal consumiria cerca de 9,7% mais potência elétrica que a circular, porém, 5,1% a menos que a seção quadrada inicialmente planejada.

## **Conclusões e próximos passos.**

O estudo numérico da evolução da camada limite dentro de tubos com seções transversais circular, quadrada e octogonal, em número de Reynolds apropriado para o surgimento da transição e turbulência, permitiu avaliar numericamente e visualmente a uniformidade do escoamento em três seções específicas de cada configuração.

Antes da avaliação visual e numérica finais foram realizados estudos de sensibilidade dos resultados com relação ao número de iterações e à resolução da malha, com indicação de que o erro numérico máximo esperado é baseado na malha e da ordem de +10%. Em função do uso do mesmo critério para a construção de todas as malhas regulares, acredita-se que a distribuição do erro encontrado não afete de forma heterogênea os casos simulados.

Em função da necessidade de se obter a maior área disponível preenchida com escoamento uniforme de alta qualidade na seção de testes atmosférica (aeronáutica) de um túnel, conforme critério descrito na Tabela 3, é comum que se faça a técnica da remoção ou “drenagem” da camada limite antes do início da seção de testes, de forma que a camada limite reinicia seu desenvolvimento a partir do regime laminar no início dessa seção. Considerando as limitações descritas para um túnel de vento com seção circular, as simulações realizadas indicam o uso de uma seção transversal octogonal para o futuro túnel de vento do IMT, o que pode ser alcançado alternativamente pela construção de um túnel de seção quadrada, com *fillets* adicionados nos cantos para emular uma seção octogonal.

A integração da tensão de cisalhamento ao longo de todo o domínio simulado, incluindo as regiões com camada limite laminar, transição e turbulenta, reforça a indicação da seção octogonal, sugerindo uma economia de energia de bombeamento da ordem de 5% em comparação com a seção quadrada recomendada anteriormente.

Os próximos passos são a retificação do desenho original do projeto conceitual para incluir a nova seção e o planejamento de construção do túnel. Os requisitos de nível de turbulência na seção atmosférica e perfil de turbulência do expoente 1/7 na seção de camada limite não poderão ser verificados até a construção do túnel e a realização de experimentos de homologação do mesmo para comissionamento.

## **Agradecimentos**

Ao IMT e à Comissão de IC da Instituição, pela concessão de bolsa de Iniciação Científica ao longo do ano de 2019.

À ESSS e ANSYS pelas licenças acadêmica e de pesquisa do software ANSYS CFX®.

## Referências Bibliográficas.

- Aeronautics Research Mission Directorate - NASA. (2008). *WIND TUNNELS OF THE WESTERN HEMISPHERE*. Washington, DC.: Library of Congress.
- Barlow, J. B., Rae Jr., W. H., & Pope, A. (1999). *Low-Speed Wind Tunnel Testing* (3ª ed.). John Wiley & Sons.
- Bell, J. H., & Mehta, R. D. (Abril de 1988). Contraction Design for Small Low-Speed Wind Tunnels. *Joint Institute For Aeronautics and Acoustics*.
- Lee, N. Y., & Saab Jr, J. Y. (2018). Dimensionamento e Simulação e Fluidodinâmica (CFD) do Futuro Túnel de Vento do IMT para Verificação Inicial das Características de Escoamento. São Caetano do Sul: IMT.
- Versteeg, H. K., & W. Malalasekera. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics* (2ª ed.). Pearson Education Limited.
- White, F. M. (2018). *Mecânica dos Fluidos* (8ª ed.). McGraw-Hill.
- Wilcox, D. (2010). *Turbulence Modeling for CFD* (Third Ed, Second Printing ed.). DCW.