



universidade de aveiro  
theoria poiesis praxis

**Departamento de Engenharia Mecânica**

Curso: Mestrado em Engenharia Aeroespacial

Disciplina: 43450- Mecânica dos Flúidos Computacional para Engenharia Aeroespacial

Ano letivo 2024/2025

## **Trabalho 1**

Autores:

Nº Mecanográfico:

Henrique Resende

103081

Magner Gusse

110180

## **Palavras-Chave**

Mecânica de fluidos, CFD, escoamento, malha, conservação da massa, coeficiente de perda de carga, ANSYS, ligação em T, modelação numérica, engenharia aeroespacial, análise de escoamento.

## **Abstrato**

Este trabalho analisa o escoamento do ar em uma ligação em T utilizando a mecânica de fluidos computacional (CFD), como parte da disciplina de Mecânica dos Fluidos Computacional para Engenharia Aeroespacial. O estudo foca na verificação do princípio de conservação da massa, na análise da distribuição de velocidade, pressão e temperatura ao longo da ligação, e na determinação do coeficiente de perda de carga para cada caminho de escoamento. O modelo foi desenvolvido usando o software ANSYS, com uma geometria tridimensional e malha refinada. Os resultados indicam uma boa concordância com os fenômenos físicos esperados, como a manutenção do fluxo de massa e a variação de pressão ao longo do escoamento. Além disso, os cálculos de perdas de carga foram comparados com valores teóricos, mostrando consistência em casos específicos.

## Índice

Lista de figuras .....	4
1. Introdução.....	5
Enquadramento .....	5
Objetivos .....	5
Condições iniciais.....	6
Bases teóricas.....	6
Método dos Elementos Finitos .....	6
2. Metodologia .....	8
Geometria.....	8
Criação da malha .....	9
3. Método de cálculo.....	10
4. Resultados e análise.....	10
Conservação da massa.....	11
Campo de Velocidades.....	12
Campo de pressões .....	13
Campo de Temperaturas .....	14
Forças .....	14
5. Modelo simplificado.....	16
6. Conclusão .....	17
7. Bibliografia.....	18

## Lista de figuras

Figura 1 - Exemplo de uma ligação em T .....	5
Figura 2 - (a) Esquema básico do MEF; (b) Tipos de elementos do MEF .....	7
Figura 3 a, b, c & d: geometria do fluído .....	8
Figura 4a) e b) zonas de refinamento de malha .....	9
Figura 5 a), b), c) Malha completa resultante .....	9
Figura 6 Propriedades do ar no modelo de calculo .....	10
Figura 7 Gráfico resultante dos residuais calculados .....	10
Figura 8 Gráfico resultante do calculo dos fluxos de massa.....	11
Figura 9 a) Contornos e b) Vetores da velocidade no escoamento; c)imagem mais próxima dos vetores de velocidade.....	12
Figura 10 a) Contornos e b) Vetores da pressão no escoamento .....	13
Figura 11 Representação teórica dos coeficientes de perda de carga.....	13
Figura 12 Contornos e b) Vetores da Temperatura no escoamento .....	14
Figura 13- Gráficos resultantes do cálculo das forças.....	15
Figura 14- Mesh do modelo simplificado .....	16
Figura 15- Velocidade modelo simplificado.....	17
Figura 16- Pressão modelo simplificado .....	17
Figura 17- Temperatura modelo simplificado .....	17

# 1. Introdução

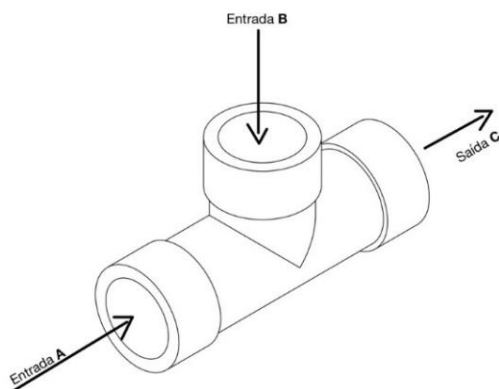
## Enquadramento

O presente relatório pretende abordar o Trabalho 1, desenvolvido no âmbito da Unidade Curricular Mecânica de Fluidos Computacional para Engenharia Aeroespacial, pertencente ao 1º ano de Mestrado em Engenharia Aeroespacial, tendo os conteúdos sido abordados em aulas, nomeadamente, o software usado e as abordagens ao problema.

## Objetivos

O trabalho tem como principal objetivo, o estudo do escoamento do ar num tubo em T, onde existem duas entradas e uma saída, e pretende-se:

- Verificar o princípio da conservação da massa de ar.
- Obter a distribuição da velocidade, da pressão e da temperatura do ar na ligação em T.
- Determinar o abaixamento de pressão do ar entre cada uma das entradas e a saída.
- Determinar o coeficiente de perda de carga correspondente a cada um dos caminhos do ar, entre cada uma das entradas e a saída, comparando o resultado com o que é geralmente encontrado na literatura.
- Determinar a temperatura do ar na saída da ligação em T.
- Determinar as forças, segundo cada uma das direções coordenadas, que o ar em escoamento exerce sobre a ligação em T.



*Figura 1- Exemplo de uma ligação em T*

## Condições iniciais

As condições iniciais são as seguintes: as entradas A e B possuem um diâmetro constante ao longo do tubo, de 30mm; a entrada A apresenta uma temperatura de 50°C e a entrada B de 25°C; a velocidade na entrada A é o dobro da na entrada B, tendo sido usadas  $v_A = 10\text{m/s}$  e  $v_B = 5\text{m/s}$  foi assumida uma intensidade turbulenta de 5% em cada entrada de ar; o modelo de turbulência usado é de k-épsilon e o modelo encontra-se em regime permanente.

## Bases teóricas

Em Engenharia Aeroespacial, os estudos de escoamentos são frequentes e extremamente importantes, isso implica que devem ser feitos com o máximo rigor. O problema em análise, trata-se de um escoamento incompressível, no qual a massa volúmica do fluido em escoamento pode ser afetado pela temperatura [1], mas não pela pressão. Tratando-se de um escoamento incompressível, é necessário garantir que se verifica o princípio de continuidade ao longo do escoamento e que as equações de Navier-Stokes [2] são cumpridas, contudo, ainda que os modelos de calculo de CFD aproximam as equações, as mesmas não são resolvidas.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

*Equação 1- Equação da continuidade*

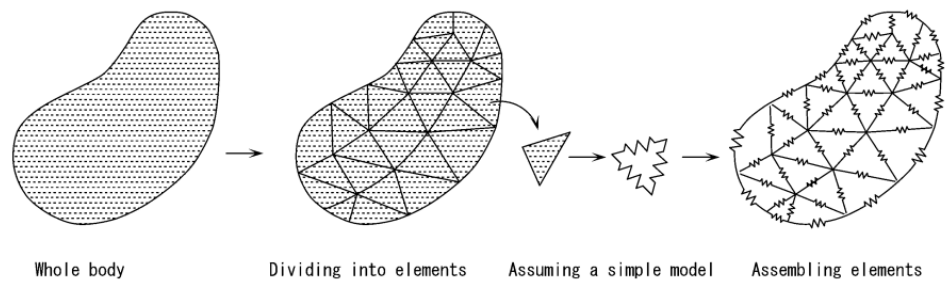
$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \vec{\nabla} p + \mu \vec{\nabla}^2 \vec{V} \quad (2)$$

*Equação 2- Equação do momento*

## Método dos Elementos Finitos

A abordagem tradicional para resolver problemas de escoamentos de fluídos, através de métodos analíticos, é facilmente aplicada em escoamentos simples em 2D. No entanto, para escoamentos mais complexos e com diferentes tipos de elementos como a volta da asa de uma aeronave, é útil aplicar métodos numéricos como o método dos elementos finitos (MEF).

Este método divide a estrutura em partes mais pequenas, tratando cada um como um modelo matemático e combina-os, permitindo resolver o conjunto como um todo, como está representado na Figura 2-a. Isto permite obter uma aproximação do comportamento que o sistema apresentaria, na realidade. Existem diversos tipos de elementos singulares que podem ser aplicados, alguns dos quais se encontram presentes na figura 2-b.[3]



(a)

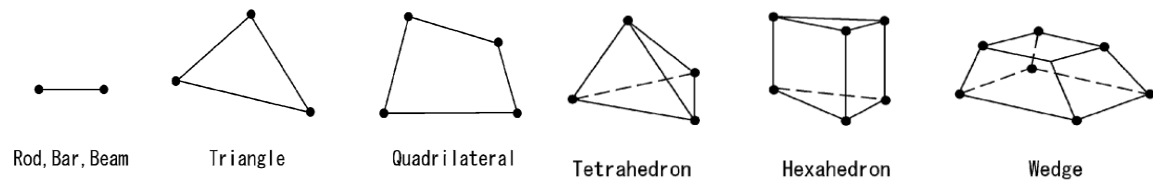


Figura 2 - (a) Esquema básico do MEF; (b) Tipos de elementos do MEF

## 2. Metodologia

O presente trabalho foi realizado recorrendo aos *softwares* do ANSYS: *Workbench*, *spaceclaim* e *Fluent with meshing*.

### Geometria

Inicializando o projeto, foi primeiro definida a geometria do fluido em estudo usando o *spaceclaim*, tendo sido definido que o comprimento do tubo seria equivalente a  $l = 8 \times D = 240\text{mm}$  de tubo onde pensa-se que o escoamento terá desenvolvido completamente e a distância da entrada B como sendo equivalente a  $d_z = d_y = D = 30\text{mm}$ .

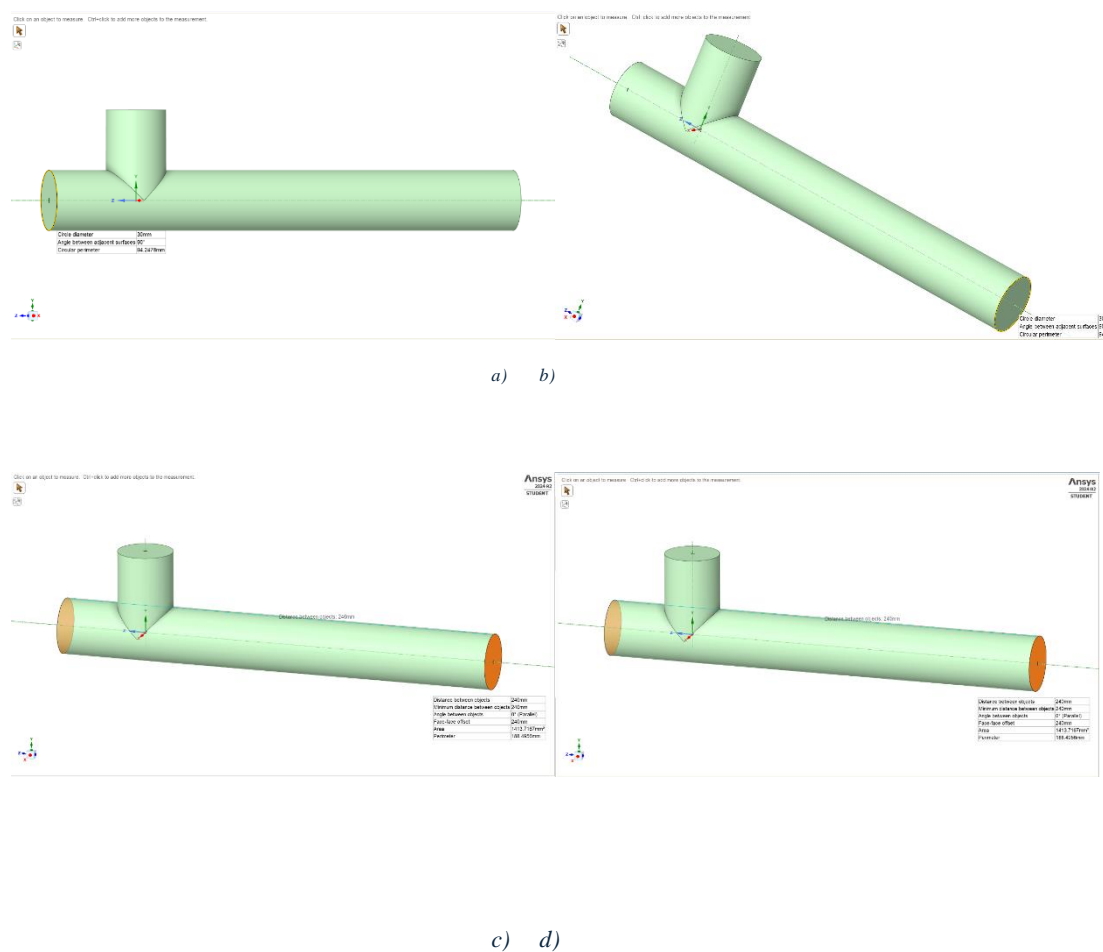


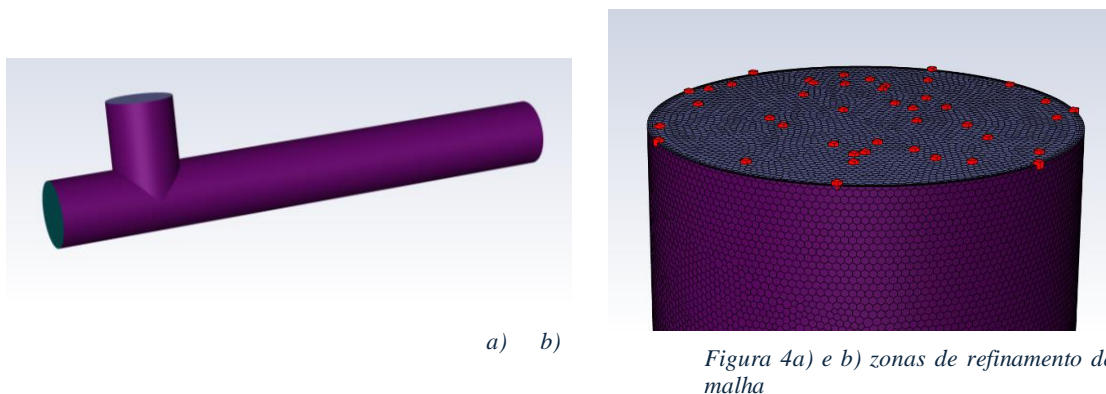
Figura 3 a, b, c & d: geometria do fluido

De seguida, com a geometria completamente definida, são definidos os grupos de interface que serão usados nas próximas fases, as entradas tendo sido agrupadas como “*inlet-a e inlet-b*”, a saída como “*outlet*” e as superfícies cilíndricas como “*wall*”, assim, aquando da criação das zonas de fronteira o software reconhecerá as zonas pelas denominações.



## Criação da malha

Em seguida, a geometria foi importada para o *Fluent with meshing*, onde foram definidas zonas de refinamento de malha nas entradas, saída e nas superfícies externas, por serem zonas de fronteira merecendo maior atenção, usando nas entradas, saída e nas superfícies externas *target mesh size*=0.5mm, resultando assim a malha das superfícies.



Foi, de seguida, definido o tipo de geometria, as zonas de fronteira da malha, que a geometria descreve um fluido, e as transições como suaves, tendo 3 camadas de transição que definem a zona de camada limite da interação entre o fluido e a sua vizinhança, definindo também a malha geral com *max cell length* =6.96204mm e elementos tetraédricos, resultando assim a malha completa do fluido.

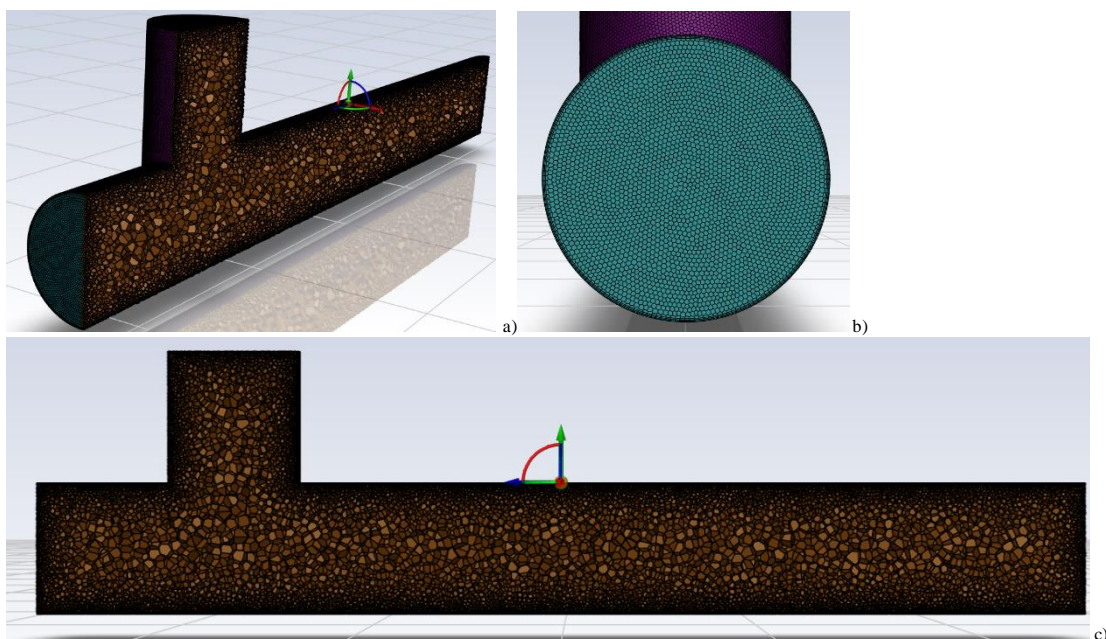


Figura 5 a), b), c) Malha completa resultante

Assim, a malha resultante apresenta as seguintes características:

Número de células	Número de nodos	Número de faces
756473	3178943	4118544

### 3. Método de cálculo

Após terminada a criação da malha de cálculo, segue-se a preparação do modelo de cálculo, usando o modelo de Energia ativo, modelo viscoso *k-epsilon* e o “*Pressure-velocity coupling scheme: COUPLED*”, e onde foram definidas as variáveis a ser usadas, nomeadamente a temperatura, pressão, velocidade, força e fluxo de massa, sendo definido um máximo de 350 iterações e como forma de análise de convergência, foi definido que os residuais deveriam atingir  $10^{-6}$  como máximo. Foi também definido que o fluido em estudo é o ar, com as características que seguem na Figura 6.

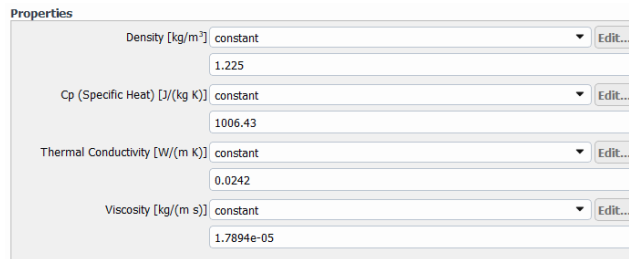


Figura 6 Propriedades do ar no modelo de calculo

### 4. Resultados e análise

Após 220 iterações a foi obtida uma solução convergida com todos os residuais abaixo de  $1e-06$ , sendo assim, dá uma indicação que os resultados obtidos podem estar próximos do real, dando uma imagem mais próxima do fenómeno real.

De seguida, pode ser feita análise dos resultados obtidos.

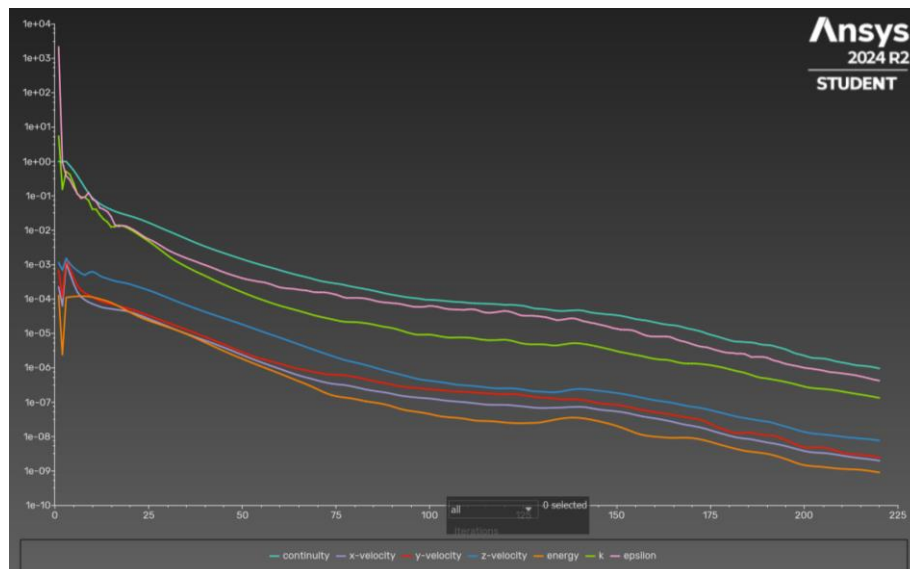


Figura 7 Gráfico resultante dos residuais calculados

## Conservação da massa

Como é possível verificar, existe conservação da massa de ar, visto que o valor da soma dos fluxos de massa (sendo os de entrada positivos e os de saída negativos) é vestigial, oriundo de incertezas do cálculo.

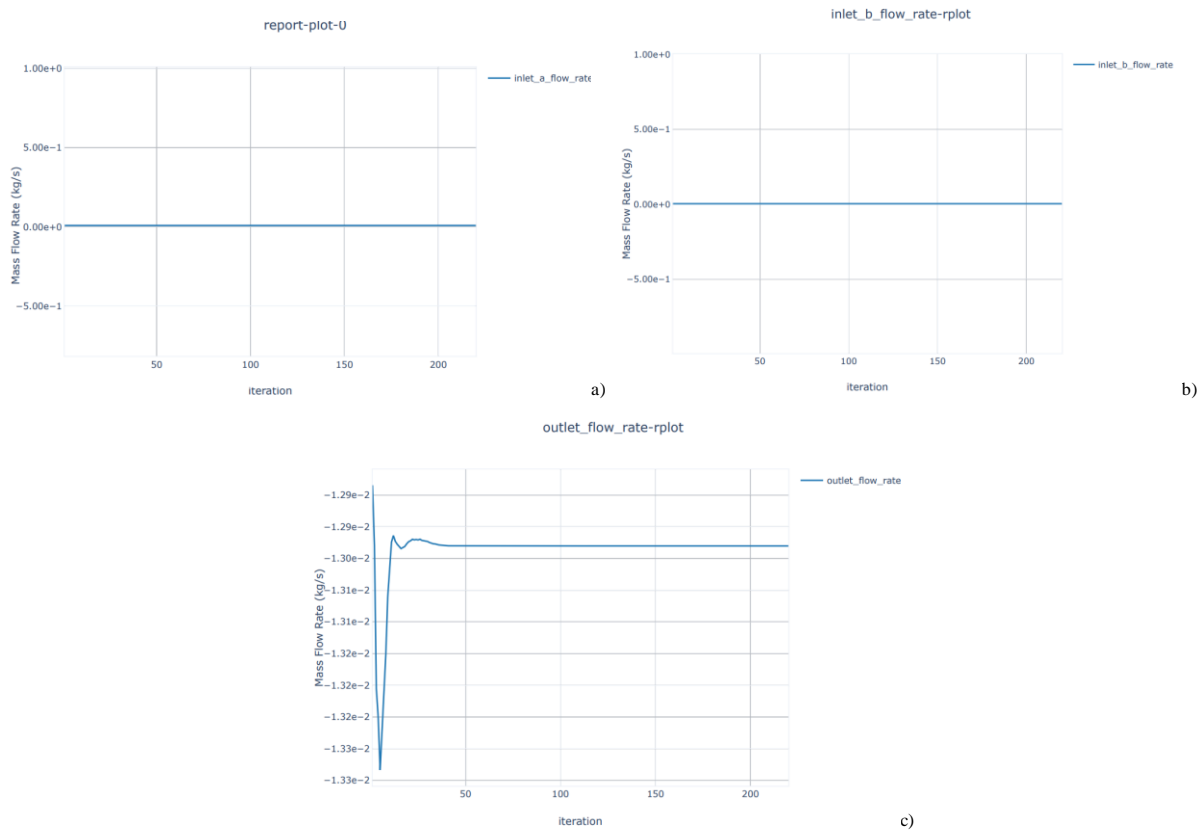


Figura 8 Gráfico resultante do calculo dos fluxos de massa

Fluxo de massa obtido para o inlet A:	$8.6536699 \times 10^{-3} \text{ (kg/s)}$
Fluxo de massa obtido para o inlet B:	$4.3265824 \times 10^{-3} \text{ (kg/s)}$
Fluxo de massa obtido para o outlet:	$-12.980252 \times 10^{-3} \text{ (kg/s)}$
Fluxo de massa global:	$-1.5879034 \times 10^{-10} \text{ (kg/s)}$

## Campo de Velocidades

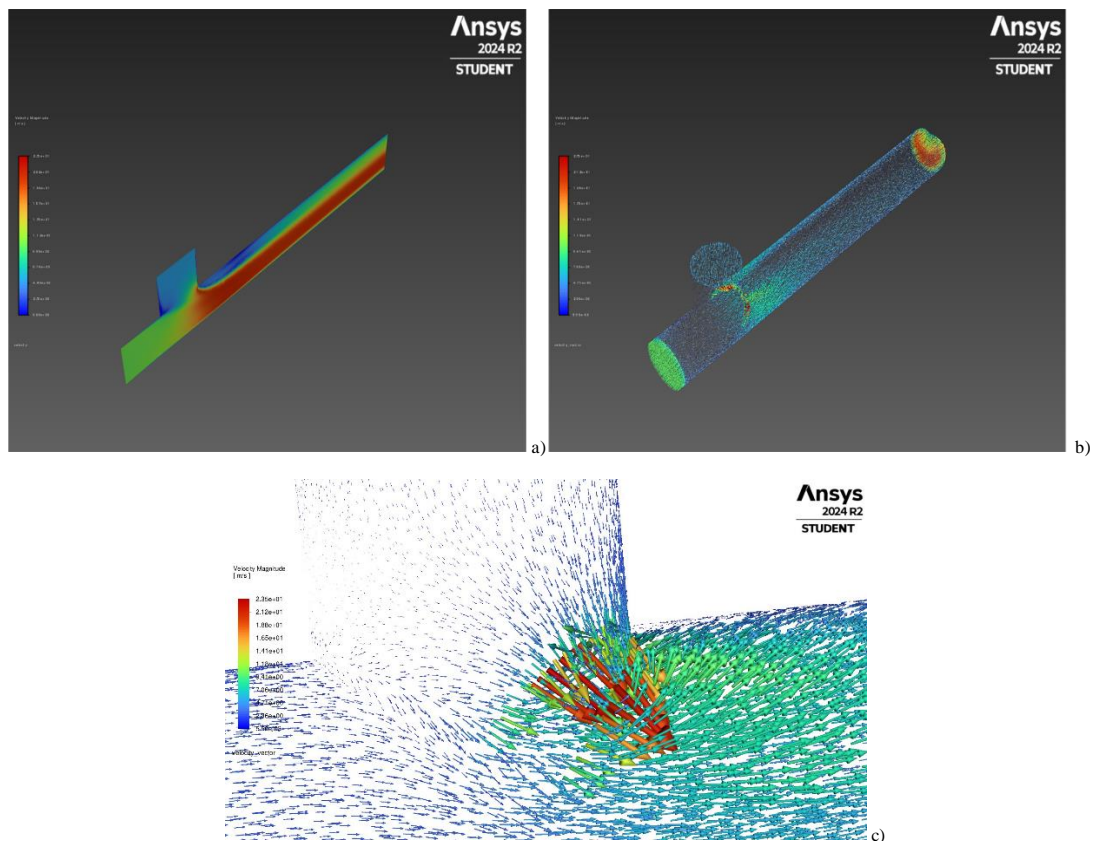


Figura 9 a) Contornos e b) Vetores da velocidade no escoamento; c) imagem mais próxima dos vetores de velocidade

A partir da análise do campo de velocidades obtido, é de notar que apesar do comprimento do tubo ser 8 vezes o diâmetro, o escoamento não chega a desenvolver completamente, uma vez que na saída não existe ainda um campo uniforme de velocidades, sendo notório que a parte superior apresenta velocidades mais baixas em relação a parte inferior, apesar de que a média das velocidades na saída corresponde à soma das velocidades na entrada  $v_{med} = 15.2 \text{ m/s}$ , o que indica que os resultados estão de acordo com o esperado.

Um outro indicador da qualidade dos resultados obtidos é a velocidade junto as superfícies do escoamento, que sendo muito baixa, prova o cumprimento da condição de não escorregamento nas paredes.

## Campo de pressões

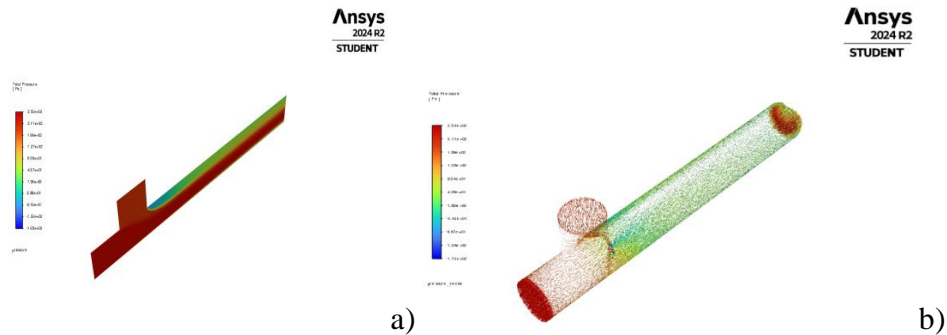


Figura 10 a) Contornos e b) Vetores da pressão no escoamento

A partir deste campo, pode-se perceber que a pressão ao longo do escoamento diminui com o comprimento da conduta, indicando assim as perdas de pressão que ocorrem no escoamento, disto resulta uma diferença de pressões entre cada uma das entradas em relação a saída, representadas abaixo.

Pressão de inlet A:	244.2427 Pa
Pressão de inlet B:	197.11902 Pa
Pressão de outlet:	147.39415 Pa

$$\Delta P_{inlet A \rightarrow outlet} = 96.84855 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{inlet B \rightarrow outlet} = 49.72487 \text{ Pa}$$

De seguida, esses valores foram usados para o cálculo das perdas de carga, em linha (3) e localizadas na curva (4), sendo que a velocidade usada é  $v_{max} = 22.5 \text{ m/s}$ , a máxima velocidade obtida ao longo do escoamento.

$$\Delta P_A = \frac{fLv^2}{2gD} \rightarrow f = 0.43 \quad (3)$$

$$\Delta P_B = K \frac{1}{2g} v^2 \rightarrow K = 1.766 \quad (4)$$

Assim, sendo obtidos os valores dos coeficientes de perda, pode-se notar que o valor da perda localizada na curva, encontra-se longe dos valores teóricos retirados em [4], isto porque dado o comprimento da conduta, ao cálculo da perda de carga localizada, acresce as perdas em linha em relação a este coeficiente, ou seja, de forma a melhor calcular este coeficiente, a pressão usada deverá ser num plano mais próximo à curva. Entretanto, o valor das perdas em linha em relação a entrada A, está mais próximo do esperado, o que indica que estão bem calculados.

### c. Tees

Line flow, flanged	0.2
Line flow, threaded	0.9
Branch flow, flanged	1.0
Branch flow, threaded	2.0

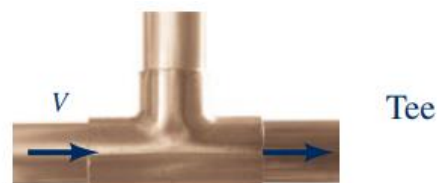


Figura 11 Representação teórica dos coeficientes de perda de carga

## Campo de Temperaturas

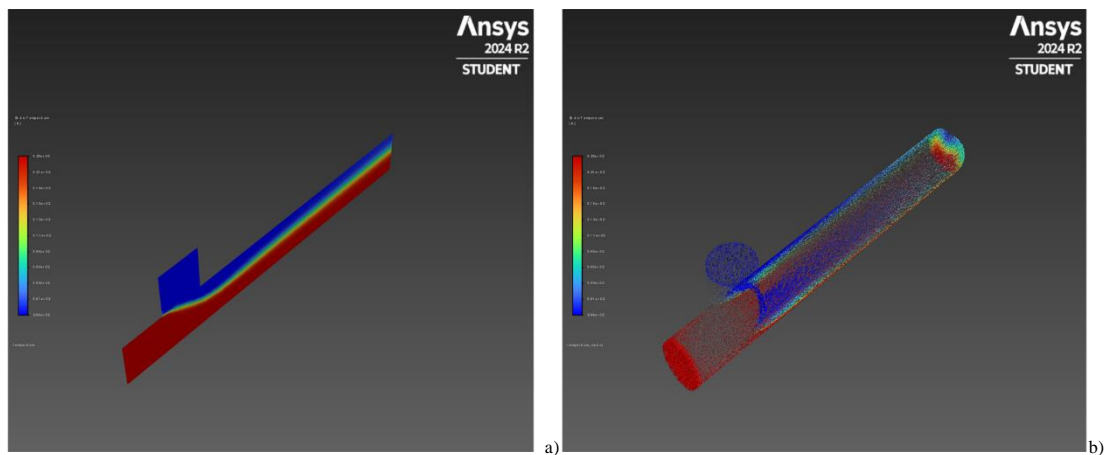


Figura 12 Contornos e b) Vetores da Temperatura no escoamento

Em relação às variações de temperatura ao longo do escoamento, pode-se notar que tal como a velocidade, as temperaturas maiores encontram-se na zona inferior do escoamento, demonstrando que até a saída, o escoamento ainda não se encontra completamente desenvolvido, ainda assim, foi possível verificar que a temperatura média na saída do escoamento é de 40.552°C, que se encontra entre os 50°C e os 25°C das duas entradas, estando assim dentro dos valores esperados.

É necessário ainda mencionar que o facto da temperatura ser inferior na zona superior do escoamento, é pelo fato da temperatura da entrada B ser inferior a entrada A, e é ainda perceptível a zona de mistura do ar.

## Forças

As forças computadas são o total das forças em cada direção, sendo assim, forças de igual intensidade, mas de sentidos opostos são anuladas, disto resulta:

$F_x$	$-1.7933558 \cdot 10^{-5} \text{ N}$
$F_y$	$-1.5111344 \text{ N}$
$F_z$	$-0.008059379 \text{ N}$

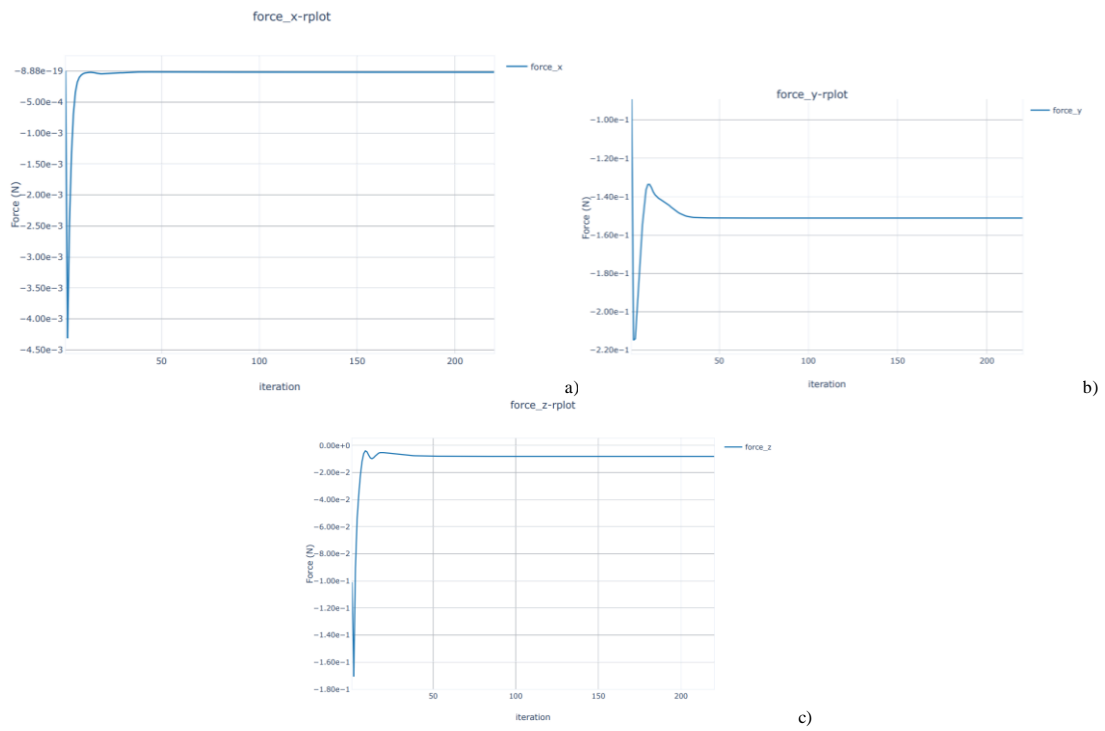


Figura 13- Gráficos resultantes do cálculo das forças



## 5. Modelo simplificado

Foi também feito um modelo 3D com simetrias de forma a agir como um modelo 2D, com os mesmos parâmetros de mesh que o modelo principal.

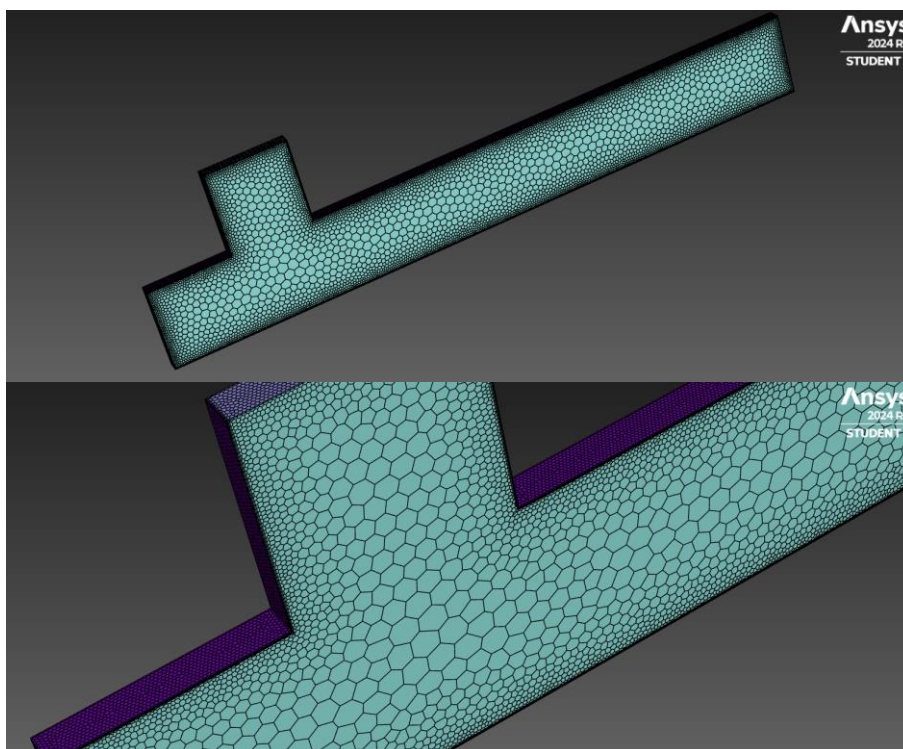


Figura 14- Mesh do modelo simplificado

Número de células	Número de nodos	Número de faces
100244	401849	551511

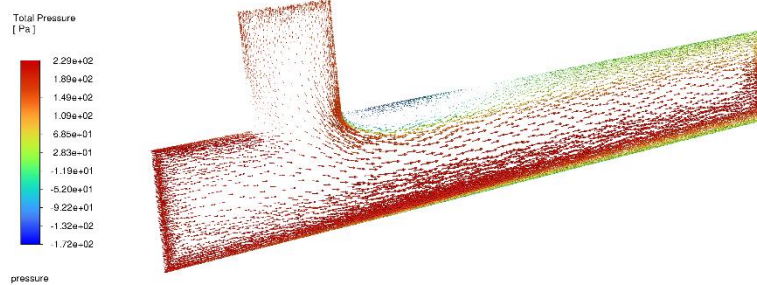
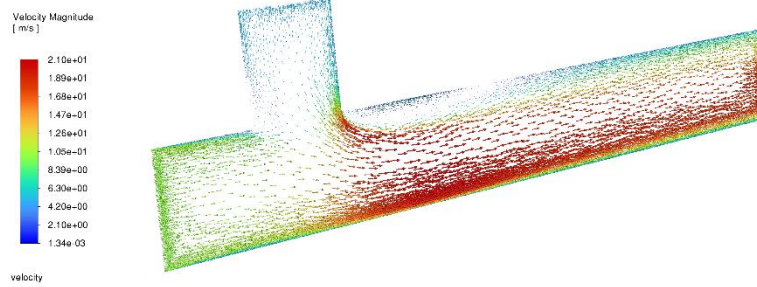
Este modelo convergiu em apenas 155 iterações, sendo que cada iteração demorou consideravelmente menos tempo a realizar

### Comparação de valores

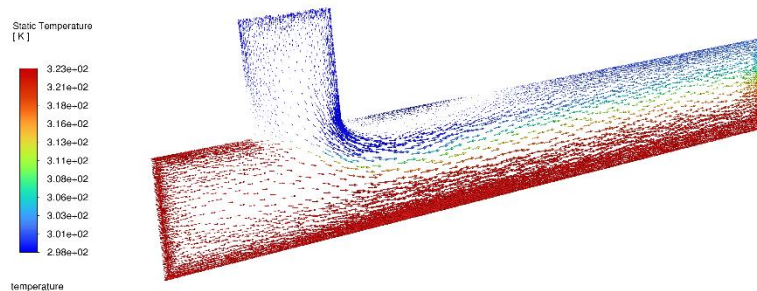
Dado que o fluxo de massa e força dependem do formato e dimensões do modelo, estes não fazem sentido ser abordados.

	Modelo Original	Modelo Simplificado
Pressão de inlet A:	244.2427 Pa	217.8503
Pressão de inlet B:	197.11902 Pa	174.4059
Pressão de outlet:	147.39415 Pa	147.1982
Temperatura outlet:	313.7026 K	313.4944 K





*Figura 17- Pressão modelo simplificado*



*Figura 15- Temperatura modelo simplificado*

Como se pode ver, os valores obtidos por este modelo encontram-se razoavelmente parecidos, embora que por vezes ainda variem um bocado (nomeadamente na pressão), sendo assim, na ocasião de se necessitar de um modelo rápido, simples, sem grande precisão e não dependente do formato, o modelo pseudo-2D é uma opção razoável.

## Conclusão

O estudo do escoamento em uma ligação em T, através de simulações CFD, permitiu uma análise detalhada do comportamento do fluido em diferentes condições. A conservação da massa foi confirmada, demonstrando a validade do modelo numérico aplicado. Embora o escoamento não tenha se desenvolvido completamente ao longo do comprimento do tubo, os campos de velocidade, pressão e temperatura obtidos são compatíveis com o comportamento esperado do fluido. A análise dos coeficientes de perda de carga mostrou coerência com os valores teóricos para escoamentos em linha reta, enquanto os valores para a curva apresentaram desvios devido à complexidade do escoamento. O trabalho demonstra a eficiência do uso de CFD na análise de problemas de escoamento, sendo uma ferramenta essencial para a engenharia aeroespacial, e aponta a necessidade de maior refinamento na malha e na definição dos planos de análise para melhorar a precisão dos resultados obtidos.

## 6. Bibliografia

- [1] V. A. F. Costa, “MECÂNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL para ENGENHARIA AEROSPACIAL Cálculo de escoamentos incompressíveis,” 2024.
- [2] M. Telo Da Gama and R. Coelho, “The Navier-Stokes equation.”
- [3] Y. Okumoto, Y. Takeda, M. Mano, and T. Okada, “Finite Element Method,” *Design of Ship Hull Structures*, pp. 125–140, 2009, doi: 10.1007/978-3-540-88445-3\_7.
- [4] M. Okiishi and H. Rothmayer, “Fluid Mechanics.” [Online]. Available: [www.wileyplus.com](http://www.wileyplus.com)