

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Universidade Nova de Lisboa

Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial

Ventilação Natural

(Estudo de um caso de ventilação natural)

André Assunção Sequeira

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade

Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Professor José Dias

Co-Orientador: Doutor Eric Didier

Monte da Caparica

Junho de 2010

## **Agradecimentos**

A finalização desta dissertação representa o término da vida académica e a entrada numa nova fase da minha vida. É o culminar de um objectivo a que me propus, que não teria sido possível sem a ajuda de um considerável número de pessoas que me rodeiam. A todas estas pessoas o meu sincero obrigado.

A presente dissertação foi realizada sob a orientação do Professor José Fernando de Almeida Dias e sob a co-orientação do Doutor Eric Didier. Desejo expressar os meus sinceros agradecimentos a ambos pela sua dedicação e disponibilidade durante o desenvolvimento da mesma.

Ao departamento de Engenharia Mecânica e Industrial que foi o responsável pela minha formação.

Aos meus pais, à minha irmã e à minha namorada, pelo apoio incondicional que me deram ao longo destes anos.

Aos meus amigos e colegas em especial Bruno Henriques, pela grande amizade demonstrada ao longo destes anos.

Obrigado...



## **Resumo**

O presente estudo teve como objectivo analisar a ventilação natural, recorrendo à simulação numérica. Aborda-se o problema da ventilação natural de um edifício em comunicação com o exterior através de duas aberturas de ventilação. Isto é, para a representação numérica do escoamento tridimensional assumiu-se um edifício de forma cúbica 5x5x5 m, em comunicação com o exterior através de duas aberturas de ventilação.

Apesar dos escoamentos no interior dos edifícios serem promovidos pela acção conjunta do vento natural e da libertação de calor, para o referido estudo o escoamento só será promovido pela acção do vento natural.

Por fim, com os resultados das várias simulações, teve-se como objectivo caracterizar as perdas de carga nas aberturas de ventilação, e nomeadamente, a influência da porosidade na perda de carga.

**Palavras-chave:** Ventilação natural, CFD, perda de carga



## **Abstract**

The present study has the objective the analysis (appealing to numerical simulation) the natural ventilation, approaching the problem of natural ventilation of a building communicating with the exterior through two ventilated openings. Furthermore, for the numerical representation of the three-dimensional outflow, the assumption was that the building had the cubic form of 5x5x5m, communicating with the exterior through two ventilated opening.

Although the outflow of the interior of the buildings is being promoted by both natural and heat discharge, for the referred study, only the natural wind will be approached.

Finally, with the results of several experiments, the major objective was the characterization of cargo losses in the ventilation openings, namely the influence of the porosity when losing weight.

**Key-Words:** Natural Ventilation, CFD, Losing weight



# Índice Geral

1. Introdução .....	1
1.1 Considerações Gerais .....	1
1.1.1 Carga Térmica .....	2
1.1.2 Funcionamento da Ventilação Natural .....	2
1.1.3 Especialização em ventilação Natural .....	3
1.1.4 Vantagens da Ventilação Natural .....	4
1.1.5 Inconvenientes da Ventilação Natural .....	4
1.1.6 Vento .....	4
1.2 Objectivo .....	5
2. Modelação Numérica.....	7
2.1 Equações fundamentais .....	7
2.2 Equações de Reynolds .....	9
2.3 Modelo de turbulência k- $\epsilon$ .....	10
2.4 Forma Linearizada das Equações Discretizadas.....	12
2.5 Esquema Numérico.....	13
2.6 Malha .....	16
3. Escoamento de Ventilação Natural.....	17
3.1 Caso de estudo .....	17
3.1.1 Domínio computacional e sua discretização .....	19
3.1.2 Condições de fronteira.....	22
3.1.3 Parâmetros da modelação numérica .....	22
3.2 Resultados numéricos .....	24

4.Características da perda de carga nas aberturas.....	59
4.1 Pressão média nas aberturas de ventilação .....	59
4.1.1 Cubo opaco .....	59
4.1.2 Pressão média exterior e interior nas aberturas .....	65
4.2 Coeficiente da perda de carga nas aberturas.....	74
5. Conclusões.....	79
6. Referências Bibliográficas.....	81
7. Anexos.....	83

## Índice de Figuras

Figura 2.1- Célula genérica em três dimensões.....	12
Figura 2.2- Esquema de interpolação QUICK.....	13
Figura 2.3- Algoritmo SIMPLE.....	15
Figura 3.1-Dimensões do cubo.....	18
Figura 3. 2-Caso de estudo.....	18
Figura 3. 3-Domínio Computacional.....	19
Figura 3. 4-Malha do domínio computacional.....	20
Figura 3. 5-Discretização vertical: plano $Y=0m$ .....	21
Figura 3. 6-Discretização horizontal: plano $Z=2,5m$ .....	21
Figura 3. 7-Campo de pressão para o plano de simetria ( $Y=0m$ ).....	24
Figura 3. 8- Campo de velocidade segundo a componente x, para o plano de simetria ( $Y=0m$ ).....	26
Figura 3. 9-Linhas de corrente referente ao cubo opaco.....	28
Figura 3. 10- Linhas de corrente referente à abertura 2,5%.....	28
Figura 3. 11- Linhas de corrente referente à abertura 5%.....	28
Figura 3. 12- Linhas de corrente referente à abertura 7,5%.....	29
Figura 3. 13- Linhas de corrente referente à abertura 10%.....	29
Figura 3. 14- Linhas de corrente referente à abertura 15%.....	29
Figura 3. 15-Campo de pressão nos planos $Z1=0,68m$ e $Z2=4,32m$ , modelo opaco.....	31
Figura 3. 16- Campo de pressão nos planos médios das aberturas ( $Z1=0,4m$ e $Z2=4,6m$ ), correspondentes a 2,5% da área da fachada.....	31
Figura 3. 17- Campo de pressão nos planos médios das aberturas ( $Z1=0,56m$ e $Z2=4,44m$ ), correspondentes a 5% da área da fachada.....	31

Figura 3. 18- Campo de pressão nos planos médios das aberturas ( $Z_1=0,68\text{m}$ e $Z_2=4,32\text{m}$ ), correspondentes a 7,5% da área da fachada .....	32
Figura 3. 19- Campo de pressão nos planos médios das aberturas ( $Z_1=0,8\text{m}$ e $Z_2=4,2\text{m}$ ), correspondentes a 10% da área da fachada .....	32
Figura 3. 20- Campo de pressão nos planos médios das aberturas ( $Z_1=0,98\text{m}$ e $Z_2=4,02\text{m}$ ), correspondentes a 15% da área da fachada .....	32
Figura 3. 21- Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x nos planos $Z_1=0,68\text{m}$ e $Z_2=4,32\text{m}$ , modelo opaco .....	34
Figura 3. 22- Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x nos planos médios das aberturas ( $Z_1=0,4\text{m}$ e $Z_2=4,6\text{m}$ ), correspondentes a 2,5% da área da fachada.....	34
Figura 3. 23- Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x nos planos médios das aberturas ( $Z_1=0,56\text{m}$ e $Z_2=4,44\text{m}$ ), correspondentes a 5% da área da fachada.....	34
Figura 3. 24- Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x nos planos médios das aberturas ( $Z_1=0,68\text{m}$ e $Z_2=4,32\text{m}$ ), correspondentes a 7,5% da área da fachada.....	35
Figura 3. 25- Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x nos planos médios das aberturas ( $Z_1=0,8\text{m}$ e $Z_2=4,2\text{m}$ ), correspondentes a 10% da área da fachada.....	35
Figura 3. 26- Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x nos planos médios das aberturas ( $Z_1=0,98\text{m}$ e $Z_2=4,02\text{m}$ ), correspondentes a 15% da área da fachada.....	35
Figura 3. 27- Campo de pressão em vários planos transversais, modelo opaco.....	37

Figura 3. 28- Campo de pressão em vários planos transversais, aberturas referentes a 2,5%	37
.....	
Figura 3. 29- Campo de pressão em vários planos transversais, aberturas referentes a 5%	37
Figura 3. 30- Campo de pressão em vários planos transversais, aberturas referentes a 7,5%	38
.....	
Figura 3. 31- Campo de pressão em vários planos transversais, aberturas referentes a 10%	38
.....	
Figura 3. 32- Campo de pressão em vários planos transversais, aberturas referentes a 15%	38
.....	
Figura 3. 33- Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x em vários planos transversais, modelo opaco	40
.....	
Figura 3. 34- Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x em vários planos transversais, aberturas referentes a 2,5%	40
.....	
Figura 3. 35- Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x em vários planos transversais, aberturas referentes a 5%	40
.....	
Figura 3. 36- Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x em vários planos transversais, aberturas referentes a 7,5%	41
.....	
Figura 3. 37- Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x em vários planos transversais, aberturas referentes a 10%	41
.....	
Figura 3. 38- Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x em vários planos transversais, aberturas referentes a 15%	41
.....	
Figura 3. 39- Bolha de recirculação.....	42
Figura 3. 40- Variação do comprimento da bolha de recirculação, face ao modelo opaco	43
Figura 3. 41- Variação do comprimento do centro da bolha de recirculação, face ao modelo opaco.....	43

Figura 3. 42- Variação da altura do centro da bolha de recirculação, face ao modelo opaco .....	44
Figura 3. 43- Plano X=27,5m .....	44
Figura 3. 44- Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 2,5%, plano X=27,5m...	45
Figura 3. 45- Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 15%, plano X=27,5m....	45
Figura 3. 46- Planos médios das aberturas .....	46
Figura 3. 47- Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 2,5%, plano médio que contêm a abertura 1.....	47
Figura 3. 48- Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 15%, plano médio que contêm a abertura 1.....	47
Figura 3. 49- Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 2,5%, plano médio que contêm a abertura 2.....	48
Figura 3. 50- Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 15%, plano médio que contêm a abertura 2.....	48
Figura 3. 51- Plano de simetria (Y=0m) e plano Y=1,25m.....	49
Figura 3. 52- Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 2,5%, plano de simetria	50
Figura 3. 53- Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 15%, plano de simetria .	50
Figura 3. 54- Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 2,5%, plano Y=1,25m...	51
Figura 3. 55- Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 15%, plano Y=1,25m....	51
Figura 3. 56- Linhas de corrente, referentes ao caso opaco, plano de simetria.....	52
Figura 3. 57- Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 15%, plano Y=0m.....	52
Figura 3. 58- Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 15%, plano X=27,5m....	53
Figura 3. 59- Linhas de corrente, referentes ao caso opaco, plano X=27,5m .....	53
Figura 3. 60- Vários planos transversais, (X=30m; 35m; 40m; 45m).....	54
Figura 3. 61- Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 15%, plano X=30m.....	55

Figura 3. 62- Linhas de corrente, referentes ao caso opaco, plano X=30m .....	55
Figura 3. 63- Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 15%, plano X=35m.....	56
Figura 3. 64- Linhas de corrente, referentes ao caso opaco, plano X=35m .....	56
Figura 3. 65- Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 15%, plano X=40m.....	57
Figura 3. 66- Linhas de corrente, referentes ao caso opaco, plano X=40m .....	57
Figura 3. 67- Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 15%, plano X=45m.....	58
Figura 3. 68- Linhas de corrente, referentes ao caso opaco, plano X=45m .....	58
Figura 4. 1- Pressão média exterior na zona da abertura a montante (cubo opaco), caso 2,5% .....	60
Figura 4. 2- Pressão média exterior na zona da abertura a jusante (cubo opaco), caso 2,5% .....	60
Figura 4. 3- Pressão média exterior na zona da abertura a montante (cubo opaco), caso 5% .....	61
Figura 4. 4- Pressão média exterior na zona da abertura a jusante (cubo opaco), caso 5%	61
Figura 4. 5- Pressão média exterior na zona da abertura a montante (cubo opaco), caso 7,5% .....	62
Figura 4. 6- Pressão média exterior na zona da abertura a jusante (cubo opaco), caso 7,5% .....	62
Figura 4. 7- Pressão média exterior na zona da abertura a montante (cubo opaco), caso 10% .....	63
Figura 4. 8- Pressão média exterior na zona da abertura a jusante (cubo opaco), caso 10% .....	63
Figura 4. 9- Pressão média exterior na zona da abertura a montante (cubo opaco), caso 15% .....	64

Figura 4. 10- Pressão média exterior na zona da abertura a jusante (cubo opaco), caso 15% .....	64
Figura 4. 11- Pressão média exterior e interior na abertura a montante, caso 2,5% .....	66
Figura 4. 12- Pressão média exterior e interior na abertura a jusante, caso 2,5% .....	66
Figura 4. 13- Pressão média exterior e interior na abertura a montante, caso 5% .....	67
Figura 4. 14- Pressão média exterior e interior na abertura a jusante, caso 5% .....	67
Figura 4. 15- Pressão média exterior e interior na abertura a montante, caso 7,5% .....	68
Figura 4. 16- Pressão média exterior e interior na abertura a jusante, caso 7,5% .....	68
Figura 4. 17- Pressão média exterior e interior na abertura a montante, caso 10% .....	69
Figura 4. 18- Pressão média exterior e interior na abertura a jusante, caso 10% .....	69
Figura 4. 19- Pressão média exterior e interior na abertura a montante, caso 15% .....	70
Figura 4. 20- Pressão média exterior e interior na abertura a jusante, caso 15% .....	70
Figura 4. 21- Pressão média exterior a montante (x=24,5m) .....	72
Figura 4. 22- Pressão média exterior a jusante (x=31m).....	72
Figura 4. 23- Pressão média interior.....	73
Figura 4. 24- Diferença de pressão nas aberturas ( $\Delta P$ ) .....	73
Figura 4. 25- Perda de carga nas aberturas ( $\Delta P$ ) .....	76
Figura 4. 26- Perda de carga nas aberturas $\Delta P$ * .....	76

## Índice de Tabelas

Tabela 2. 1-Coefficientes do Esquema de interpolação QUICK.....	14
Tabela 3. 1-Parâmetros da bolha de recirculação .....	42
Tabela 4. 1-Pressão média exterior e interior e diferença de pressão nas aberturas.....	71
Tabela 4. 2-Pressão no centro, pressão média exterior e diferença de pressão nas aberturas .....	71
Tabela 4. 3-Valores das áreas, do caudal mássico e das velocidades médias nas aberturas .....	74
Tabela 4. 4-Perda de carga nas aberturas, considerando $\Delta P$ . .....	75
Tabela 4. 5- Perda de carga nas aberturas, considerando $\Delta P$ * .....	75



# 1. Introdução

## 1.1 Considerações Gerais

O objectivo da ventilação é de manter as condições da velocidade, da temperatura e da pureza do ar no interior das construções dentro de parâmetros considerados aceitáveis, quer para o conforto humano, quer para os processos de fabrico neles existentes, assegurando assim, um ambiente mais saudável e confortável. Trata-se de um método de fornecer ar novo a um espaço interior, de modo a remover poluentes e odores, ou seja, existe uma substituição do ar no interior pelo ar limpo do exterior. Esta renovação do ar, pode gerar desconforto devido às grandes perdas térmicas e a velocidades elevadas do escoamento interior (correntes de ar).

Existem dois tipos de ventilação a *ventilação natural* e *ventilação forçada*. A ventilação do ar no interior dos edifícios pode ser promovida por efeitos naturais (ventilação natural), através das diferenças de temperaturas entre o interior e o exterior e as diferenças de pressão entre fachadas promovidas pela acção do vento, ou por ventiladores mecânicos (ventilação forçada).

Existe uma crescente preocupação ambiental de poupança energética que leva a incorporação aos projectos de edificações conceitos de arquitectura que promovam a ventilação natural, possibilitando uma redução no consumo de energia face à ventilação forçada. Esta estratégia terá em conta as condições climáticas do local e da interacção do edifício com o clima, proporcionando a adequação do edifício ao clima. Esta concepção tem assim como objectivo tirar o máximo partido das condições climáticas de um determinado local.

### **1.1.1 Carga Térmica**

Todos os edifícios estão sujeitos a uma carga térmica interna, libertação de calor que se vai acumulando por um lado devido ao processo de produção, provenientes de máquinas presentes, equipamentos e iluminação e por outro em virtude das pessoas e do tipo de trabalho realizado. A própria construção do edifício (vidros, paredes), bem como o Sol, influenciam a carga térmica, sendo por vezes necessário remover de forma eficaz o excesso de calor. Sendo assim, a ventilação assume um papel importante, tanto no verão para o arrefecimento nocturno, como no inverno para evitar humidade.

### **1.1.2 Funcionamento da Ventilação Natural**

O ar quente sobe e forma uma camada térmica abaixo do telhado. Esta camada de calor, aumenta cada vez mais, até que a temperatura elevada acaba por atingir os níveis inferiores, distribuindo-se por todo o edifício.

Aberturas no ponto mais alto possível permitem eliminar o calor com maior eficiência e em intervalos de tempo menores do ar viciado. Aberturas em níveis mais baixos permitem a entrada de ar fresco.

O movimento de uma dada massa de ar é induzido por um diferencial de pressões, ou seja, em edifícios é a diferença de pressões entre os dois lados de uma qualquer abertura que promove o fluxo de ar que constitui a ventilação. Este diferencial de pressões ocorre devido a dois processos físicos:

- i)* Térmico – devido à diferença de temperaturas entre o interior e o exterior, e
- ii)* Eólico – devido à conversão da energia cinética do vento em pressão estática sobre a envolvente do edifício.

Pode-se considerar dois esquemas globais de ventilação:

- i)* em fachada única – em que todas as aberturas se encontram na mesma fachada, e
- ii)* cruzada – em que as aberturas se encontram em fachadas opostas ou adjacentes. Uma pressão positiva do lado do vento e/ou uma depressão do lado oposto do edifício provoca um movimento de ar, no sentido de onde sopra o vento para o lado oposto.

### **1.1.3 Especialização em ventilação Natural**

Têm-se observado um desenvolvimento tanto no cálculo, como no design de sistemas de ventilação, assim como, na especialização em programas que permitem uma boa observação de resultados. Um dos aspectos em ter em consideração por parte das empresas é o conforto das pessoas, de modo a aumentar os seus níveis de produtividade e a garantir a sua saúde. Sendo assim, para auxiliar as empresas de construção no âmbito de uma arquitectura adequada ao clima, de modo a garantir o conforto das pessoas, deve-se ter em consideração os seguintes aspectos:

- i)* Escolha dos dados climáticos para o projecto do ambiente térmico;
- ii)* Conhecimento do clima local, principalmente em termos das variáveis de que é função o conforto térmico (temperatura do ar, humidade relativa do ar, radiação solar e ventos);
- iii)* Adopção de cuidados arquitectónicos, de modo a que a edificação seja adequada ao clima e às funções do edifício;
- iv)* Conhecimento da geração térmica provocada pelo processo que a edificação irá abrigar.

#### **1.1.4 Vantagens da Ventilação Natural**

- i)* Auto-regulação: quanto maior for o calor libertado, maior a quantidade eliminada;
- ii)* Entrada adicional de luz diurna pelas aberturas;
- iii)* As aberturas garantem o contacto com o exterior, provocando um efeito positivo nas pessoas;
- iv)* Não provoca problemas de saúde;
- v)* Funcionamento sem ruído;
- vi)* Requer uma menor manutenção;
- vii)* Sem que sejam necessárias instalações adicionais o sistema pode ser igualmente utilizado como um sistema automático de remoção de fumos e calor.

#### **1.1.5 Inconvenientes da Ventilação Natural**

- i)* O controlo dos caudais de ar é muito difícil, devido ao carácter aleatório das forças da natureza;
- ii)* Em ambientes urbanos tanto a qualidade do ar exterior como o ruído são péssimos transmitindo-se, por consequência, ao interior do edifício;
- iii)* Dependência das condições climatéricas.

#### **1.1.6 Vento**

O vento que auxilia à ventilação natural é o mesmo que age como agente erosivo, actuando ou pressionando sobre as fachadas dos edifícios. A interacção do vento com as edificações é extremamente difícil de caracterizar, visto que, o escoamento do ar nas camadas inferiores da atmosfera à superfície da Terra, designada por Camada Limite está longe de ser deduzida.

## 1.2 Objectivo

O objectivo principal neste trabalho consiste em analisar o comportamento do escoamento aerodinâmico no interior e exterior de um edifício. Para o referido estudo recorre-se á Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) que permite a resolução de problemas práticos em engenharia tais como na termodinâmica, hidráulica e aerodinâmica.

As análises nestas áreas de pesquisa podem ser desenvolvidas com base em experiências e métodos teóricos. Dentro dos métodos teóricos destacam-se os métodos computacionais, utilizados para simulação numérica aplicada à Dinâmica dos Fluidos.

Neste âmbito a simulação numérica da ventilação natural é precedida com o auxílio do software FLUENT, um programa numérico da CFD, onde se utilizou um modelo de turbulência  $k-\epsilon$  para simular um escoamento turbulento.

Para tal simulação, foi escolhido um caso simples, que consiste no estudo do escoamento num espaço cúbico. Simulou-se um escoamento em torno de um cubo opaco e um escoamento exterior/interior, promovido pela acção do vento exterior, introduzido no espaço cúbico, quando na presença de aberturas. As aberturas encontram-se em faces opostas.

Foi considerado, diversas porosidades da fachada, desde 2,5% até 15%. Porosidade essa, que é igual à relação entre a área da abertura e a área da fachada, isto é,

$$(P = A_{abertura}/A_{fachada}).$$

No presente estudo considerou-se o escoamento como sendo isotérmico.

Por fim, com os resultados das várias simulações, teve-se como objectivo caracterizar as perdas de carga nas aberturas de ventilação, e nomeadamente a influência da porosidade na perda de carga.

No capítulo 2, faz-se a introdução das equações fundamentais e do modelo  $k-\epsilon$ , de modo a descrever o escoamento turbulento.

No capítulo 3, simula-se recorrendo à Dinâmica de Fluidos Computacional um simples caso de ventilação natural. Isto é, representa-se um escoamento tridimensional em torno e no interior de um edifício, sujeito a duas aberturas de ventilação.

No capítulo 4, caracteriza-se a perda de carga nas aberturas de ventilação.

## 2. Modelação Numérica

### 2.1 Equações fundamentais

O movimento dos fluidos é descrito por um sistema de equações diferenciais, conhecida como as equações de Navier-Stokes [6]. Em coordenadas cartesianas e para um fluido newtoniano, o sistema é constituído pela equação diferencial da conservação de massa expressa por:

$$\frac{\partial \check{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial(\check{\rho}\check{v}_i)}{\partial x_i} = 0, \quad \text{Eq.2-1}$$

e pela equação diferencial da conservação da quantidade de movimento, para cada uma das direcções do espaço descrito da seguinte forma:

$$\frac{\partial \check{\rho}\check{v}_i}{\partial t} + \frac{\partial(\check{\rho}\check{v}_i\check{v}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \check{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \check{\mu} \left( \frac{\partial \check{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \check{v}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \check{v}_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right) \right] + \check{\rho} g_j \quad \text{Eq.2-2}$$

onde:

- $\check{\rho}$  designa a massa específica do fluido
- $\check{v}_i = \check{v}\hat{i} + \check{u}\hat{j} + \check{w}\hat{k}$  é o vector velocidade instantânea do fluido
- $\check{p}$  é a pressão termodinâmica instantânea
- $\delta_{ij}$  é o delta de Kronecker
- $t$  é o tempo
- $\check{\mu}$  é a viscosidade dinâmica do fluido
- $g$  designa a aceleração gravítica

Como no presente estudo não se considerou os efeitos térmicos, o escoamento é isotérmico, não sendo assim, necessário recorrer à equação da energia.

Estas equações são equações instantâneas às derivadas parciais e não têm uma solução analítica genérica: só se conhece a sua solução para casos muito particulares. Para a sua resolução recorre-se assim, à simulação numérica. No entanto permanece a dificuldade: os escoamentos com interesse prático em engenharia, como no caso em estudo, são turbulentos.

A simulação numérica consiste na discretização das equações do espaço e do tempo. Nos escoamentos turbulentos existem perturbações possuidoras de vorticidade, imbuídas de carácter aleatório e de natureza tridimensional, isto é, turbilhões com uma infinidade de escalas de comprimento e de tempo, cuja simulação é inviável pela integração directa das equações de Navier-Stokes, com os recursos computacionais actuais. Uma forma de ultrapassar este problema é a utilização de equações para o escoamento médio turbulento e modelos de turbulência.

## 2.2 Equações de Reynolds

Qualquer quantidade pode ser expressa através do seu valor médio e da sua flutuação associada ao escoamento turbulento [6].

$$\tilde{\Phi}(x_i, t) = \Phi(x_i) + \phi(x_i, t) \quad \text{Eq.2-3}$$

- $\tilde{\Phi}$  é a quantidade instantânea;
- $\Phi$  é o valor médio;
- $\phi$  é a flutuação em torno da média;

onde;

$$\Phi(x_i) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \tilde{\Phi}(x_i, t) \partial t \quad \text{Eq.2-4}$$

Nesta relação,  $t$  é a variável de tempo, e  $T$  é o intervalo onde se calcula a média. Este intervalo de tempo deve ser suficientemente grande, comparativamente com a escala de tempo típica das flutuações.

Aplicando a média temporal nas equações (2-1) e (2-2) e considerando que o escoamento é incompressível, ou seja, que as flutuações da massa específica são desprezáveis, as equações podem ser expressas por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} = 0 \quad \text{Eq.2-5}$$

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{v_i v_j}) + \rho g_j \quad \text{Eq.2-6}$$

As equações (2-5) e (2-6) são as equações para o escoamento médio turbulento, conhecidas como equações de Reynolds. Têm a mesma forma geral das equações instantâneas de Navier-Stokes, mas as variáveis representadas são em valor médio. Nestas equações surgem termos adicionais representativos do efeito da turbulência, o tensor de Reynolds  $-\rho\overline{v_i v_j}$ , que necessita de ser modelado.

O modelo de turbulência utilizado foi o modelo de turbulência a duas equações  $k-\epsilon$ . Este modelo utiliza a hipótese de Boussinesq para descrever o tensor de Reynolds, que é considerado uma propriedade, não do fluido, mas sim do escoamento.

Boussinesq propôs a seguinte aproximação:

$$(-\rho\overline{v_i v_j}) = \mu_t \left( \frac{\partial \overline{v_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{v_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} \frac{\partial \overline{v_i}}{\partial x_i} \quad \text{Eq.2-7}$$

onde,  $\mu_t$  designa a viscosidade turbulenta.

### 2.3 Modelo de turbulência $k-\epsilon$

Existem vários modelos de turbulência, mas na maioria dos casos de estudo de engenharia usa-se o modelo de turbulência  $k-\epsilon$ . Trata-se de um modelo com duas equações de transporte  $k-\epsilon$ , onde  $k$  designa a energia cinética turbulenta e  $\epsilon$  a sua taxa de dissipação. Este modelo assume que o escoamento é completamente turbulento e que os efeitos da viscosidade são desprezáveis face à difusão turbulenta.

O modelo é assim constituído por duas equações diferenciais, correspondentes à energia cinética turbulenta ( $k$ ) e à sua taxa de dissipação ( $\varepsilon$ ) [6]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \varepsilon \quad \text{Eq.2-8}$$

e

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{K} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{K} \quad \text{Eq.2-9}$$

onde,

- $C_{1\varepsilon}$  e  $C_{2\varepsilon}$  são constantes
- $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  representamos números de Prandtl para  $k$  e  $\varepsilon$  respectivamente
- $\mu_t$  representa a viscosidade turbulenta

A viscosidade turbulenta é expressa por:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \mu_t \gg \mu \quad \text{Eq.2-10}$$

Sendo  $C_\mu$  a constante do modelo de turbulência.

As constantes do modelo de turbulência  $k - \varepsilon$ , têm os seguintes valores:

$$C_\mu = 0.09; \quad C_{1\varepsilon} = 1.44; \quad C_{2\varepsilon} = 1.92; \quad \sigma_k = 1.00; \quad \sigma_\varepsilon = 1.30$$

Este modelo apresenta resultados muito aceitáveis, mas é restrito a regiões em que a turbulência é isotrópica. Assim junto das paredes, onde esta condição não se verifica, utiliza-se como condição de fronteira a lei logarítmica ou lei da parede.

## 2.4 Forma Linearizada das Equações Discretizadas

A figura 2.1 ilustra um volume de controlo genérico.

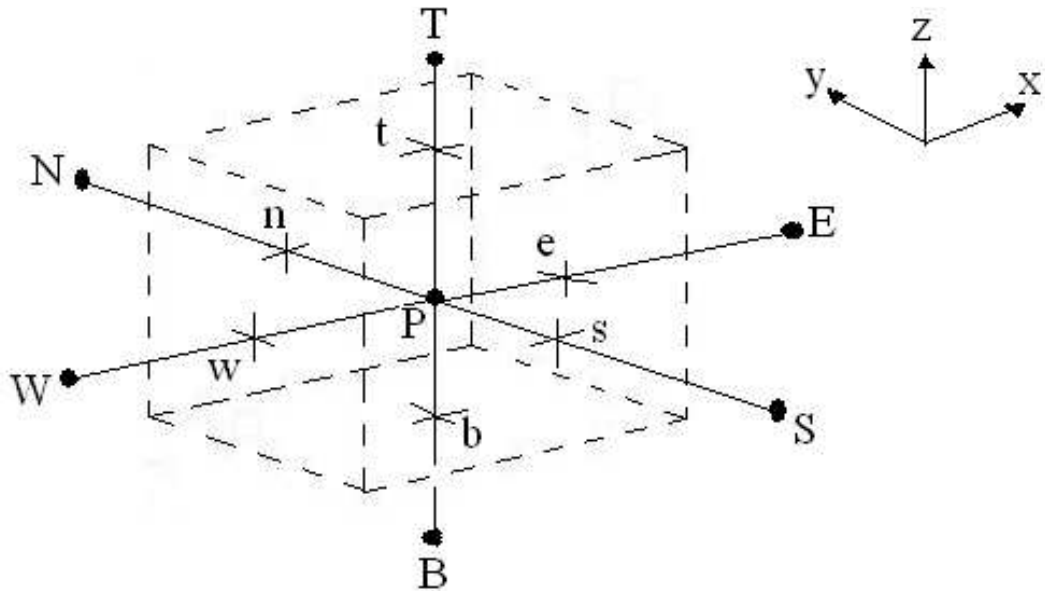


Figura 2. 1-Célula genérica em três dimensões

A célula que contém o nó P é identificada por seis nós vizinhos, tais como: west, east, south, north, bottom e top (W, E, S, N, B, T).

O FLUENT usa o método de volumes finitos para converter as equações diferenciais que regem o escoamento em equações discretizadas em cada elemento, de modo a ser resolvidas numericamente, podendo ser escrita da seguinte forma algébrica:

$$a_p \phi_p = \sum a_{nb} \phi_{nb} + S_u \quad \text{Eq.2-11}$$

onde, o índice  $nb$  refere-se às células da vizinhança,  $a_p$  e  $a_{nb}$  são os coeficientes linearizados para  $\phi_p$  e  $\phi_{nb}$ , isto é, para o centro e vizinhança da célula respectivamente e  $S_u$  é uma constante que representa a contribuição dos termos fonte. O número de células na vizinhança depende da malha utilizada, geralmente é igual ao número de faces que

delimitam o volume da mesma, com exceção das células localizadas na fronteira do domínio.

## 2.5 Esquema Numérico

O método utilizado para a discretização das equações governantes do escoamento requer uma adaptação cuidada ao problema em estudo. Esquemas de discretização de primeira ordem, apesar de estáveis, acarretam erros de exactidão derivados da eliminação dos termos de ordem superior nas séries de Taylor calculadas na discretização. Assim, esquemas de ordem superior, como o esquema de interpolação QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics) minimizam tal limitação, visto que, se baseia na informação dos elementos vizinhos do elemento onde o cálculo é realizado. O esquema QUICK usa uma interpolação quadrática ponderada de três pontos em cada direcção.

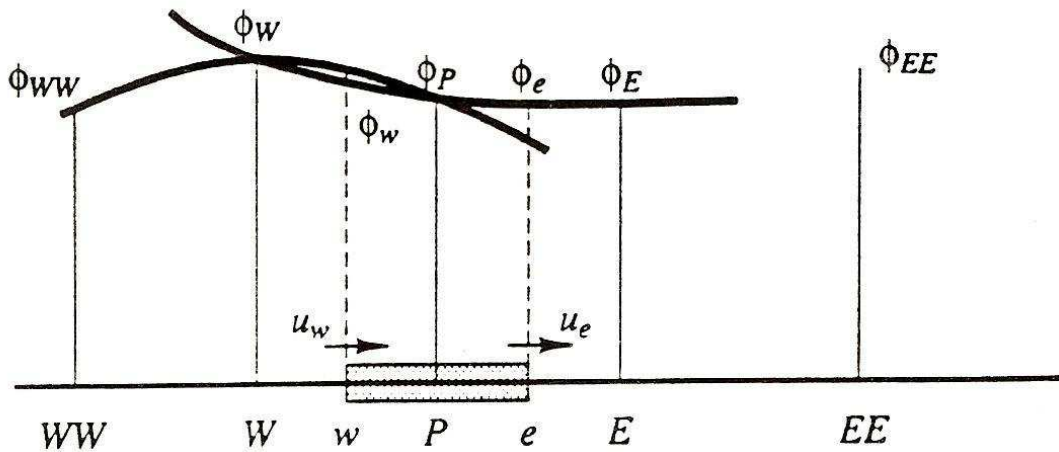


Figura 2. 2-Esquema de interpolação QUICK

Sendo  $\phi$  uma variável genérica do escoamento, a equação generalizada do esquema QUICK têm a seguinte forma:

$$a_p \phi_p = a_w \phi_w + a_e \phi_e + a_{ww} \phi_{ww} + a_{ee} \phi_{ee} \quad \text{Eq.2-12}$$

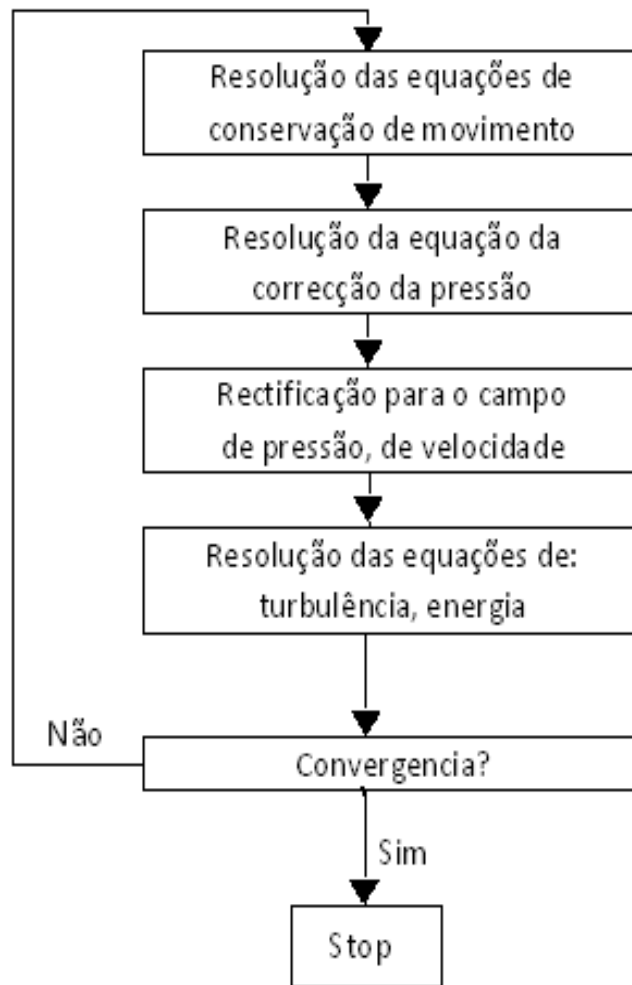
A tabela 2.1 indica os coeficientes da equação 2.12.

QUICK "standard"	
$a_W$	$D_w + \frac{6}{8}\alpha_w F_w + \frac{1}{8}\alpha_s F_s + \frac{3}{8}(1 - \alpha_w)F_w$
$a_{WW}$	$-\frac{1}{8}\alpha_w F_w$
$a_E$	$D_s - \frac{3}{8}\alpha_s F_s - \frac{6}{8}(1 - \alpha_s)F_s - \frac{1}{8}(1 - \alpha_w)F_w$
$a_{EE}$	$\frac{1}{8}(1 - \alpha_s)F_s$

**Tabela 2. 1-** Coeficientes do Esquema de interpolação QUICK

Para a obtenção da solução, utiliza-se o método segregado permitindo que as equações que regem o escoamento sejam resolvidas sequencialmente. O FLUENT apresenta várias opções, tais como, o SIMPLE, SIMPLEC e o PISO. O método SIMPLE utiliza a relação entre velocidade e pressão e um factor de correcção para obter o campo de pressões. O método SIMPLEC tem por base o algoritmo anterior mas com diferenças ao nível do factor de correcção. O método PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) também utiliza o relacionamento entre velocidade e pressão e dois factores de correcção (Neighbor Correction e Skewness Correction).

Neste estudo, o acoplamento entre a velocidade e a pressão adoptado foi o SIMPLE. Cada iteração consiste na execução dos passos ilustrados na figura 2.3.



**Figura 2. 3-** Algoritmo SIMPLE

A partir das condições iniciais os principais passos do algoritmo SIMPLE são:

1. As equações de conservação do momento são resolvidas individualmente, de forma a actualizar o campo de velocidades;
2. Se as velocidades obtidas no passo anterior não cumprirem localmente a equação da continuidade, uma equação para a correcção da pressão é derivada a partir da equação da continuidade e das equações linearizadas da quantidade de movimento;
3. Após a resolução da equação da correcção da pressão, obtêm-se as rectificações para o campo de pressão e da velocidade;

4. Se necessário resolve-se as equações de transporte para os escalares;
5. Repetir estes passos até que o resíduo de todas as equações atinge os valores iguais ou inferiores ao estipulado, verificando-se assim, a convergência do conjunto de equações.

## **2.6 Malha**

A construção da malha é uma arte onde a experiência é relevante. Apenas com uma construção cuidada e bastante bem planeada, é possível a melhor solução entre tantas possíveis, permitindo ao utilizador uma convergência de resultados num intervalo de tempo relativamente reduzido.

Existem vários factores que ditam a validação da malha e o seu consequente sucesso, sendo as de maior importância além dum adequado número de elementos para o caso a estudar, o tamanho dos elementos e os rácios entre comprimento e largura.

Com estes factores como guias para a construção da malha, pretende-se não só a qualidade de elementos da malha como também evitar sobrecarregar os recursos para a resolução.

A criação da malha é efectuada através da ferramenta GAMBIT (versão 2.2.30), onde recorrendo a uma sequência de operações foi possível a descrição das condições do problema.

### **3. Escoamento de Ventilação Natural**

Para a resolução do sistema de equações diferenciais que governam o escoamento, utilizou-se o programa computacional comercial FLUENT. Neste programa, as equações do escoamento, descritas no capítulo 2, são discretizadas segundo o método dos volumes finitos.

#### **3.1 Caso de estudo**

Para a representação numérica do escoamento tridimensional assumiu-se um edifício de forma cúbica 5x5x5 m, em comunicação com o exterior através de duas aberturas de ventilação. Apesar dos escoamentos no interior dos edifícios serem promovidos pela acção conjunta do vento natural e da libertação de calor, para o referido estudo o escoamento só será promovido pela acção do vento natural. A geometria do edifício e a localização das aberturas de ventilação estão representadas na figura 3.1. O vento com o valor de 10m/s incide normalmente à fachada que contém a abertura de ventilação baixa. A outra abertura é também rectangular e situa-se na face oposta. Aborda-se assim, um caso de estudo de ventilação natural cruzada (figura 3.2). Para o referido estudo, foi considerado diversas situações: ausência de aberturas e duas aberturas de ventilação em fachadas opostas variando-se a dimensão das aberturas desde 2,5% até 15% da área da fachada.

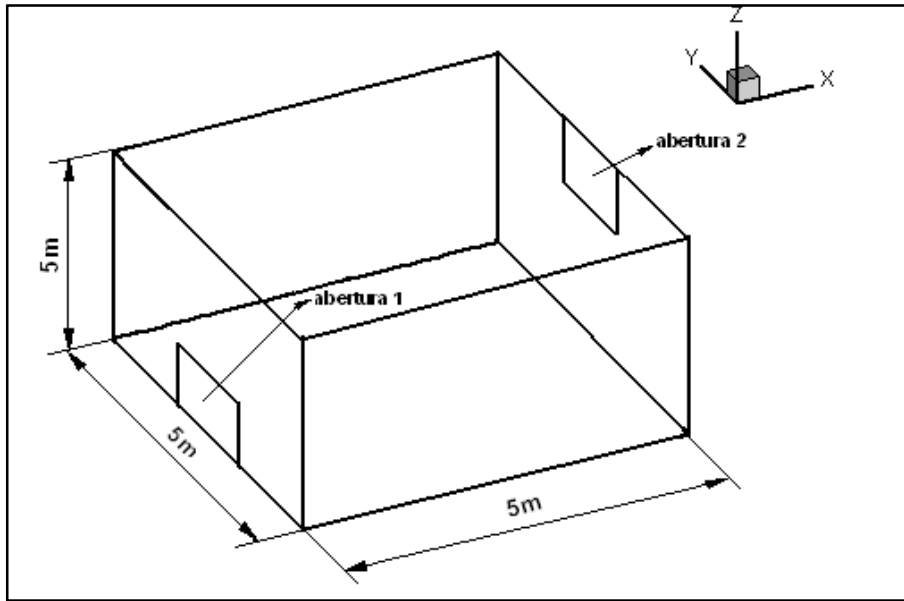


Figura 3.1-Dimensões do cubo

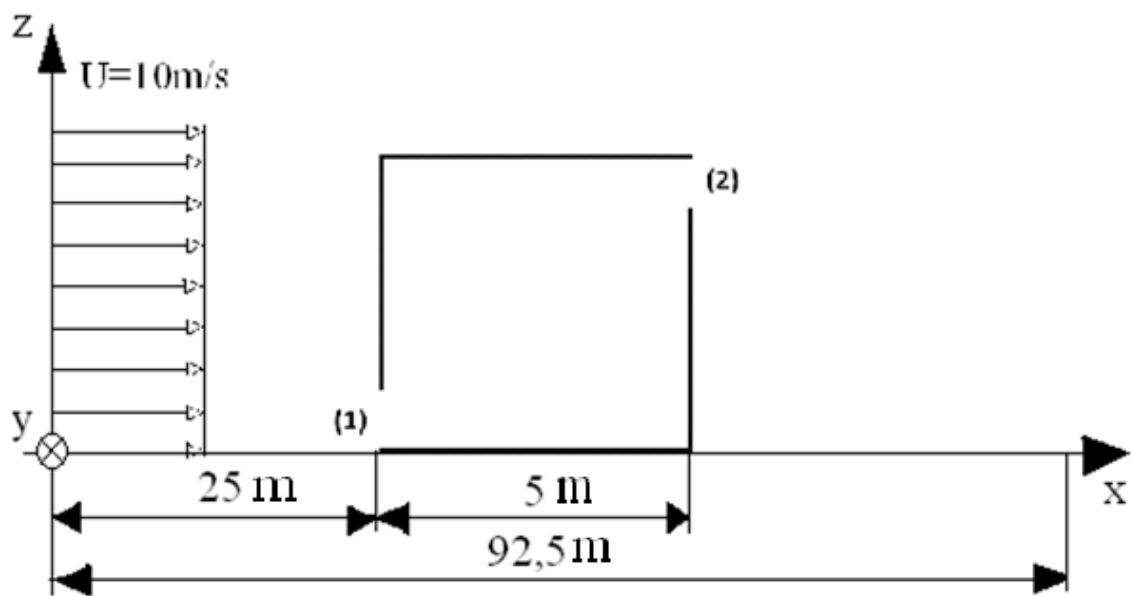


Figura 3. 2-Caso de estudo

### 3.1.1 Domínio computacional e sua discretização

A dimensão e a discretização do domínio de cálculo são factores muito relevantes na modelação numérica em casos tridimensionais. De modo a evitar possíveis efeitos de bloqueamento provocados pelo cubo, as fronteiras do domínio de cálculo devem situar-se relativamente afastadas do obstáculo (cubo).

O domínio computacional referente a este estudo corresponde a um paralelepípedo de volume  $(92,5 \times 100 \times 50) \text{ m}^3$  onde o cubo está inserido. O cubo encontra-se sob o chão, a uma distância de 50 metros das paredes laterais. Foi imposta uma velocidade axial na face do paralelepípedo de 10m/s.

De modo a reduzir o domínio de cálculo para metade, mas sem interferir no escoamento, optou-se à aplicação comum da simetria do corpo (figura 3.3).

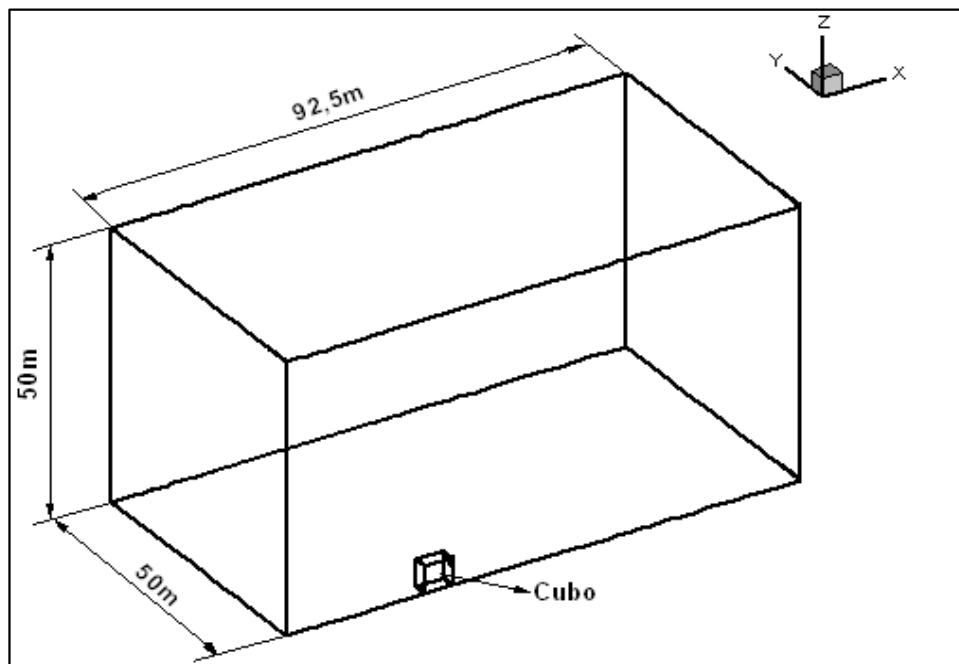
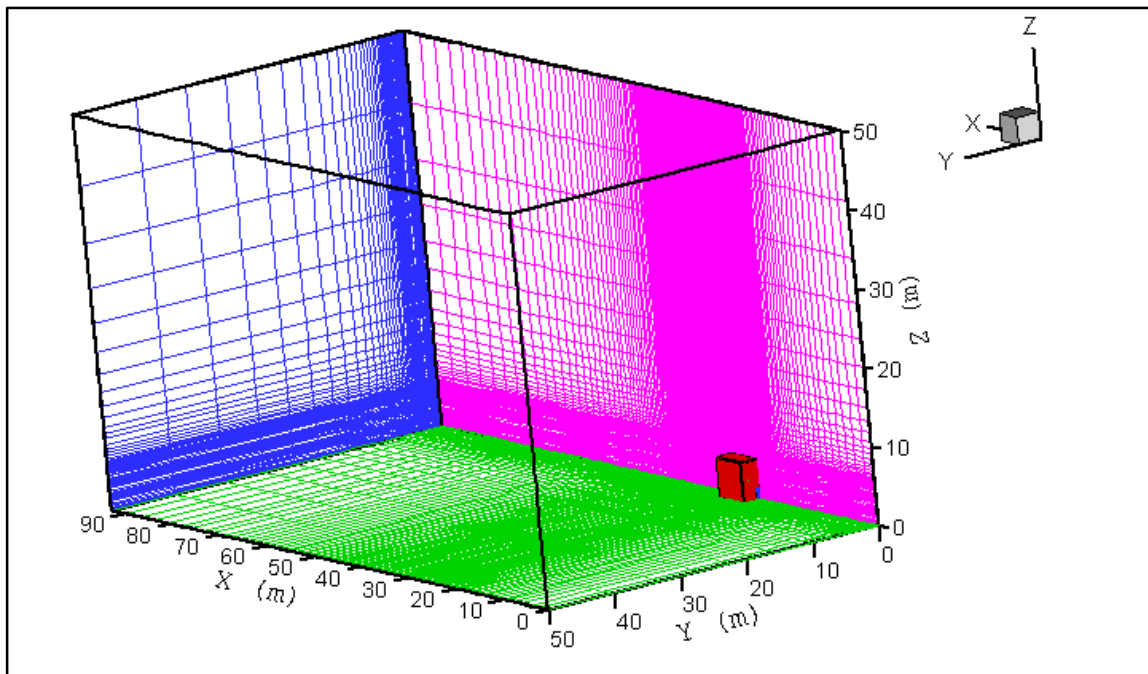


Figura 3. 3- Dominio Computacional

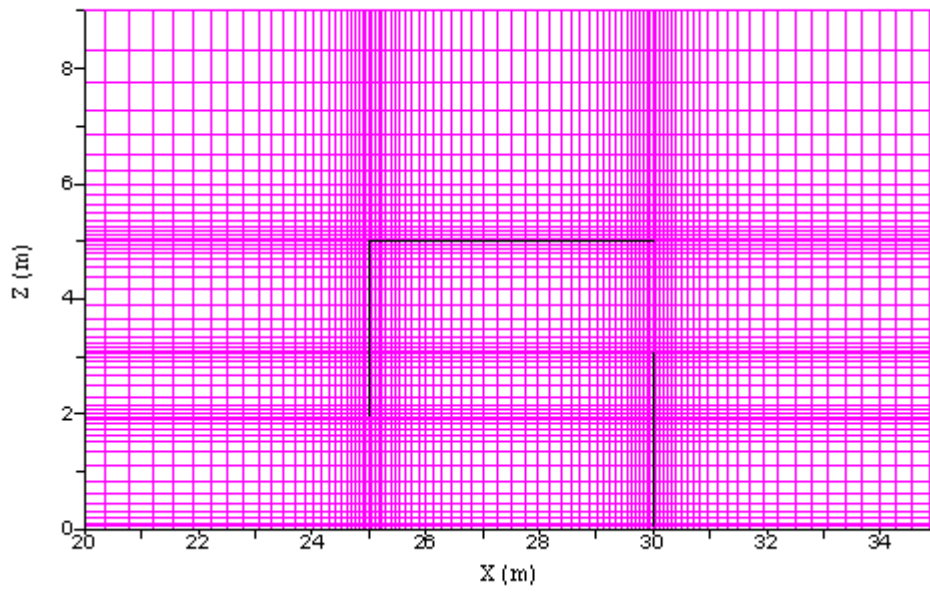
A geração da malha foi realizada usando o pré-processador GAMBIT (versão 2.2.30). A malha é composta por 618800 elementos tetraédricos.

Nas figuras 3.4 até 3.6 apresentam-se vários planos da malha que reflectem a estrutura da malha tridimensional.

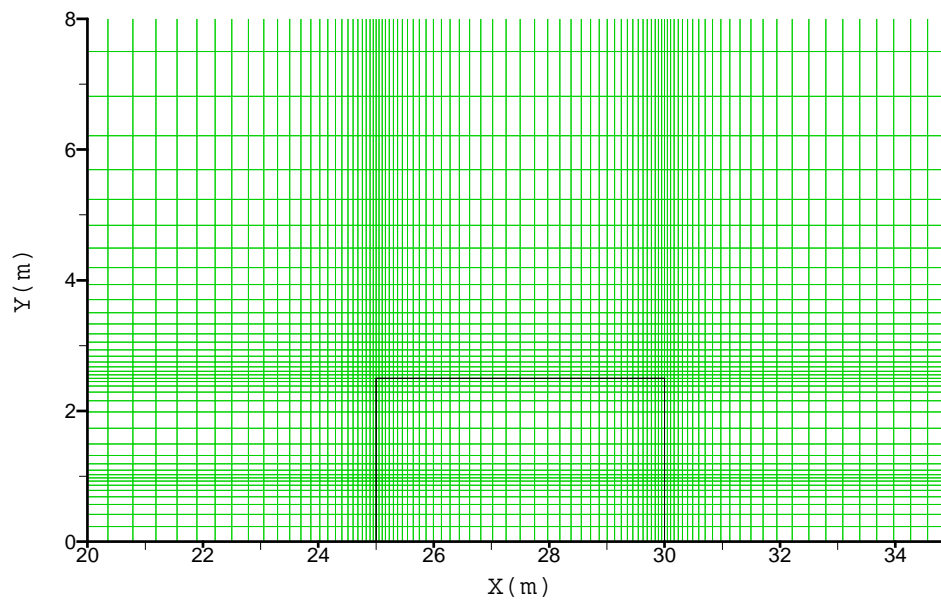
A malha foi construída tendo em conta uma maior discretização em torno e no interior do cubo, visto que são áreas de maior importância e complexidade em termos de fenómenos aerodinâmicos devido ao escoamento. Sendo assim aplicou-se um refinamento progressivo do número de elementos, desde as faces do cubo até às fronteiras do domínio computacional, de modo a suavizar a transição do tamanho dos elementos e diminuir o número total de elementos na malha, sem pôr em causa a validação da mesma.



**Figura 3. 4-Malha do domínio computacional**



**Figura 3. 5-**Discretização vertical: plano  $Y=0m$



**Figura 3. 6-**Discretização horizontal: plano  $Z=2,5m$

### 3.1.2 Condições de fronteira

A próxima etapa é definir as condições de fronteira do modelo em estudo.

As condições de fronteira são as seguintes:

- Os planos,  $x=0$  e  $x=92,5$  representam respectivamente a face de entrada e a de saída. Foi imposta uma velocidade de 10 m/s, normal à superfície de entrada em  $x=0$ .
- O plano  $z=0$ , assim como as faces do cubo em estudo representam respectivamente o chão e as paredes, pelo qual é atribuído uma condição de fronteira de parede com aderência.
- Os planos  $z=50$ ,  $y=0$  e  $y=50$  são simulados por planos de simetria.
- As aberturas do cubo constituem aberturas livres.

### 3.1.3 Parâmetros da modelação numérica

De modo a proceder as simulações numéricas do caso tridimensional, utilizou-se o código comercial FLUENT.

Na resolução do acoplamento entre a velocidade e a pressão utilizou-se o algoritmo SIMPLE. Os termos convectivos nas faces dos volumes de controlo são interpolados pelo esquema QUICK assim como os termos difusivos das equações.

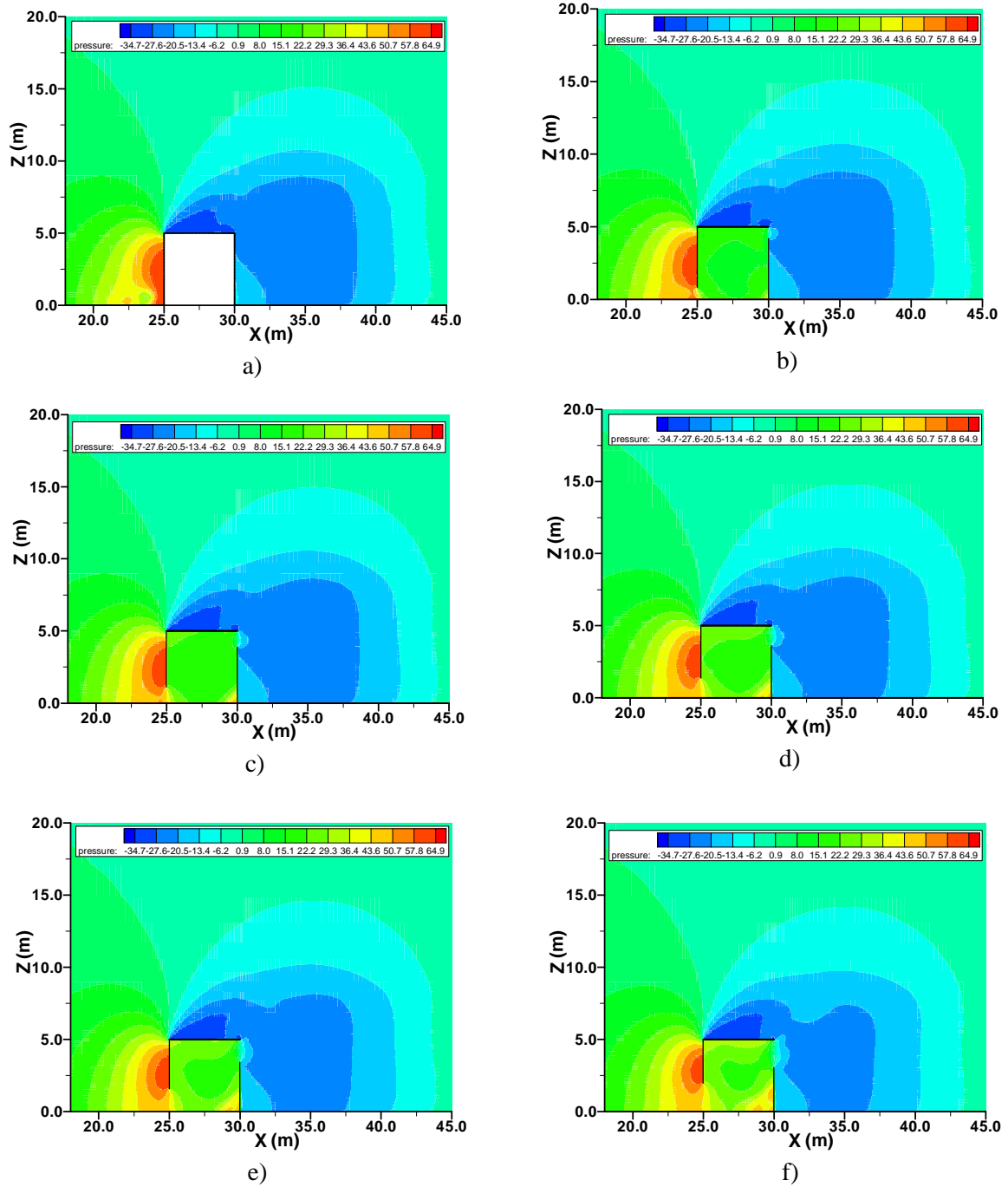
O modelo de turbulência seleccionado para as simulações realizadas é o modelo de duas equações  $k-\epsilon$ .

Os valores padrão dos factores sub-relaxação são os seguintes: 0,3 para a pressão; 0,7 para o momento; 0,8 para a energia cinética de turbulência e para a dissipação turbulenta; e 1,0 para a viscosidade turbulenta.

Considerou-se que as simulações atingiram a convergência durante o processo iterativo quando os resíduos estabilizaram, chegando aos patamares correspondentes dos resíduos mínimos para cada variável.

### 3.2 Resultados numéricos

Na figura 3.7 faz-se a comparação dos campos de pressão obtidos no plano de simetria ( $Y=0m$ ), para as diferentes situações simuladas.



**Figura 3. 7**-Campo de pressão para o plano de simetria ( $Y=0m$ )

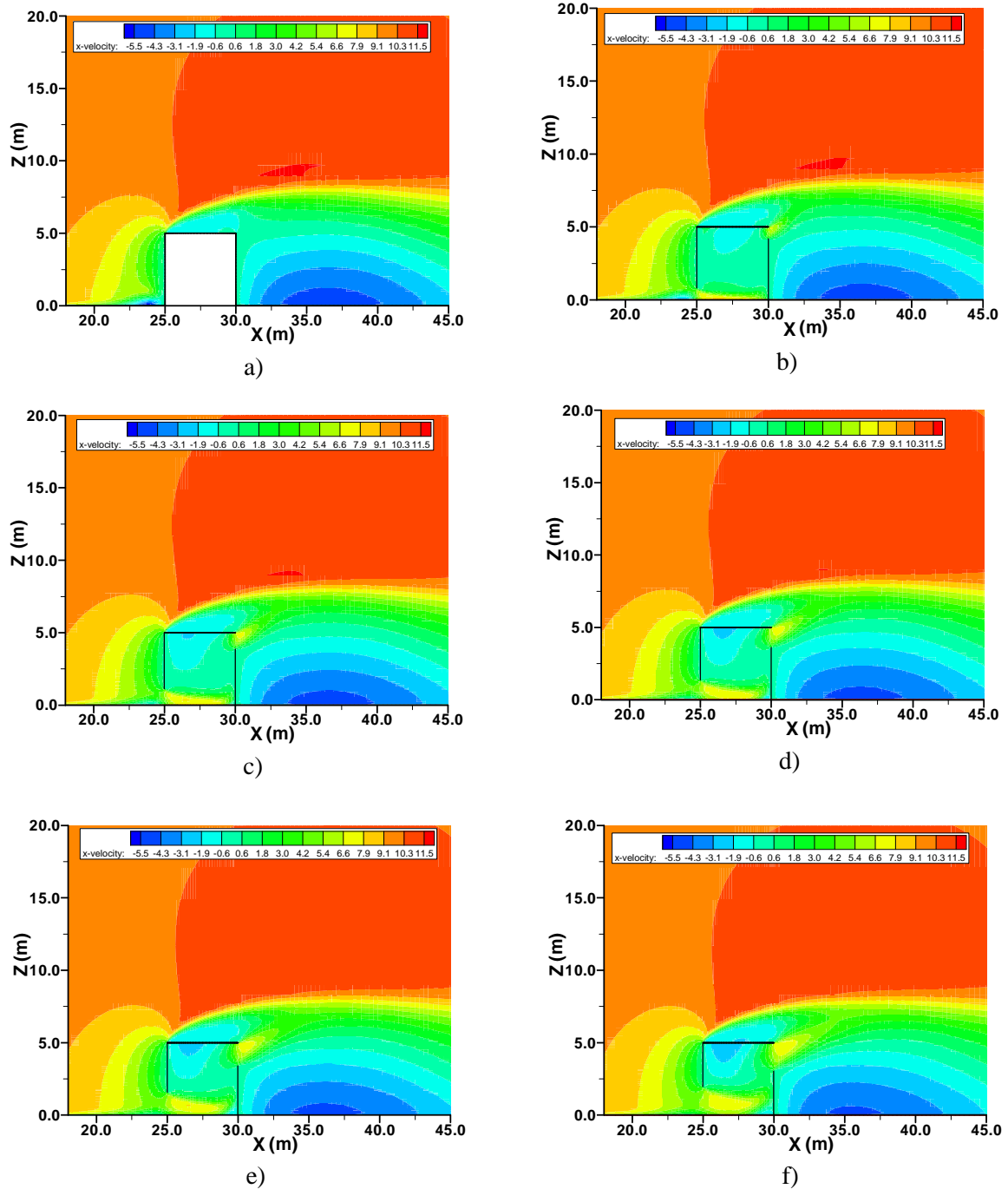
(a): Cubo opaco (b): aberturas 2,5% (c): aberturas 5% (d):abertura 7,5%  
(e):aberturas 10%(f):aberturas 15%

A análise do campo de pressão, mostra-nos que é perto da parede a montante onde se visualiza uma gama de valores da pressão mais elevada, contrariamente à zona a jusante e superior do cubo, sendo nesta última onde se verifica uma gama de valores mais baixos da pressão.

A figura 3.7 também ilustra um ligeiro acréscimo do valor da pressão no interior do espaço à medida que a dimensão da abertura aumenta.

É de realçar que a presença das aberturas não provocou muitas alterações na pressão exterior, comparando com o cubo opaco. As alterações mais significativas, provocadas pelo aparecimento das aberturas foram um decréscimo da pressão a montante, e um ligeiro aumento da pressão a jusante, sendo este último aspecto mais visível com o aumento da porosidade.

Na figura 3.8 apresenta-se o campo de intensidade da velocidade segundo a componente x, determinado para o plano de simetria ( $Y=0\text{m}$ ).



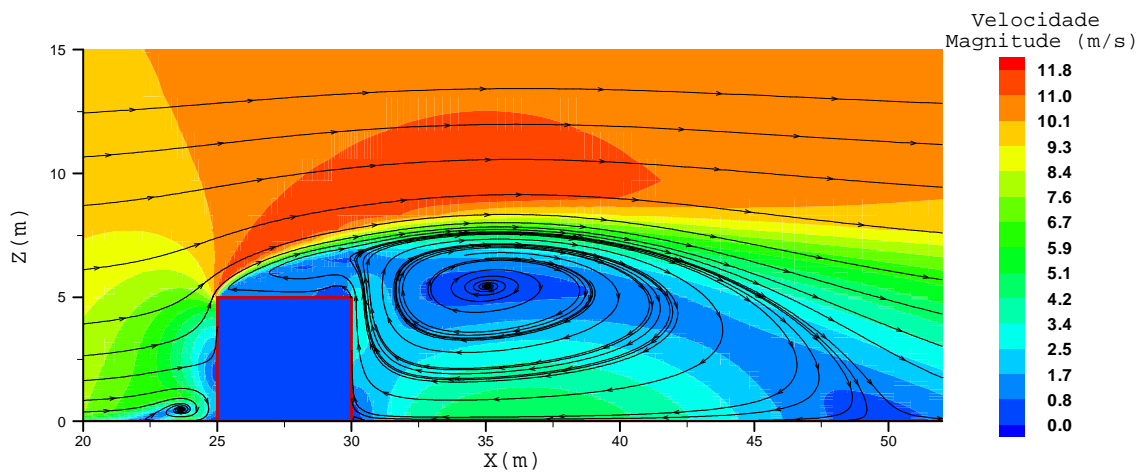
**Figura 3.8-** Campo de velocidade segundo a componente x, para o plano de simetria ( $Y=0\text{m}$ )

- (a): Cubo opaco (b): aberturas 2,5% (c): aberturas 5% (d):abertura 7,5%  
 (e):aberturas 10%(f):aberturas 15%

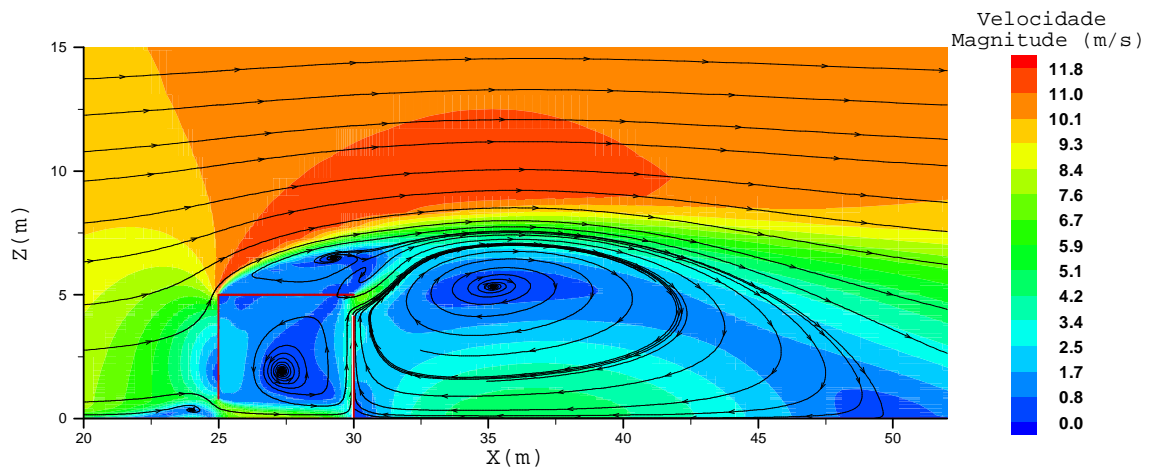
Com a introdução das aberturas é notório o escoamento induzido no interior do espaço pela acção do vento. A análise do campo de velocidade evidencia, na globalidade, baixas velocidades nas zonas das paredes interiores, em contraste com a velocidade mais elevada presente nas zonas das aberturas, sendo este último aspecto mais visível com o aumento da porosidade.

Em relação ao espaço exterior, verifica-se um campo de velocidade mais elevado a montante do espaço cúbico, contrariamente à zona a jusante.

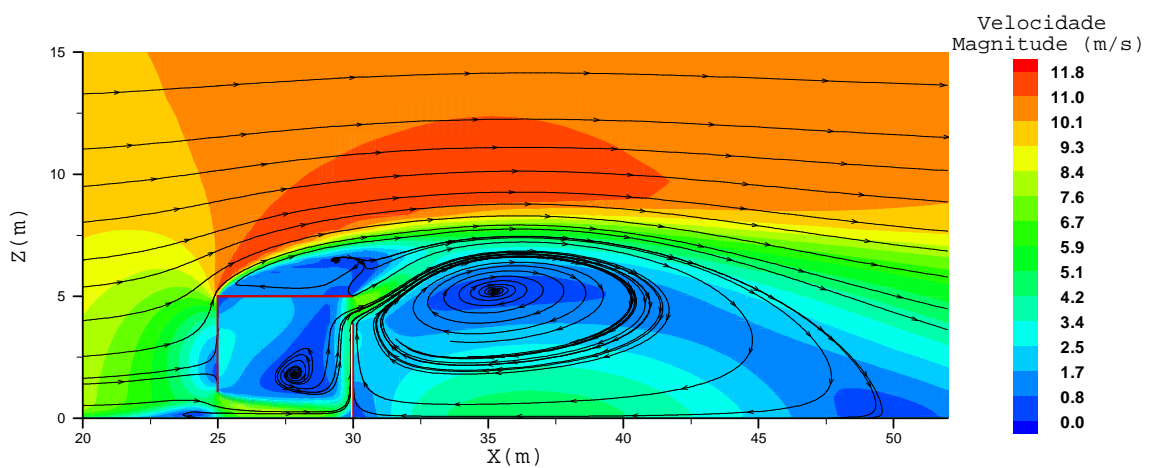
Um aspecto mais pormenorizado destes campos de velocidade é ilustrado nas próximas figuras, juntamente com as linhas de corrente. Análise referente ao plano de simetria ( $Y=0m$ ).



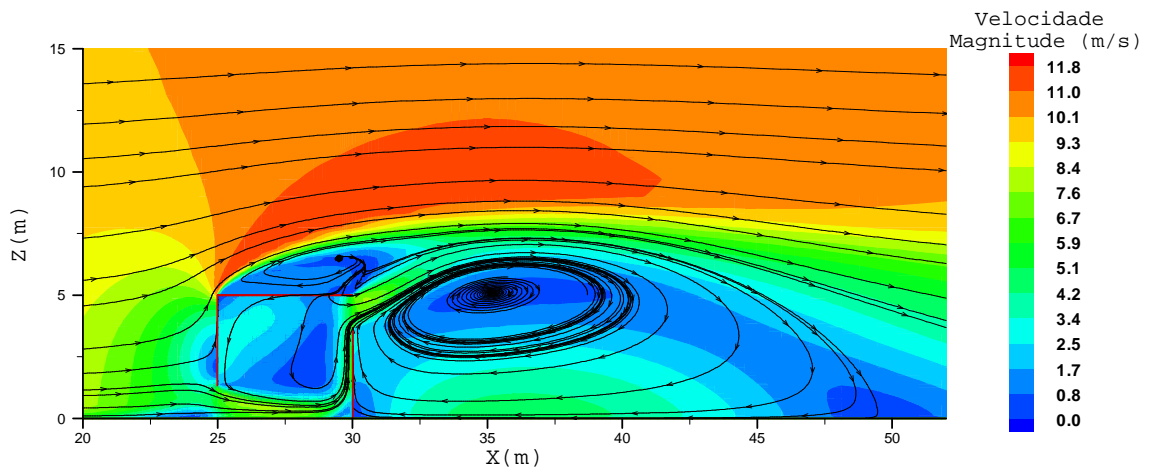
**Figura 3. 9-**Linhas de corrente referente ao cubo opaco



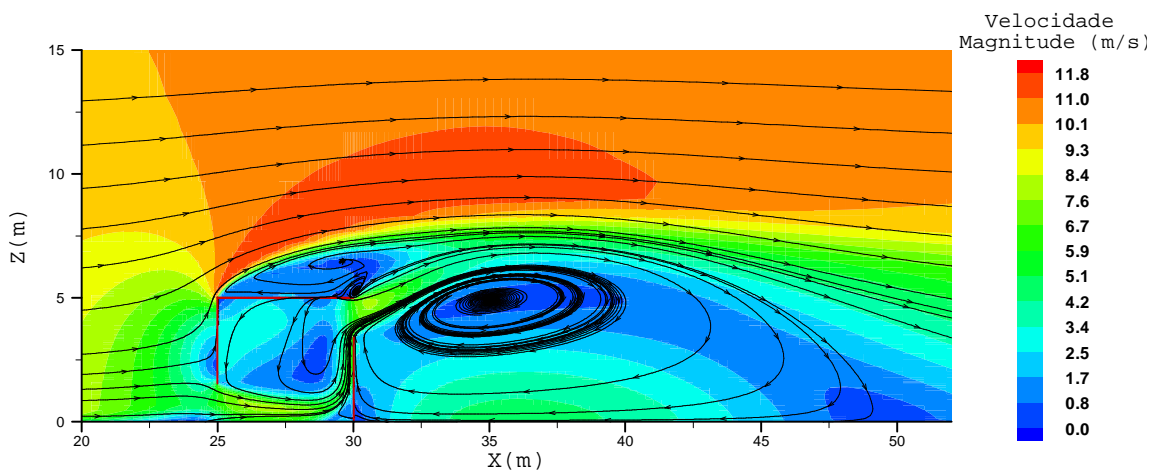
**Figura 3. 10-** Linhas de corrente referente à abertura 2,5%



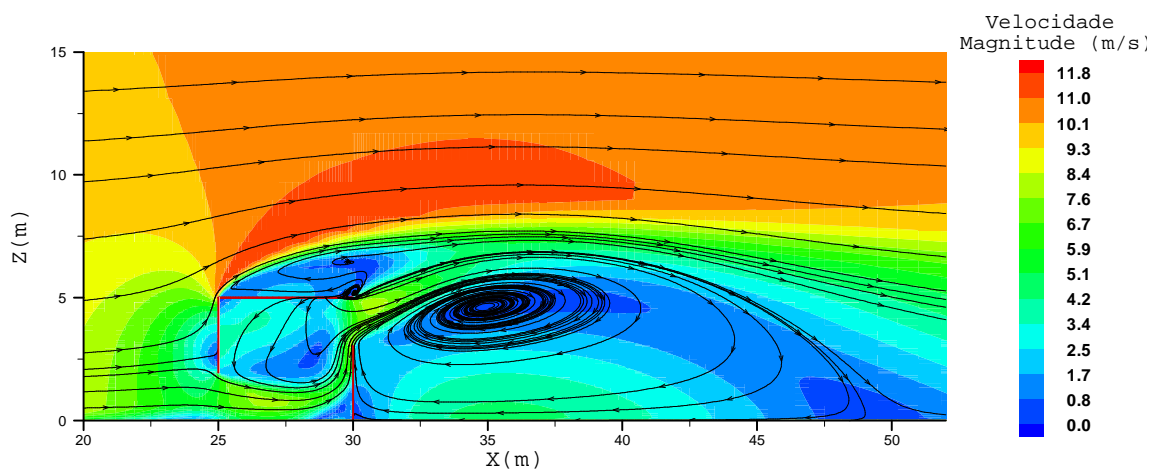
**Figura 3. 11-** Linhas de corrente referente à abertura 5%



**Figura 3. 12-** Linhas de corrente referente à abertura 7,5%



**Figura 3. 13-** Linhas de corrente referente à abertura 10%



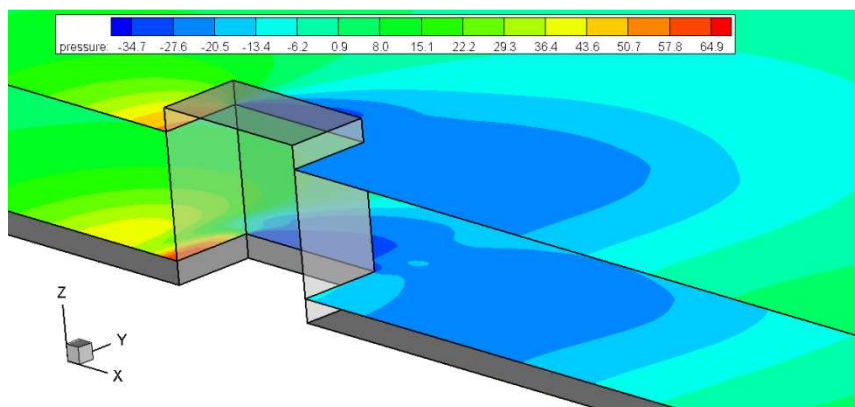
**Figura 3. 14-** Linhas de corrente referente à abertura 15%

Nesta análise consegue-se observar que o escoamento faz-se sempre junto ao chão e à parede a jusante que contém a abertura 2 e induz uma zona de recirculação no interior do cubo. Este jacto sai na zona de recirculação, comprimindo o escoamento para o chão.

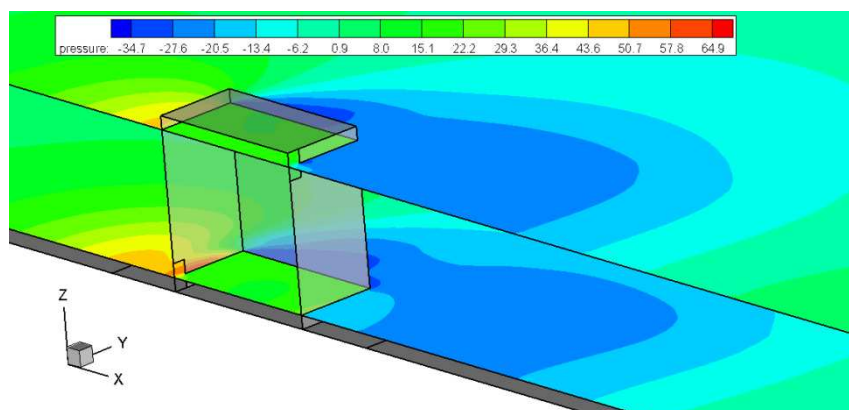
Também é possível visualizar que o jacto tem um maior acréscimo à medida que a dimensão da abertura aumenta. A recirculação no interior do corpo é mais visível para os casos onde as aberturas são menores.

Para complementar a apresentação de resultados, procedeu-se à análise de alguns planos característicos do escoamento.

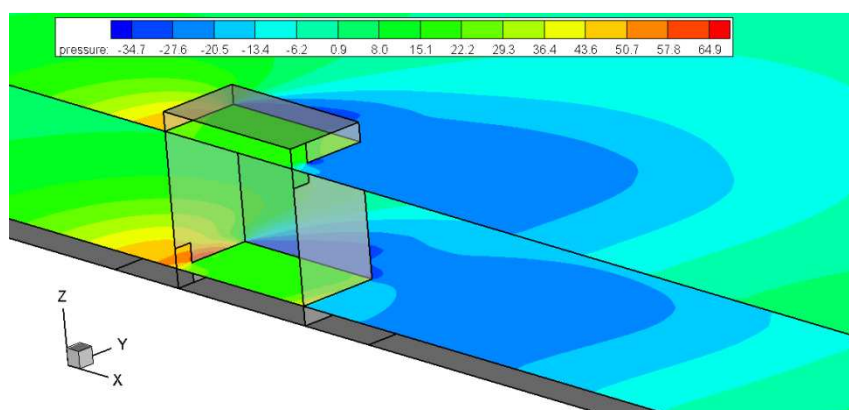
Da figura 3.15 à figura 3.20 é possível visualizar o campo de pressão, obtido nas diversas simulações. A análise é efectuada para os planos horizontais ao nível médio das aberturas.



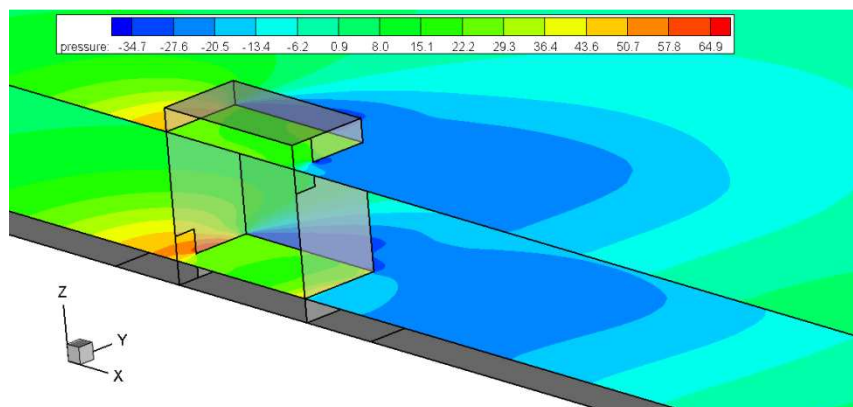
**Figura 3. 15-** Campo de pressão nos planos  $Z1=0,68\text{m}$  e  $Z2=4,32\text{m}$ , modelo opaco



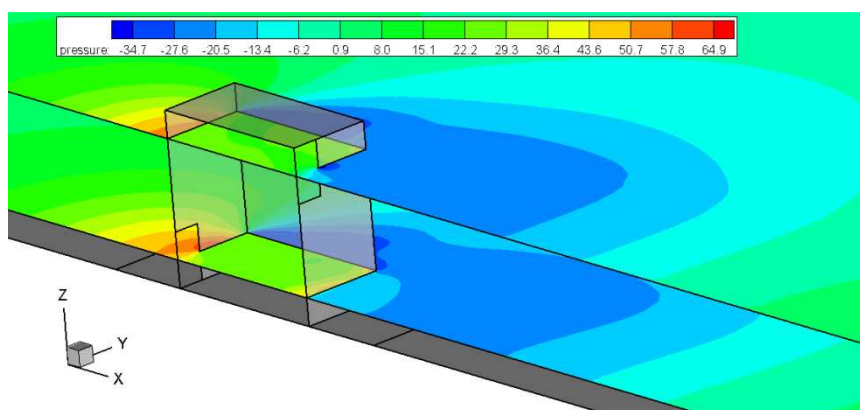
**Figura 3. 16-** Campo de pressão nos planos médios das aberturas ( $Z1=0,4\text{m}$  e  $Z2=4,6\text{m}$ ), correspondentes a 2,5% da área da fachada



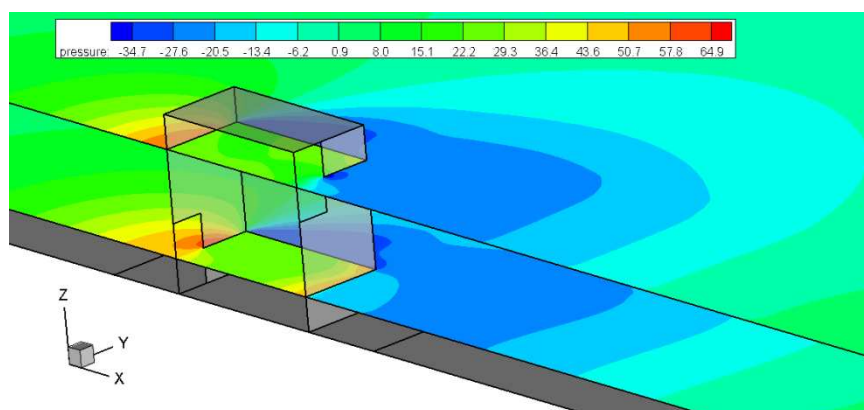
**Figura 3. 17-** Campo de pressão nos planos médios das aberturas ( $Z1=0,56\text{m}$  e  $Z2=4,44\text{m}$ ), correspondentes a 5% da área da fachada



**Figura 3. 18-** Campo de pressão nos planos médios das aberturas ( $Z_1=0,68\text{m}$  e  $Z_2=4,32\text{m}$ ), correspondentes a 7,5% da área da fachada



**Figura 3. 19-** Campo de pressão nos planos médios das aberturas ( $Z_1=0,8\text{m}$  e  $Z_2=4,2\text{m}$ ), correspondentes a 10% da área da fachada

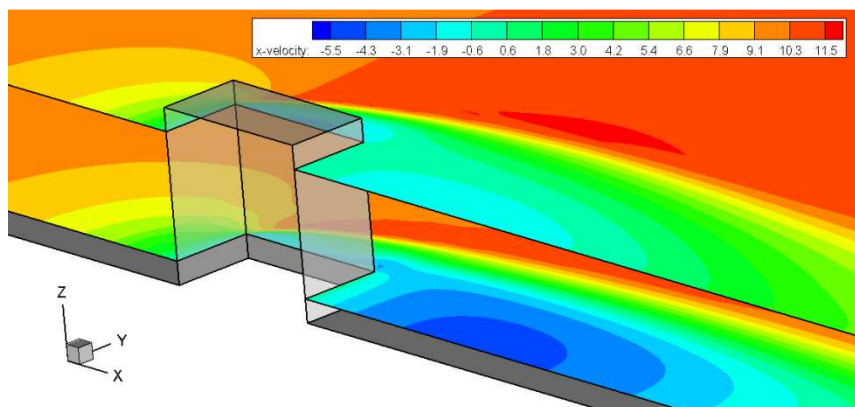


**Figura 3. 20-** Campo de pressão nos planos médios das aberturas ( $Z_1=0,98\text{m}$  e  $Z_2=4,02\text{m}$ ), correspondentes a 15% da área da fachada

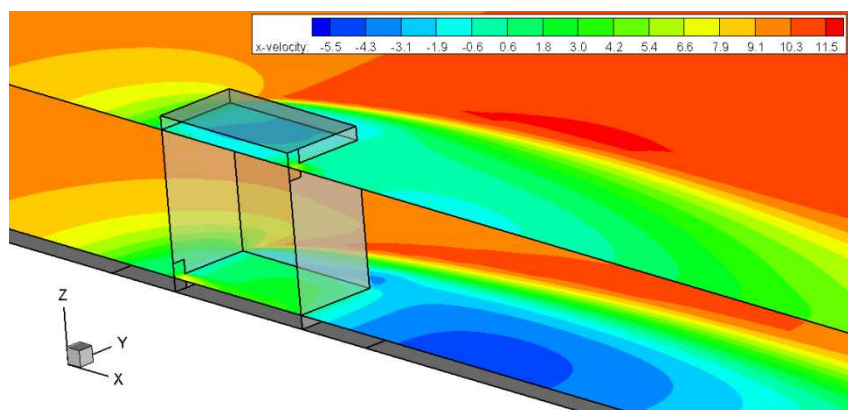
A análise dos planos horizontais situados no meio das respectivas aberturas, permitiu verificar que, tanto na zona a jusante como atrás do cubo, a gama de valores da pressão é mais baixo.

Um outro aspecto a considerar, é que ocorreu um aumento da pressão interior á medida que a porosidade aumenta. Este aumento na pressão no interior do cubo é mais notório na abertura 1 e na parede a jusante.

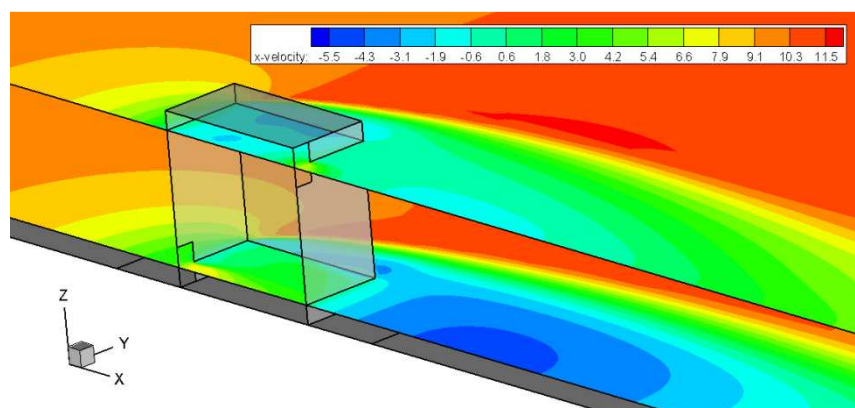
Da figura 3.21 à figura 3.26 apresenta-se o campo de intensidade da velocidade segundo a componente x, obtido nas diversas simulações. A análise é efectuada para os planos horizontais ao nível médio das aberturas.



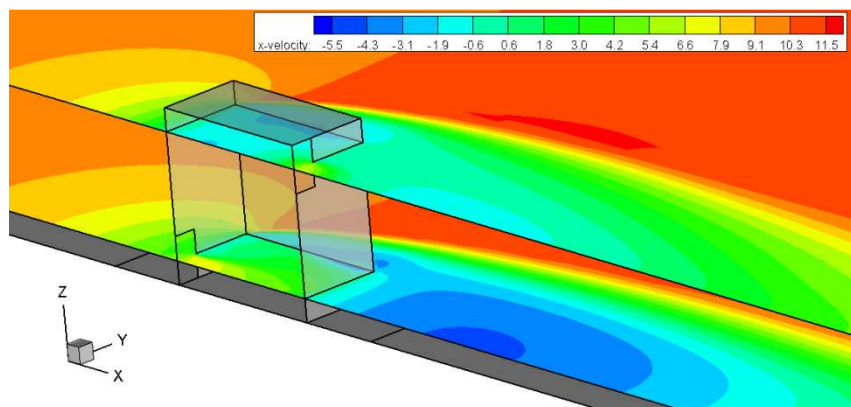
**Figura 3. 21-** Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x nos planos  $Z1=0,68\text{m}$  e  $Z2=4,32\text{m}$ , modelo opaco



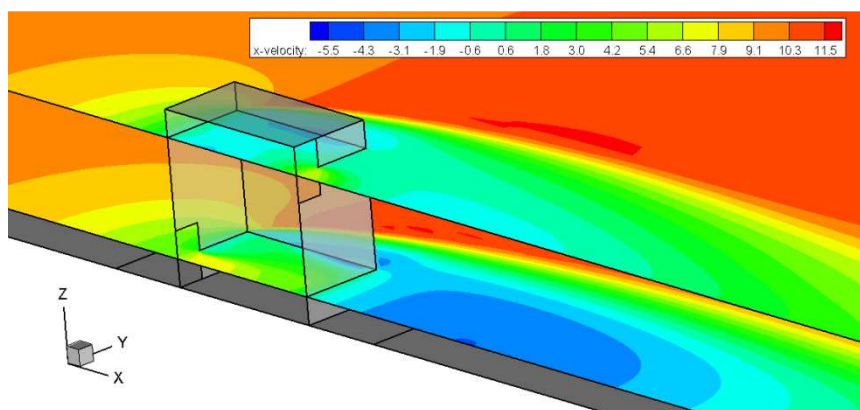
**Figura 3. 22-** Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x nos planos médios das aberturas ( $Z1=0,4\text{m}$  e  $Z2=4,6\text{m}$ ), correspondentes a 2,5% da área da fachada



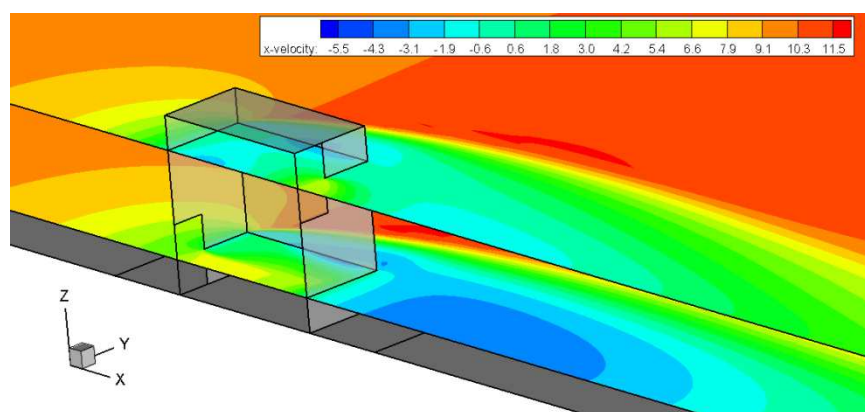
**Figura 3. 23-** Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x nos planos médios das aberturas ( $Z1=0,56\text{m}$  e  $Z2=4,44\text{m}$ ), correspondentes a 5% da área da fachada



**Figura 3. 24-** Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x nos planos médios das aberturas ( $Z_1=0,68\text{m}$  e  $Z_2=4,32\text{m}$ ), correspondentes a 7,5% da área da fachada



**Figura 3. 25-** Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x nos planos médios das aberturas ( $Z_1=0,8\text{m}$  e  $Z_2=4,2\text{m}$ ), correspondentes a 10% da área da fachada

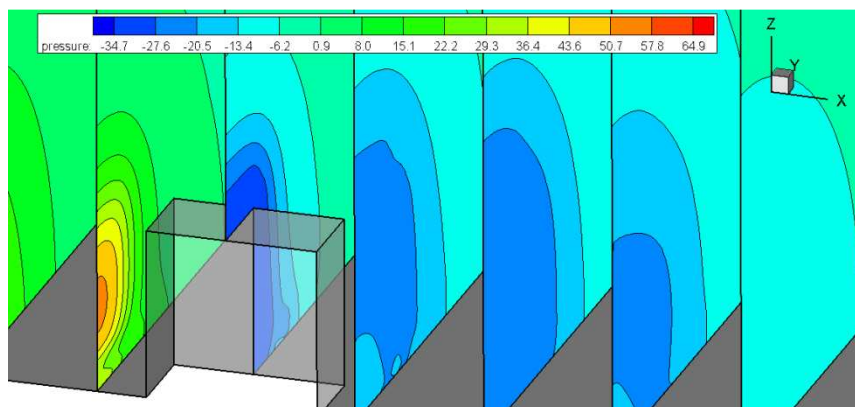


**Figura 3. 26-** Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x nos planos médios das aberturas ( $Z_1=0,98\text{m}$  e  $Z_2=4,02\text{m}$ ), correspondentes a 15% da área da fachada

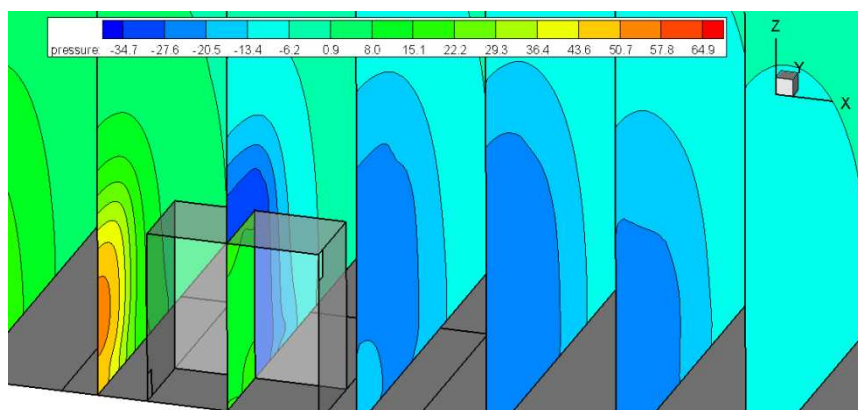
Em relação à intensidade da velocidade segundo o eixo x, verificou-se que, no interior do cubo é mais elevada perto das aberturas, tendo um acréscimo de valor à medida que a porosidade aumenta.

À passagem do obstáculo, denota-se uma zona onde a intensidade da velocidade segundo o eixo x tem um valor negativo, esta explicação deve-se a estarmos numa possível zona de recirculação.

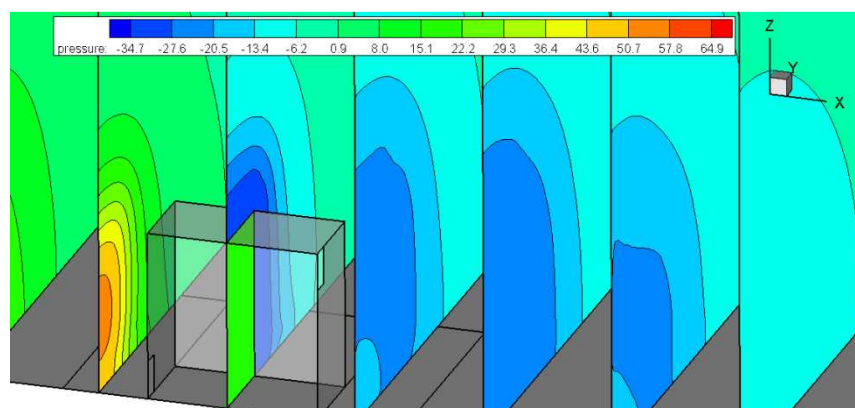
Da figura 3.27 à figura 3.32 apresenta-se o campo de pressão, obtido nas diversas simulações. A análise é efectuada em vários planos transversais.



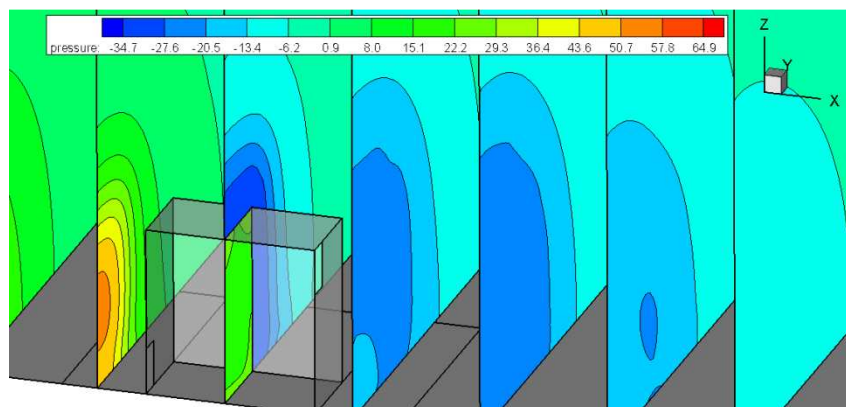
**Figura 3. 27-** Campo de pressão em vários planos transversais, modelo opaco



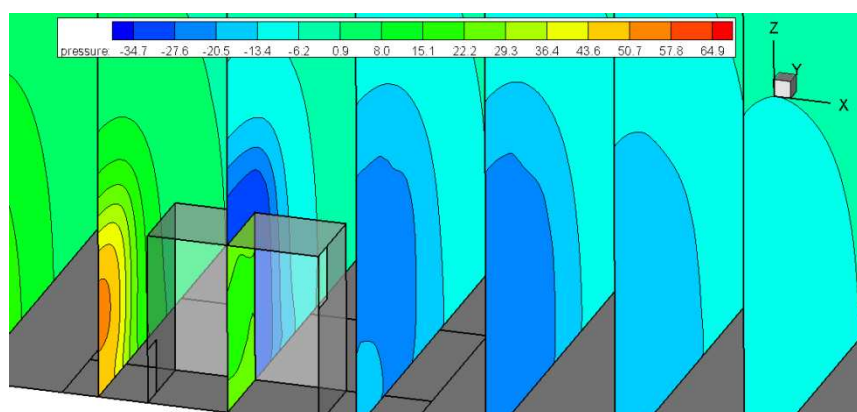
**Figura 3. 28-** Campo de pressão em vários planos transversais, aberturas referentes a 2,5%



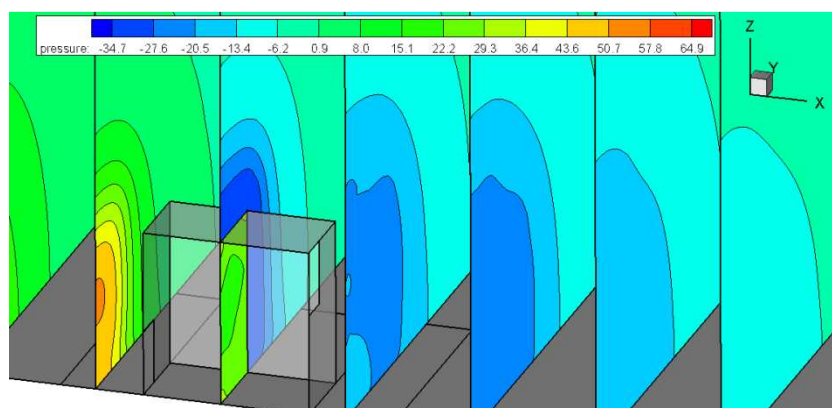
**Figura 3. 29-** Campo de pressão em vários planos transversais, aberturas referentes a 5%



**Figura 3. 30-** Campo de pressão em vários planos transversais, aberturas referentes a 7,5%



**Figura 3. 31-** Campo de pressão em vários planos transversais, aberturas referentes a 10%



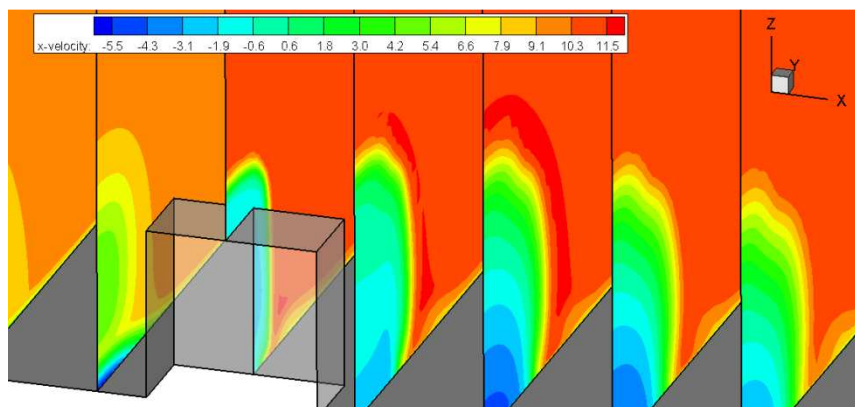
**Figura 3. 32-** Campo de pressão em vários planos transversais, aberturas referentes a 15%

A análise de vários planos transversais permite concluir que, o valor da pressão no interior do cubo tende a sofrer alterações á medida que a porosidade aumenta. Denota-se um ligeiro aumento da pressão interior face ao aumento nas áreas das aberturas. No centro do cubo, não se verifica tais alterações, isto é, este aumento é mais visível perto das paredes.

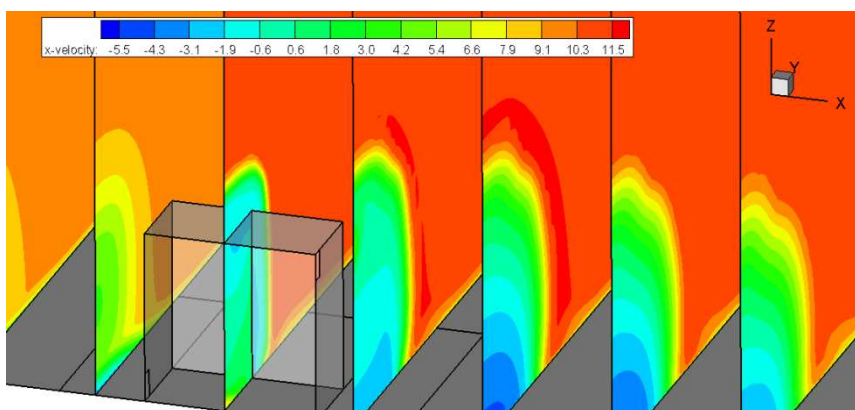
Verifica-se uma gama de valores mais elevados na zona a montante, sendo no caso da simulação para o cubo opaco, onde se verifica valores mais elevados da pressão. Com a presença das aberturas, a pressão tende a diminuir à medida do aumento das áreas das aberturas.

Tanto no tecto como atrás do cubo é visível uma gama de valores onde o campo de pressão é baixo.

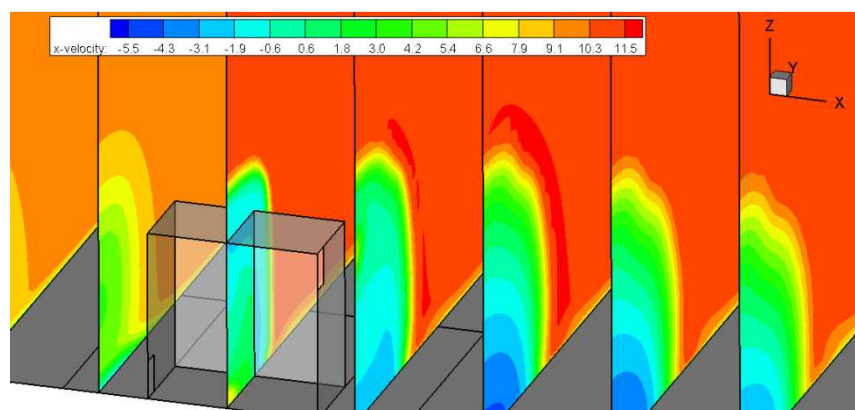
Da figura 3.33 à figura 3.38 apresenta-se o campo de intensidade da velocidade segundo a componente  $x$  , obtido nas diversas simulações. A análise é efectuada em vários planos transversais.



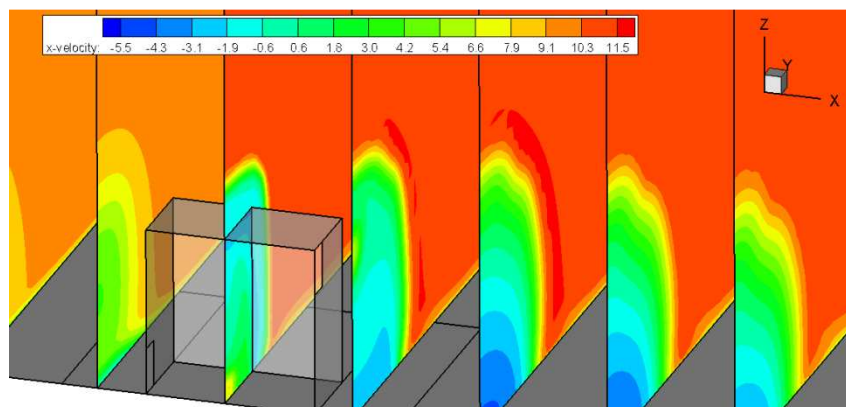
**Figura 3. 33-** Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x em vários planos transversais, modelo opaco



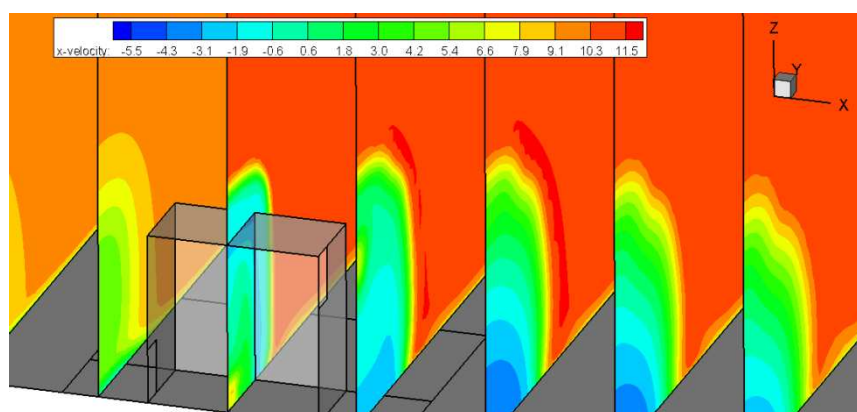
**Figura 3. 34-** Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x em vários planos transversais, aberturas referentes a 2,5%



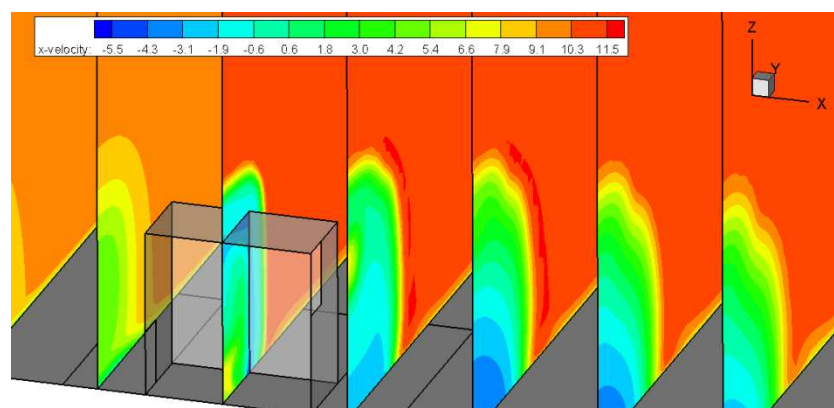
**Figura 3. 35-** Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x em vários planos transversais, aberturas referentes a 5%



**Figura 3. 36-** Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x em vários planos transversais, aberturas referentes a 7,5%



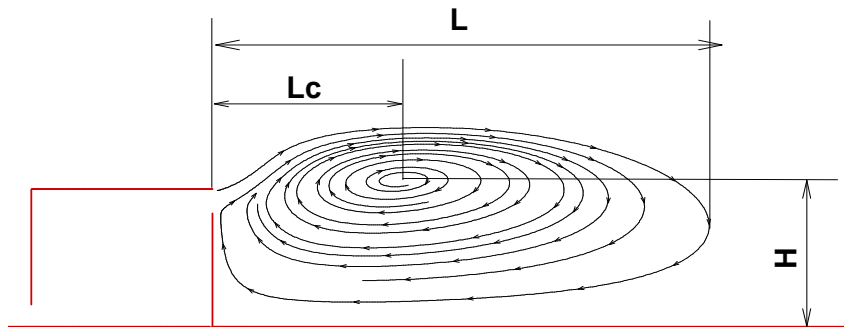
**Figura 3. 37-** Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x em vários planos transversais, aberturas referentes a 10%



**Figura 3. 38-** Campo de intensidade da velocidade segundo a componente x em vários planos transversais, aberturas referentes a 15%

De seguida é efectuada a análise dos parâmetros característicos da bolha de recirculação em função da porosidade, no plano de simetria ( $y=0$ ).

A figura 3.39 indica os parâmetros da bolha de recirculação.



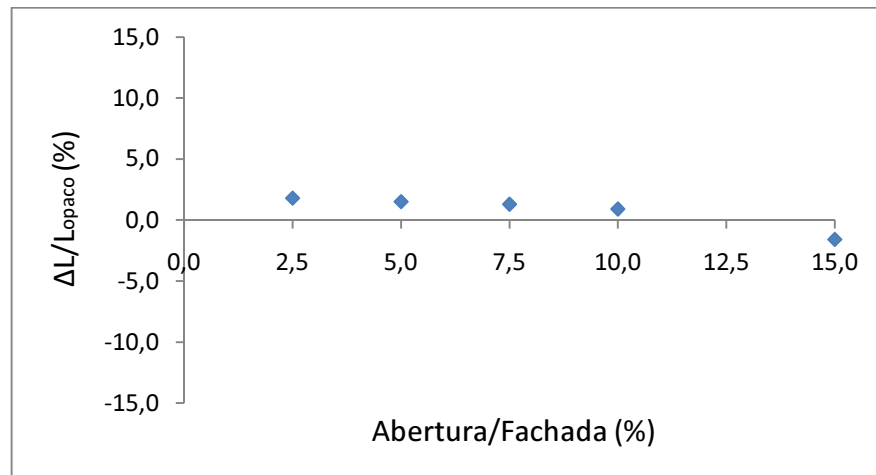
**Figura 3. 39-Bolha de recirculação**

A tabela 3.1 ilustra os valores da bolha de recirculação dos diversos casos de estudo. A análise é efectuada, tendo como referência o modelo opaco.

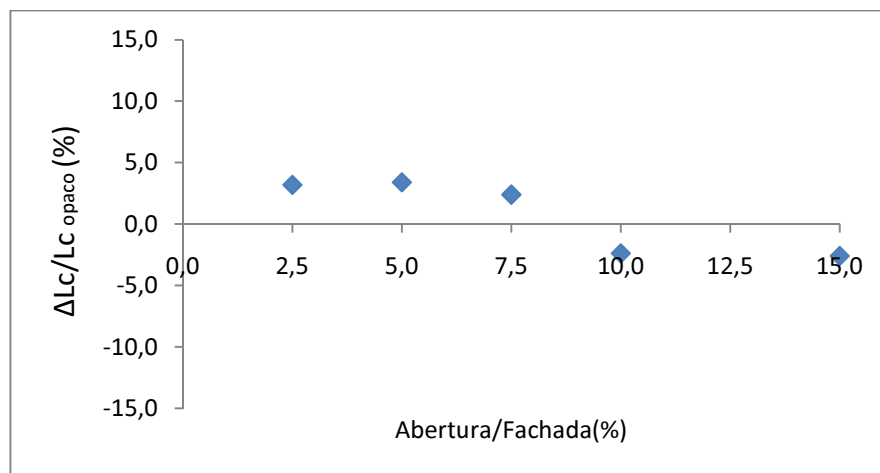
	L(m)	$\Delta L/L_{\text{opaco}}$ (%)	Lc(m)	$\Delta Lc/L_{\text{Copaco}}$ (%)	H(m)	$\Delta H/H_{\text{opaco}}$ (%)
Opaco	19,18		5,04		5,44	
2,50%	19,53	+1,8	5,2	+3,2	5,32	-2,2
5%	19,47	+1,5	5,21	+3,4	5,22	-4,0
7,50%	19,43	+1,3	5,16	+2,4	5,08	-6,6
10%	19,36	+0,9	4,92	-2,4	4,92	-9,6
15%	18,88	-1,6	4,91	-2,6	4,65	-14,5

**Tabela 3. 1-Parâmetros da bolha de recirculação**

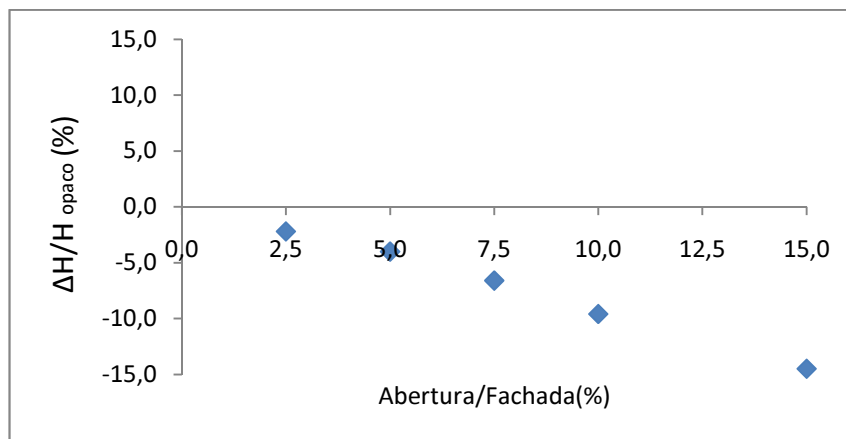
Da figura 3.40 à figura 3.42 é possível verificar os vários parâmetros característicos da bolha de recirculação, tendo como referencia os parâmetros obtidos para a simulação do caso opaco.



**Figura 3. 40-** Variação do comprimento da bolha de recirculação, face ao modelo opaco



**Figura 3. 41-** Variação do comprimento do centro da bolha de recirculação, face ao modelo opaco

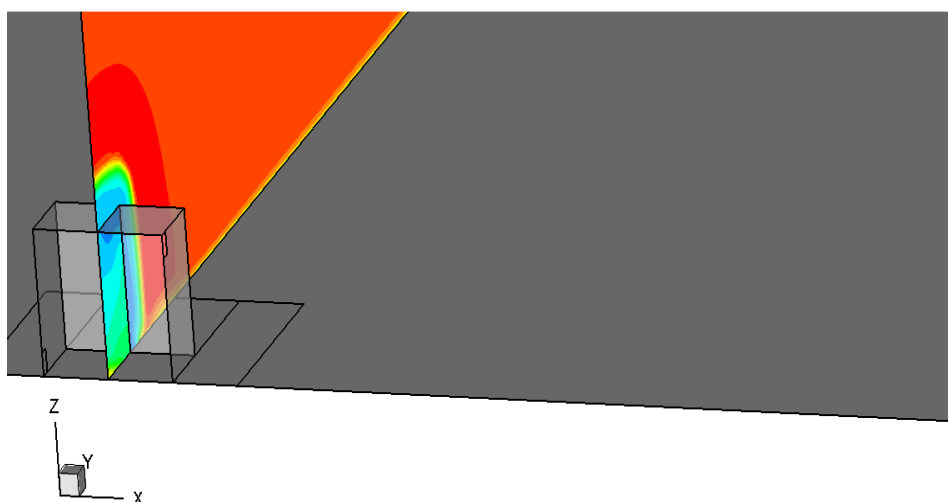


**Figura 3. 42-** Variação da altura do centro da bolha de recirculação, face ao modelo opaco

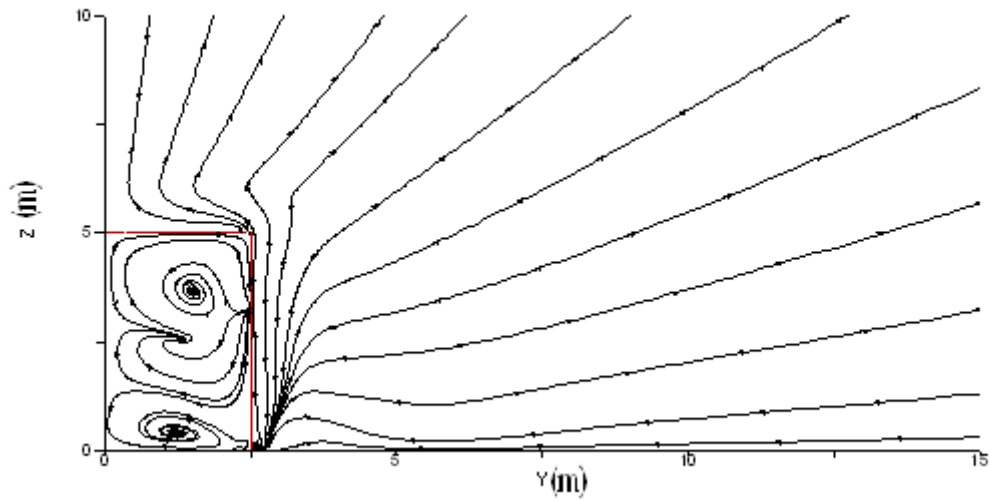
Como se pode verificar as variações são pouco significativas em relação aos parâmetros  $L$  e  $L_c$  e com mais consistência para o parâmetro  $H$ , face aos parâmetros de referencia do modelo opaco. Conclui-se que, à medida que se aumenta a porosidade o centro da bolha de recirculação desloca-se para mais perto do chão.

As próximas figuras ilustram os planos escolhidos, para analisar o escoamento no interior do cubo. Para o referido estudo, adoptou-se pela apresentação de dois casos, tais como, cubo com a presença de aberturas correspondentes a 2,5% e 15% da área de fachada.

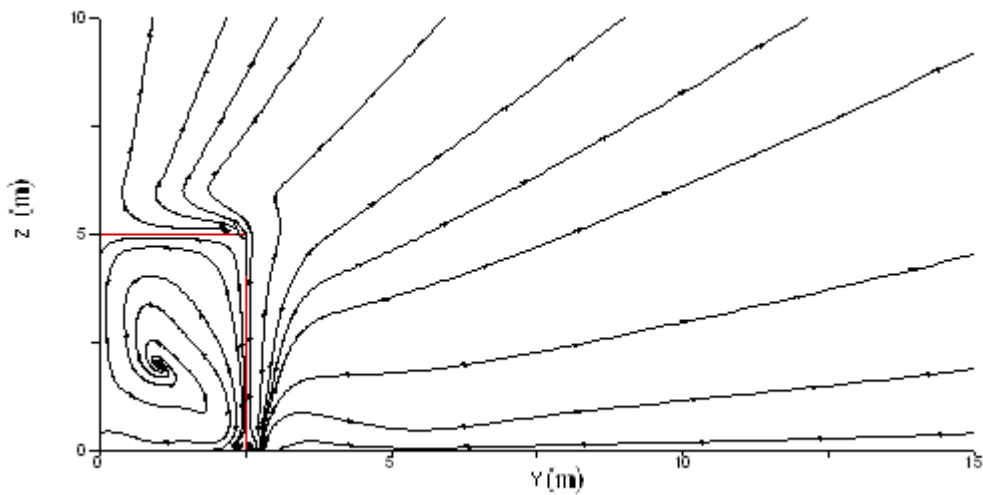
A próxima figura ilustra o plano transversal situado a meio do cubo.



**Figura 3. 43-** Plano  $X=27,5m$



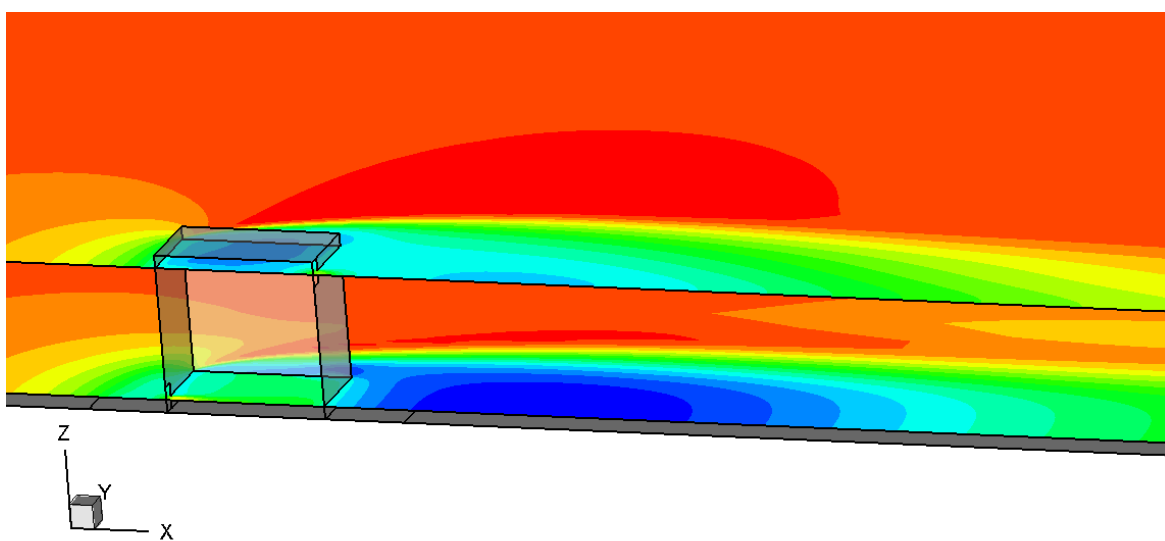
**Figura 3. 44-** Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 2,5%, plano X=27,5m



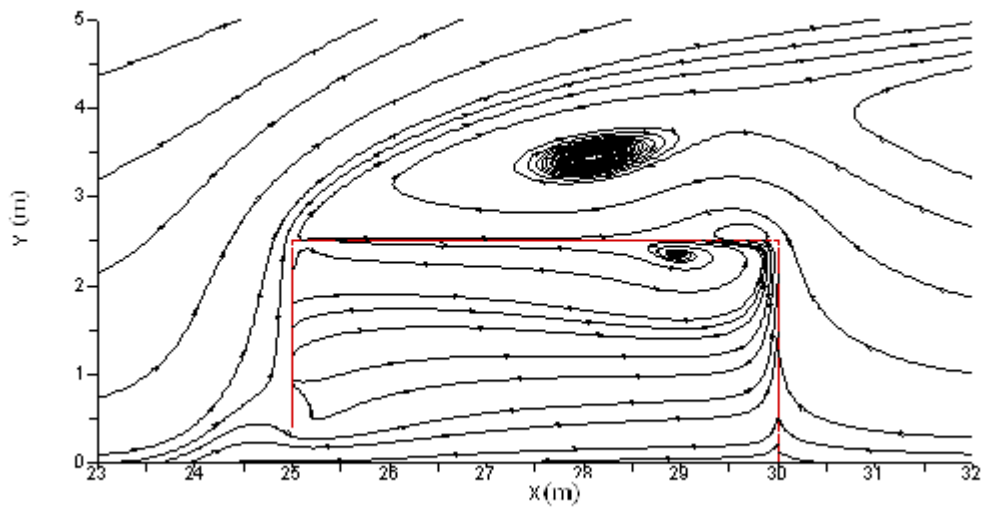
**Figura 3. 45-** Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 15%, plano X=27,5m

Para o caso de porosidade igual a 2,5% o plano X=27,5m ilustra-nos duas zonas de recirculação, perto do chão e do tecto, enquanto no caso de porosidade 15% a recirculação restringe-se a uma só zona.

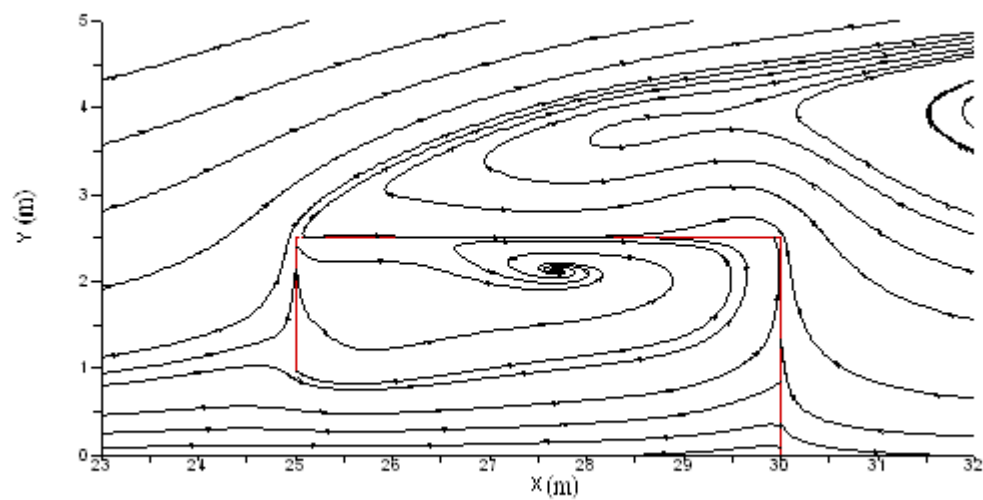
A figura 3.46 apresenta os planos médios das aberturas.



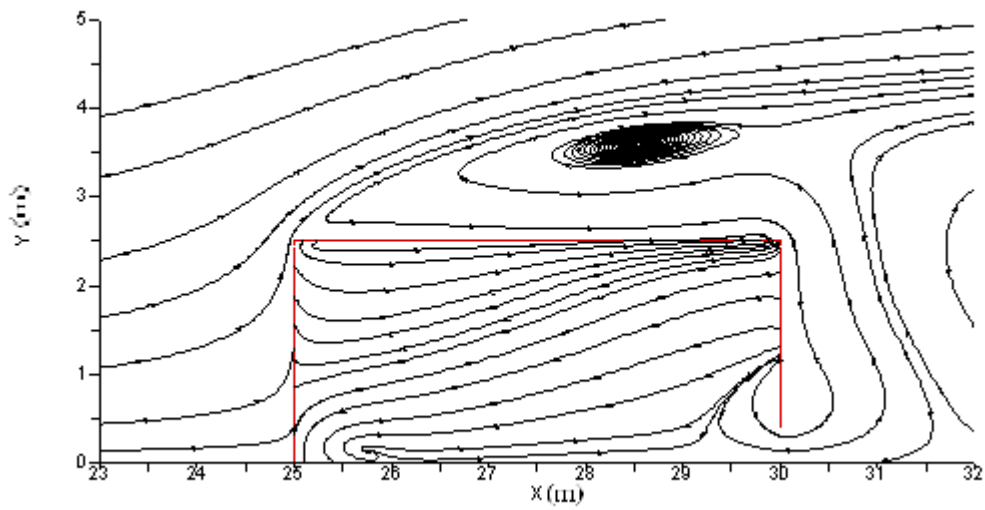
**Figura 3. 46-** Planos médios das aberturas



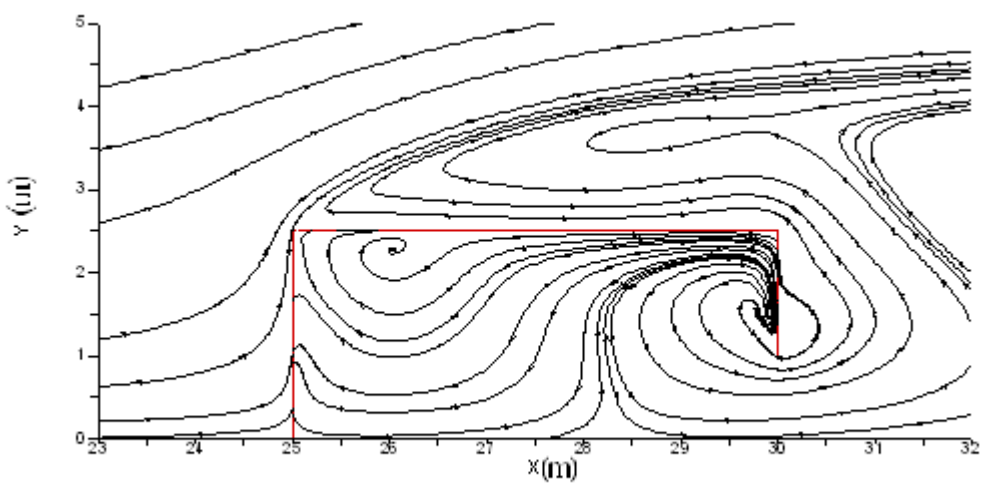
**Figura 3. 47-**Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 2,5%, plano médio que contém a abertura 1



**Figura 3. 48-** Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 15%, plano médio que contém a abertura 1



**Figura 3. 49-** Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 2,5%, plano médio que contém a abertura 2

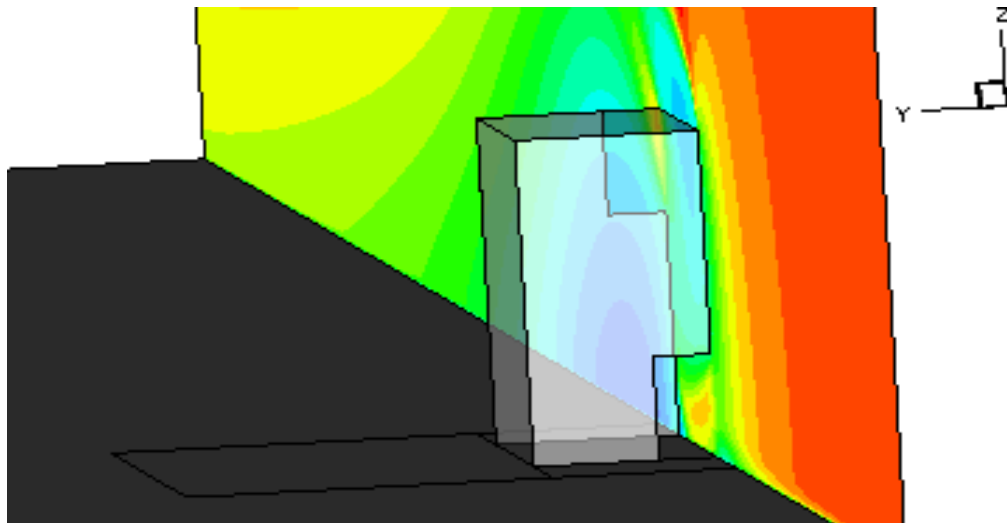


**Figura 3. 50-** Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 15%, plano médio que contém a abertura 2

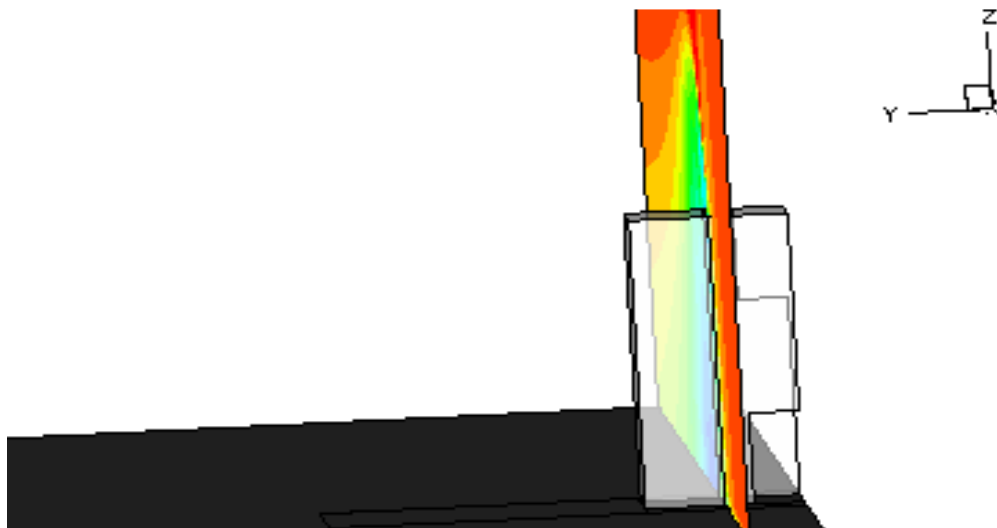
Da figura 3.47 à 3.48, é ilustrativo o escoamento induzido no cubo, através da abertura 1. Verifica-se a presença de um vórtice de parede na parede a um metro de distancia da parede a jusante, para o caso da abertura referente a 2,5% da área da fachada. Enquanto no

caso de porosidade igual a 15%, o vórtice é visível também perto da parede de trás mas mais afastada da parede que contem a abertura 2.

A figura 3.51 apresenta o plano de simetria ( $Y=0m$ ) e o plano  $Y=1,25m$ .



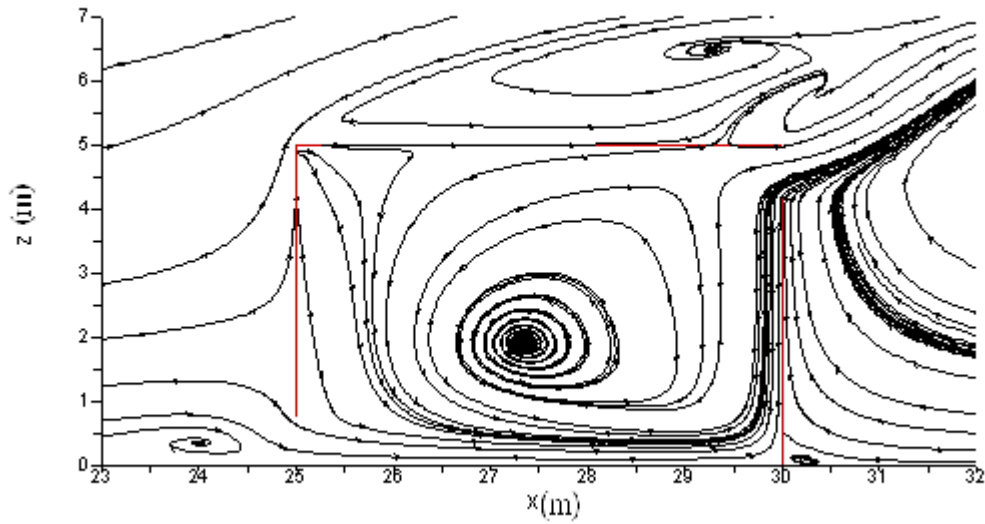
a)



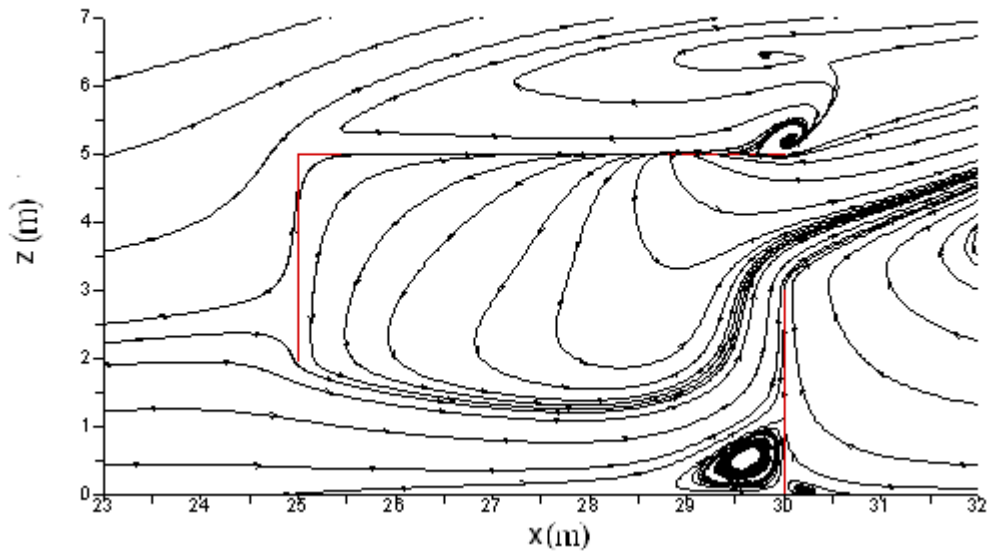
b)

**Figura 3. 51-** Plano de simetria ( $Y=0m$ ) e plano  $Y=1,25m$

a) Plano  $Y=0m$ ; b)Plano  $Y=1,25m$

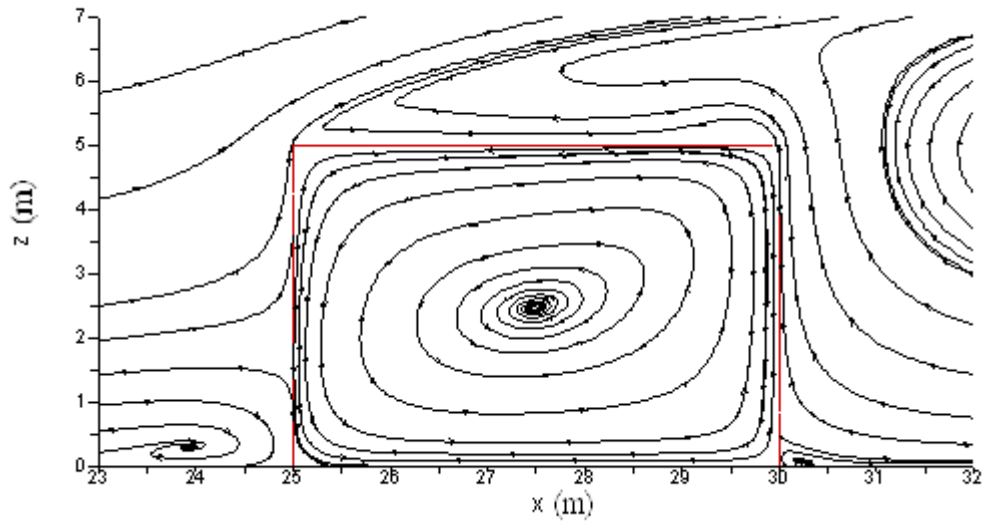


**Figura 3. 52-** Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 2,5%, plano de simetria

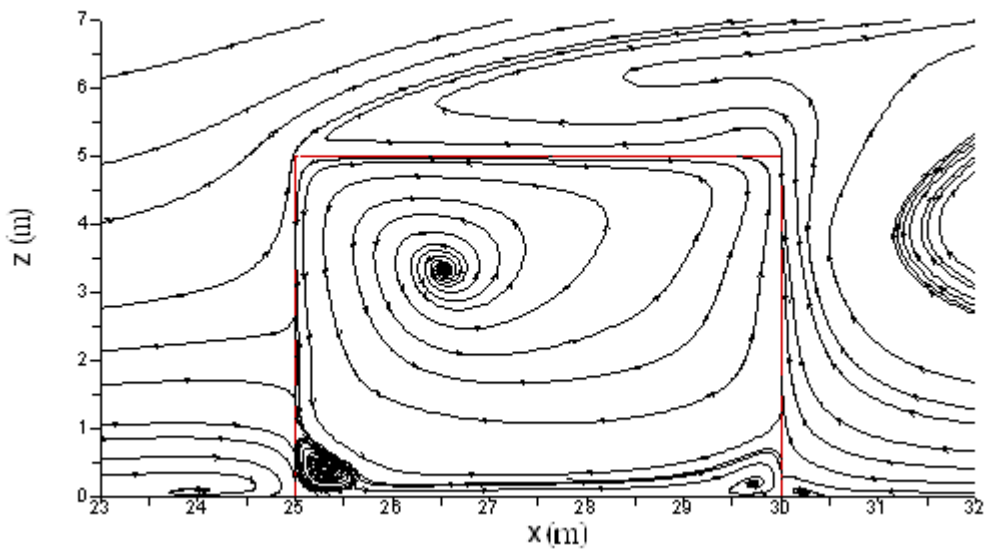


**Figura 3. 53-** Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 15%, plano de simetria

As figuras 3.52 e 3.53 ilustram que o escoamento faz-se sempre junto ao chão e à parede a jusante que contém a abertura 2 e induz uma zona de recirculação no centro do cubo, para o caso de porosidade 2,5%. Enquanto na presença das aberturas correspondentes a 15% da área da fachada a recirculação é visível no chão, perto da parede a jusante.



**Figura 3. 54-** Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 2,5%, plano  $Y=1,25m$

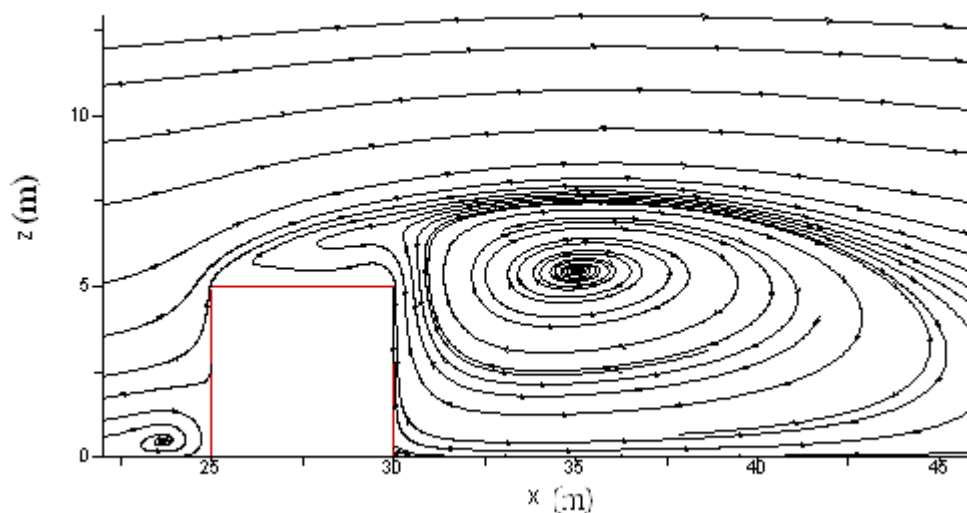


**Figura 3. 55-** Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 15%, plano  $Y=1,25m$

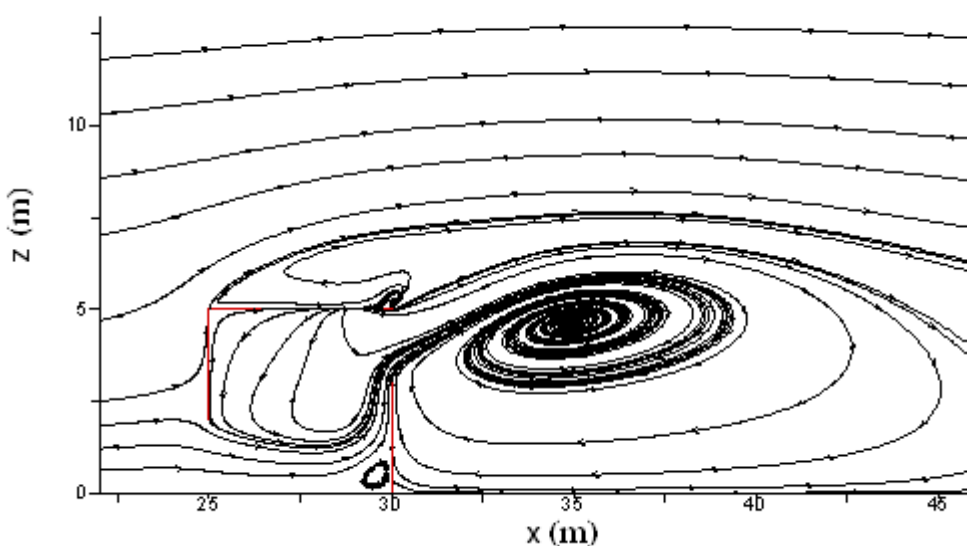
Em relação ao plano  $Y=1,25m$ , é visível as diferenças entre os dois casos em análise. No caso da abertura mínima, é notória uma recirculação no centro. Enquanto para o caso da abertura máxima verifica-se três zonas distintas de recirculação, duas no chão, perto das paredes que contem as aberturas e uma recirculação maior quando nos aproximamos do tecto.

As próximas figuras ilustram os planos escolhidos, para analisar o escoamento exterior. Apresenta-se assim, os resultados de duas simulações efectuadas, tais como, para o caso de modelo opaco e para a presença de aberturas referentes a 15% da área da fachada.

As figuras 3.56 e 3.57 apresentam os resultados obtidos para o plano de simetria ( $Y=0m$ ).



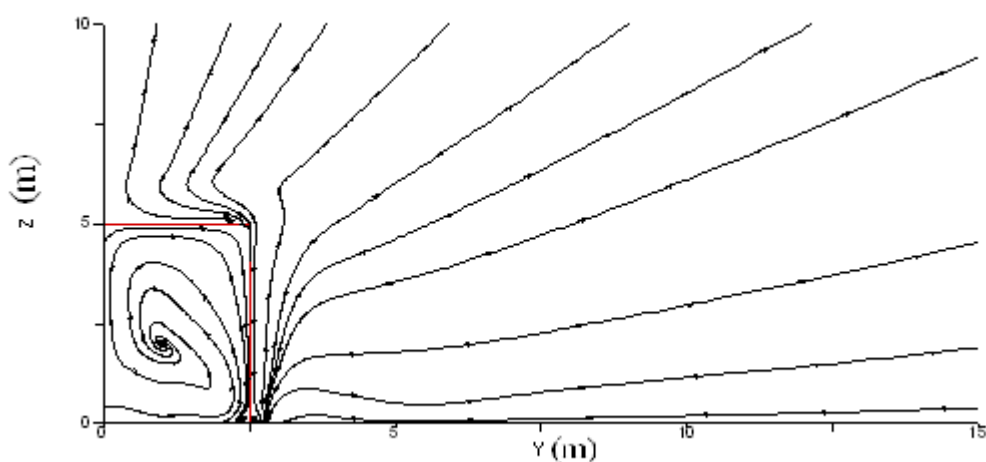
**Figura 3. 56-** Linhas de corrente, referentes ao caso opaco, plano de simetria



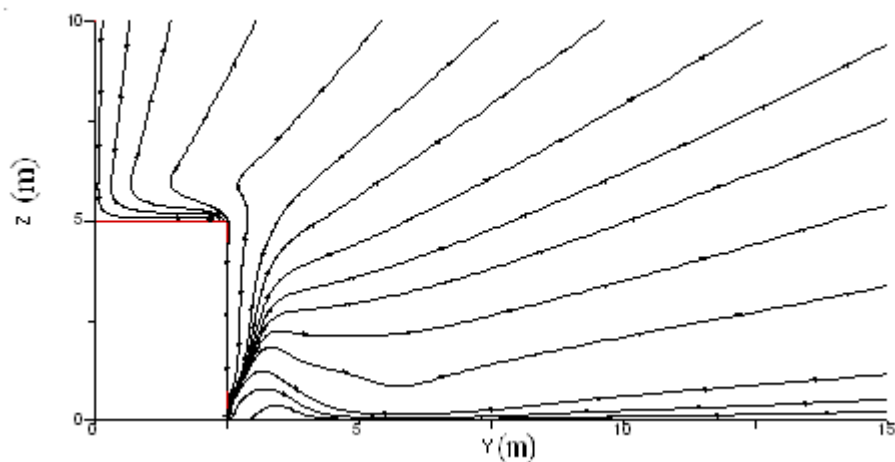
**Figura 3. 57-** Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 15%, plano  $Y=0m$

As figuras 3.56 e 3.57, referentes ao plano de simetria ilustram uma zona de recirculação a jusante do corpo, quer para o caso opaco, quer para o caso com a presença de aberturas. Com a introdução de aberturas denota-se um ligeiro deslocamento do centro da bolha de recirculação para baixo. Também é notório um vórtice perto da parede a montante, no caso do modelo opaco.

As figuras 3.58 e 3.59 apresentam os resultados obtidos para o plano transversal  $X=27,5m$ .



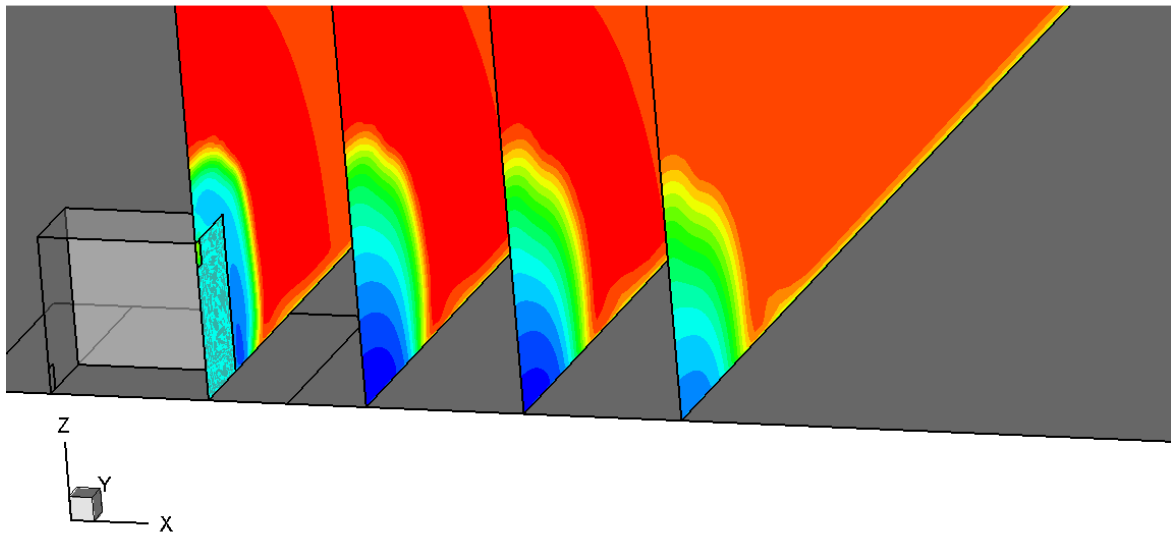
**Figura 3. 58-** Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 15%, plano  $X=27,5m$



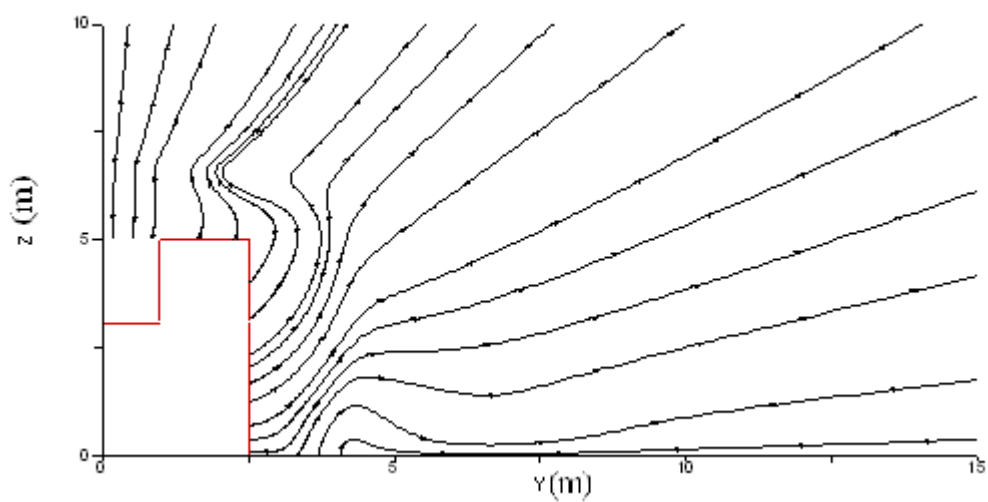
**Figura 3. 59-** Linhas de corrente, referentes ao caso opaco, plano  $X=27,5m$

A análise efectuada ao plano transversal situado ao meio do cubo nestes dois casos demonstra uma proximidade de resultados, é visível um ponto de estagnação no chão perto da parede a jusante.

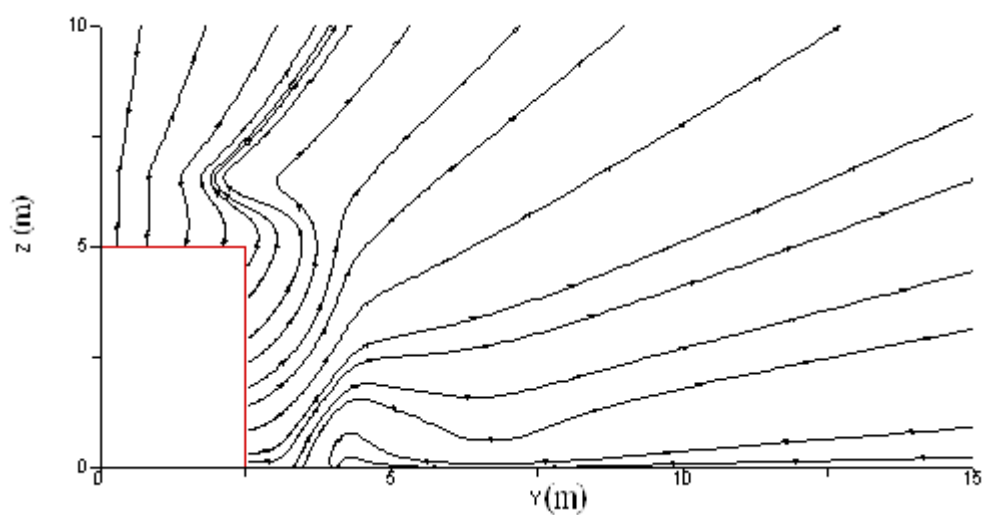
A próxima figura ilustra vários planos transversais, tais como,  $X=30\text{m}$ ;  $35\text{m}$ ;  $40\text{m}$ ;  $45\text{m}$ .



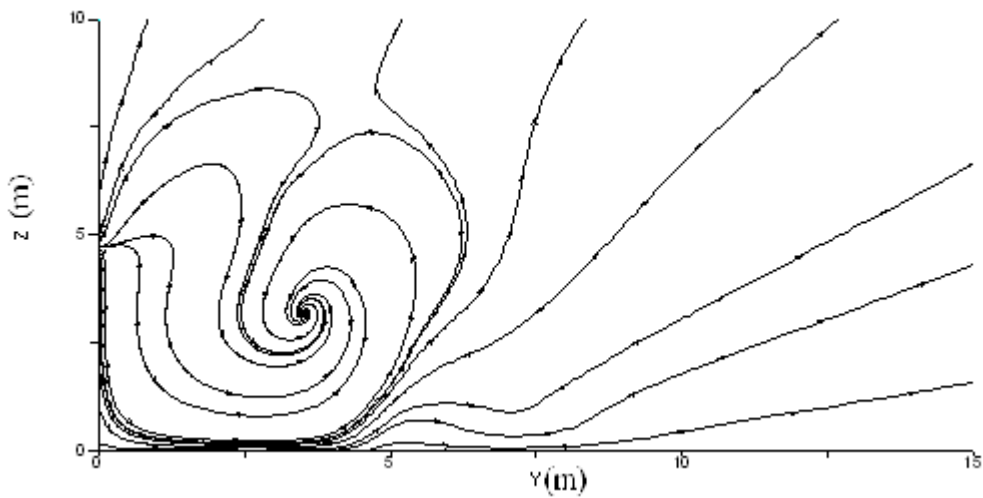
**Figura 3. 60-** Vários planos transversais, ( $X=30\text{m}$ ;  $35\text{m}$ ;  $40\text{m}$ ;  $45\text{m}$ )



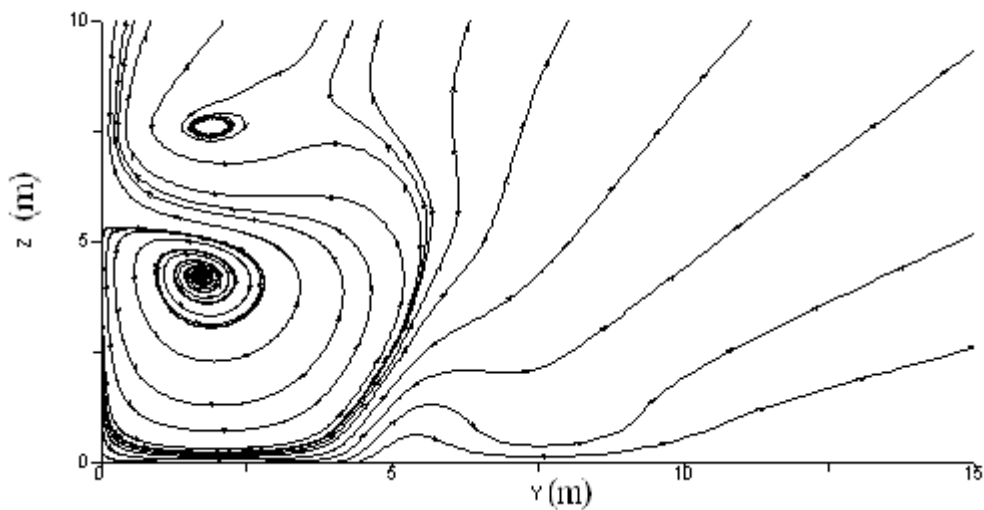
**Figura 3. 61-** Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 15%, plano X=30m



**Figura 3. 62-** Linhas de corrente, referentes ao caso opaco, plano X=30m

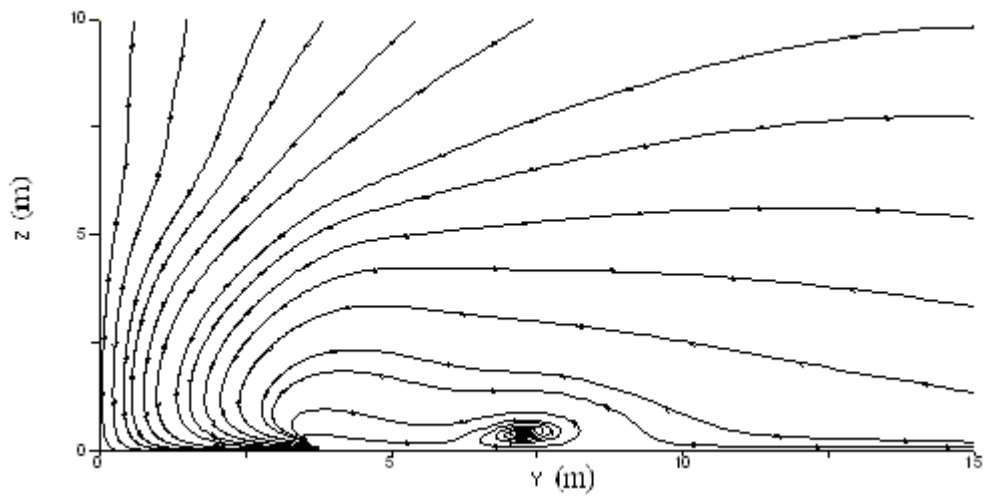


**Figura 3. 63-** Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 15%, plano X=35m

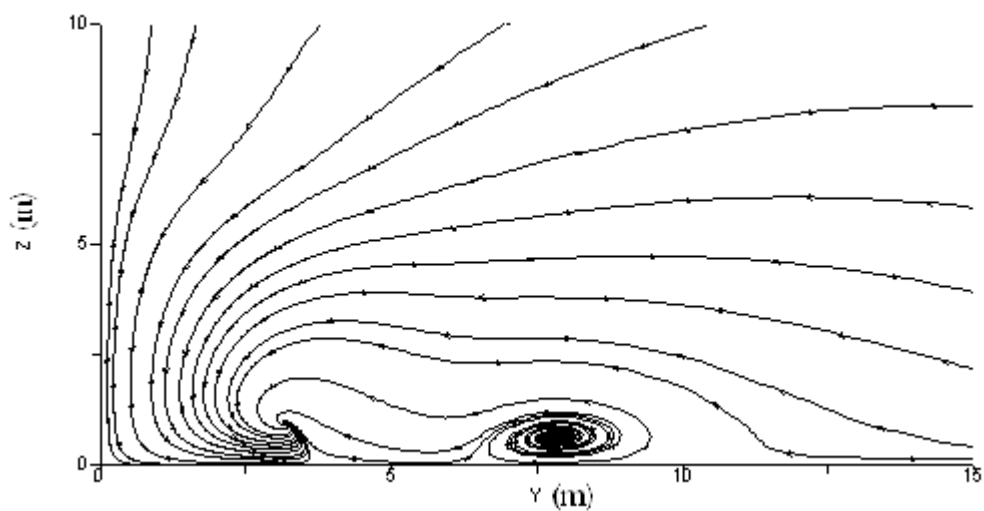


**Figura 3. 64-** Linhas de corrente, referentes ao caso opaco, plano X=35m

Neste plano transversal situado a 5 metros de distância da parede a jusante, verifica-se algumas diferenças entre os dois casos em análise. No caso do modelo opaco é visível a presença de dois vórtices, enquanto no caso de presença de aberturas restringe-se a um só.

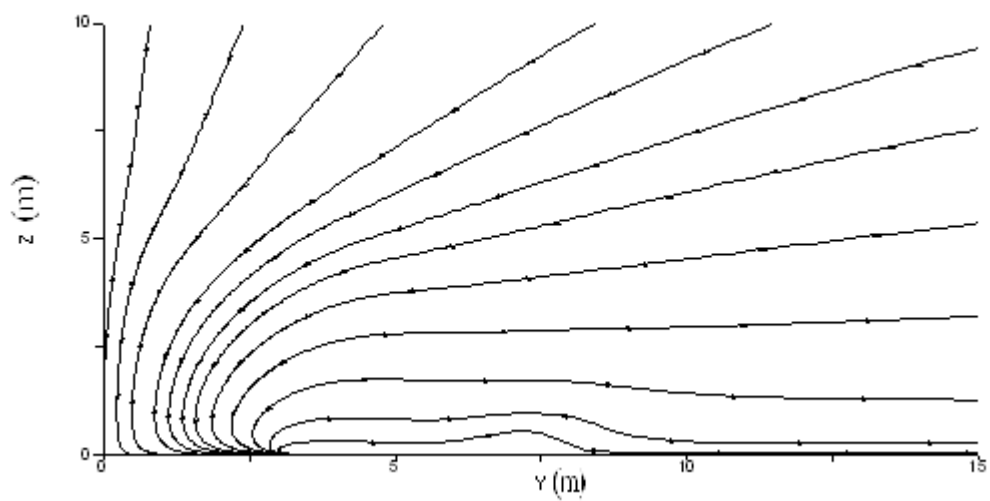


**Figura 3. 65-** Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 15%, plano X=40m

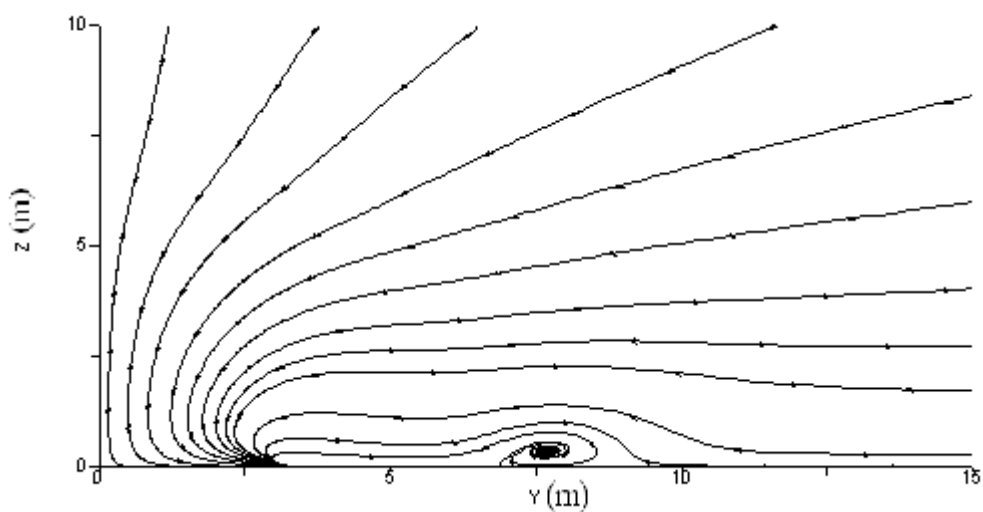


**Figura 3. 66-** Linhas de corrente, referentes ao caso opaco, plano X=40m

Esta análise ao plano X=40m, existe uma proximidade de resultados obtidos. Tanto no caso opaco, como com a presença de aberturas, pode-se observar um vórtice, denominado por vórtice de ferradura mais afastado do cubo e um ponto de estagnação com maior acréscimo no caso opaco.



**Figura 3. 67-** Linhas de corrente, referentes ao caso de abertura 15%, plano X=45m



**Figura 3. 68-** Linhas de corrente, referentes ao caso opaco, plano X=45m

No plano X=45 verifica-se uma diminuição do vórtice, quando afastamo-nos do obstáculo no caso do modelo opaco. Sendo no caso da presença de aberturas o vórtice é inexistente.

## 4. Características da perda de carga nas aberturas

Com o objectivo de caracterizar o comportamento do escoamento nas aberturas, através da sua perda de carga, foram estabelecidos vários planos de referência nas aberturas e criadas diversas linhas horizontais, normais às aberturas, tornando possível analisar a evolução da pressão. Numa primeira fase calculou-se o valor da pressão média exterior, nas zonas das aberturas para o modelo opaco. De seguida verificou-se como variou a pressão média exterior e retirou-se os valores da pressão média interior, em função da presença das aberturas, assim como, com a variação do grau de porosidade da fachada, de modo a ser possível determinar o coeficiente da perda de carga nas aberturas.

Esta análise foi feita nos intervalos  $x=[24\text{m};27,5\text{m}]$  e  $x=[28,5\text{m};32,5\text{m}]$ , correspondendo à entrada ( $x=25\text{m}$ , abertura 1) e à saída ( $x=30\text{m}$ , abertura 2). Excepção feita ao modelo opaco cujos intervalos são  $x=[23\text{m};25\text{m}]$  e  $x=[30\text{m};32\text{m}]$ .

### 4.1 Pressão média nas aberturas de ventilação

#### 4.1.1 Cubo opaco

A pressão média exterior na zona das aberturas, a montante e a jusante, para o cubo opaco foi estudada para  $x=25\text{m}$  e  $30\text{m}$  respectivamente, através das seguintes expressões:

- Pressão média exterior a montante

$$\bar{P}_1 ext = \frac{\sum_i P_{1i} ext \times A_i}{\sum_i A_i}$$

- Pressão média exterior a jusante

$$\bar{P}_2 ext = \frac{\sum_i P_{2i} ext \times A_i}{\sum_i A_i}$$

onde, o somatório  $i$  se estende aos elementos da malha que integram a área das aberturas.

- Cubo opaco (2,5%)

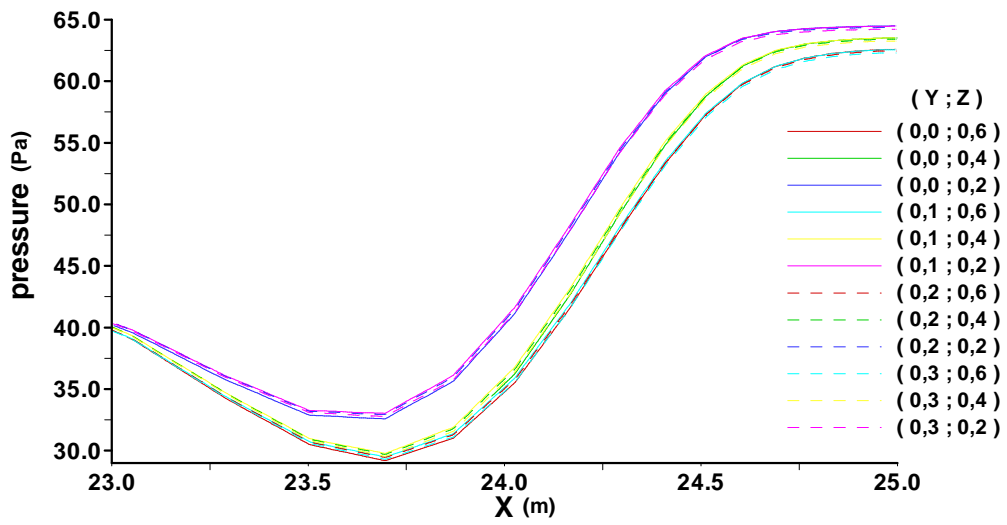


Figura 4. 1- Pressão média exterior na zona da abertura a montante (cubo opaco), caso 2,5%

$$\bar{P}_{1ext} = 63,44 Pa$$

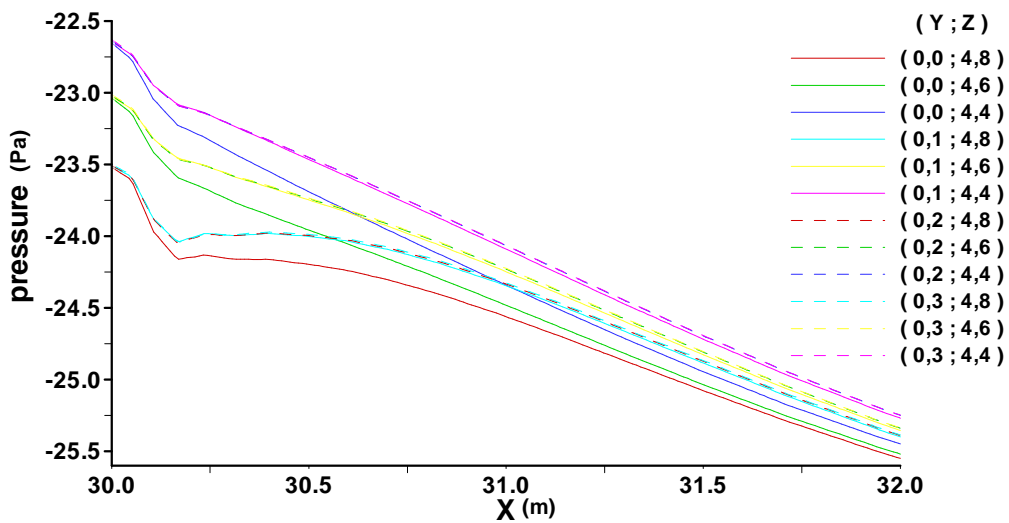


Figura 4. 2- Pressão média exterior na zona da abertura a jusante (cubo opaco), caso 2,5%

$$\bar{P}_{2ext} = -23,06 Pa$$

- Cubo opaco (5%)

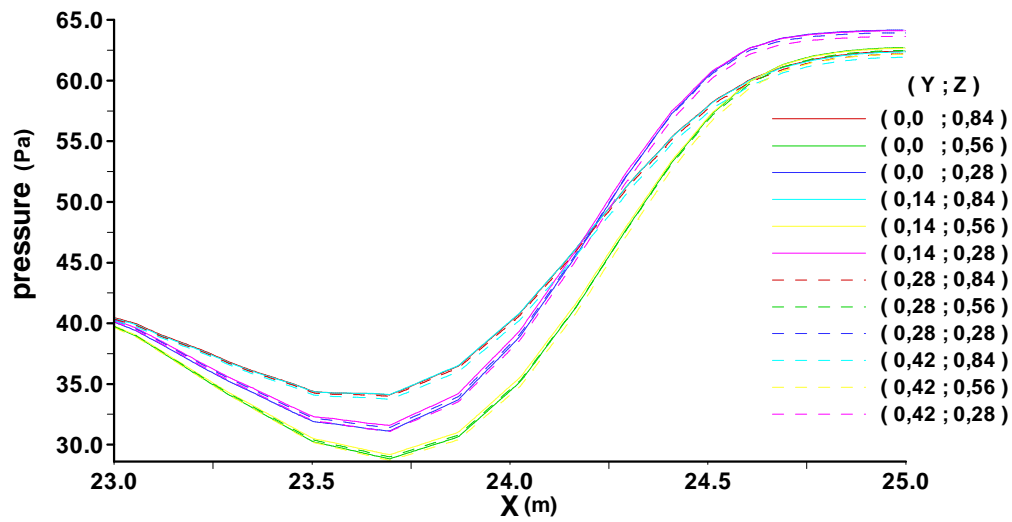


Figura 4. 3- Pressão média exterior na zona da abertura a montante (cubo opaco), caso 5%

$$\bar{P}_1 ext = 62,88 Pa$$

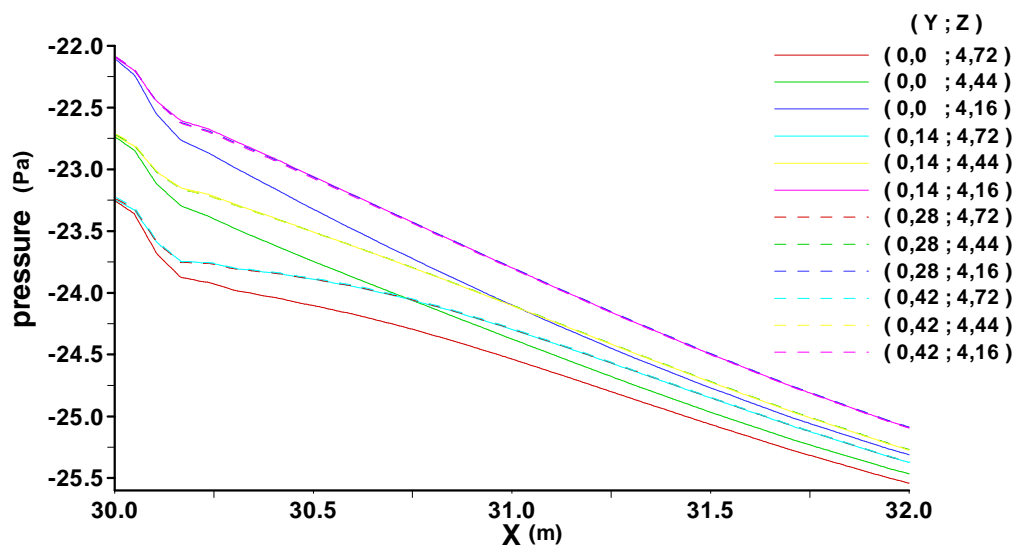


Figura 4. 4- Pressão média exterior na zona da abertura a jusante (cubo opaco), caso 5%

$$\bar{P}_2 ext = -22,69 Pa$$

- Cubo opaco (7,5%)

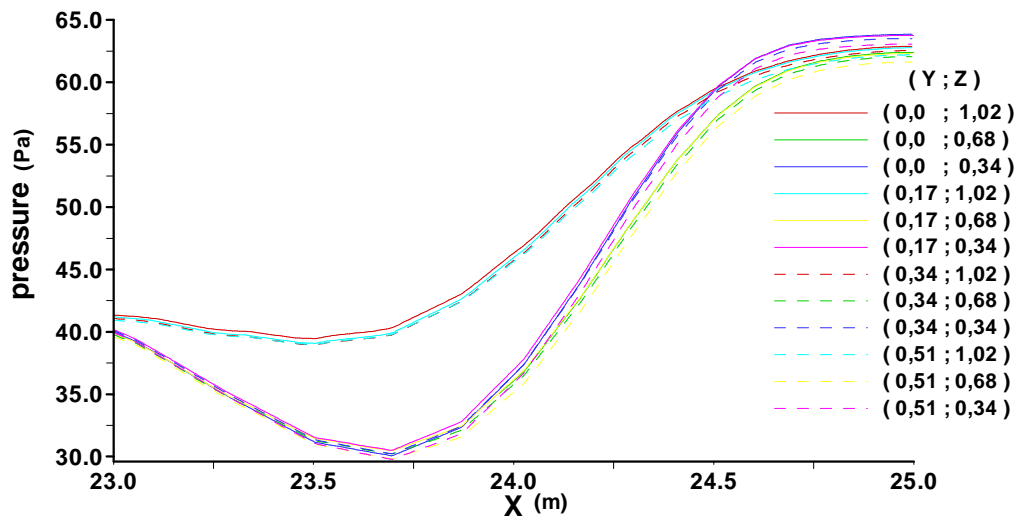


Figura 4. 5- Pressão média exterior na zona da abertura a montante (cubo opaco), caso 7,5%

$$\bar{P}_{1ext} = 62,75Pa$$

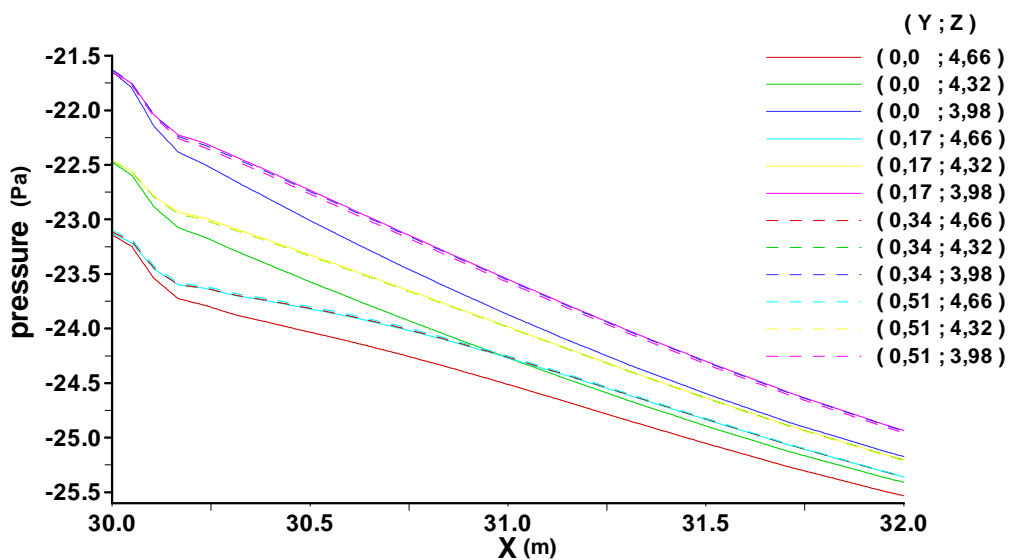


Figura 4. 6- Pressão média exterior na zona da abertura a jusante (cubo opaco), caso 7,5%

$$\bar{P}_{2ext} = -22,42Pa$$

- Cubo opaco (10%)

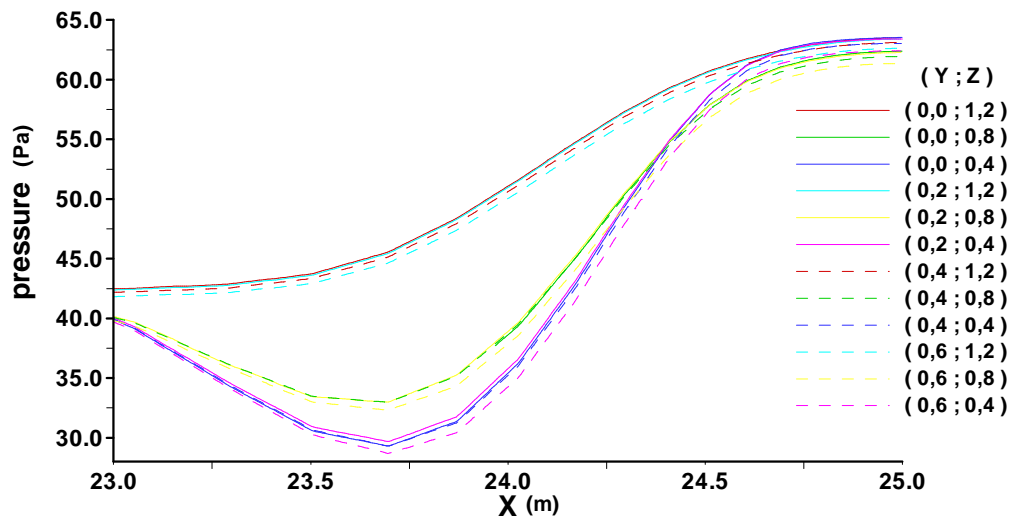


Figura 4. 7- Pressão média exterior na zona da abertura a montante (cubo opaco), caso 10%

$$\bar{P}_1 ext = 62,74 Pa$$

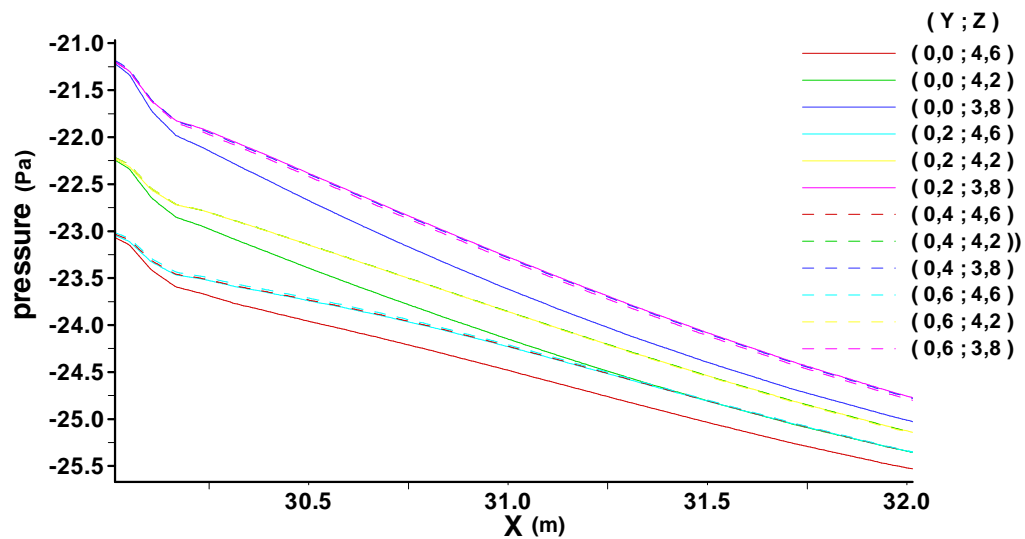


Figura 4. 8- Pressão média exterior na zona da abertura a jusante (cubo opaco), caso 10%

$$\bar{P}_2 ext = -22,13 Pa$$

- Cubo opaco (15%)

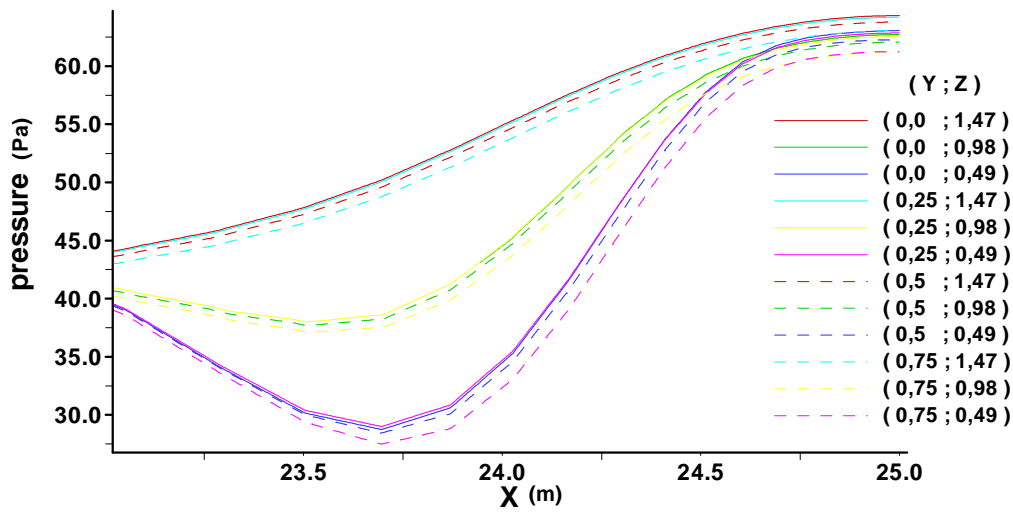


Figura 4. 9- Pressão média exterior na zona da abertura a montante (cubo opaco), caso 15%

$$\bar{P}_1 ext = 62,80 Pa$$

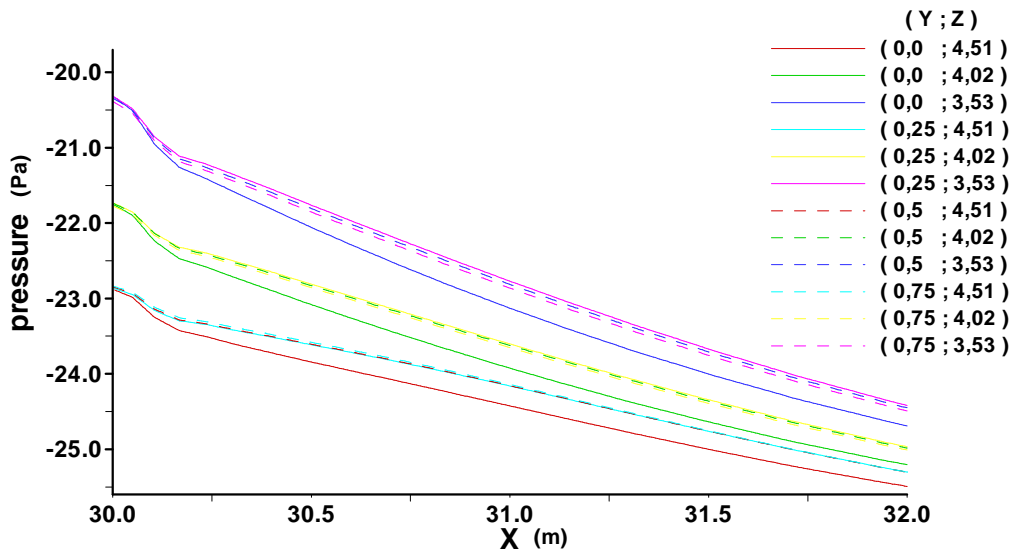


Figura 4. 10- Pressão média exterior na zona da abertura a jusante (cubo opaco), caso 15%

$$\bar{P}_2 ext = -21,65 Pa$$

#### 4.1.2 Pressão média exterior e interior nas aberturas

No caso da presença das aberturas, a pressão média exterior a montante (abertura 1) e a jusante (abertura 2) foi analisada em  $x=24,5\text{m}$  e em  $x=31\text{m}$ , respectivamente. Enquanto, a pressão média no interior do cubo será estudada em  $x=26\text{m}$  e em  $x=29\text{m}$ , isto é, a um metro das duas aberturas, através das seguintes expressões:

- Pressão média exterior a montante

$$\bar{P}_1 ext = \frac{\sum_i P_{1i} ext \times A_i}{\sum_i A_i}$$

- Pressão média interior a montante

$$\bar{P}_1 int = \frac{\sum_i P_{1i} int \times A_i}{\sum_i A_i}$$

- Pressão média interior a jusante

$$\bar{P}_2 int = \frac{\sum_i P_{2i} int \times A_i}{\sum_i A_i}$$

- Pressão média exterior a jusante

$$\bar{P}_2 ext = \frac{\sum_i P_{2i} ext \times A_i}{\sum_i A_i}$$

onde, o somatório  $i$  se estende aos elementos da malha que integram a área das aberturas.

- Abertura de 2,5%

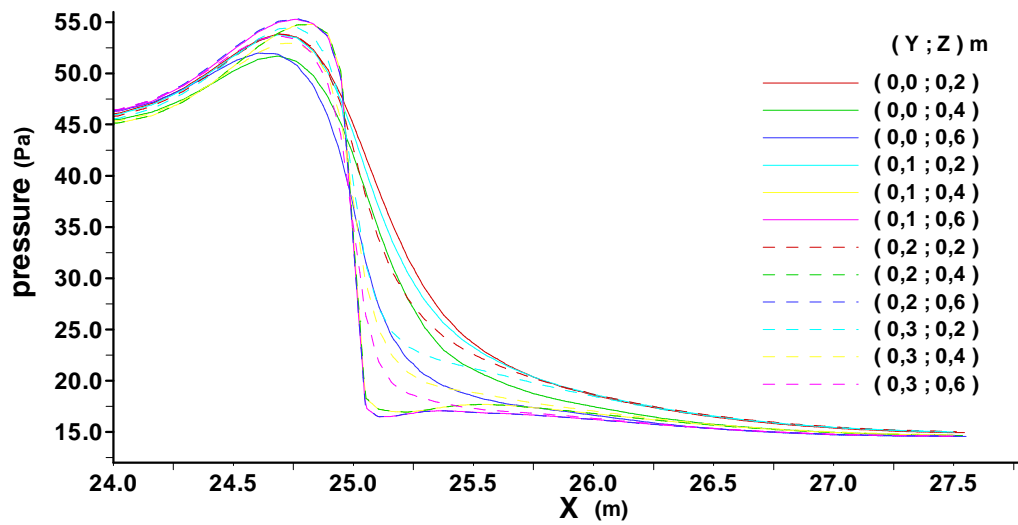


Figura 4. 11- Pressão média exterior e interior na abertura a montante, caso 2,5%

$$\bar{P}_1 ext = 51,36 Pa$$

$$\bar{P}_1 int = 17,33 Pa$$

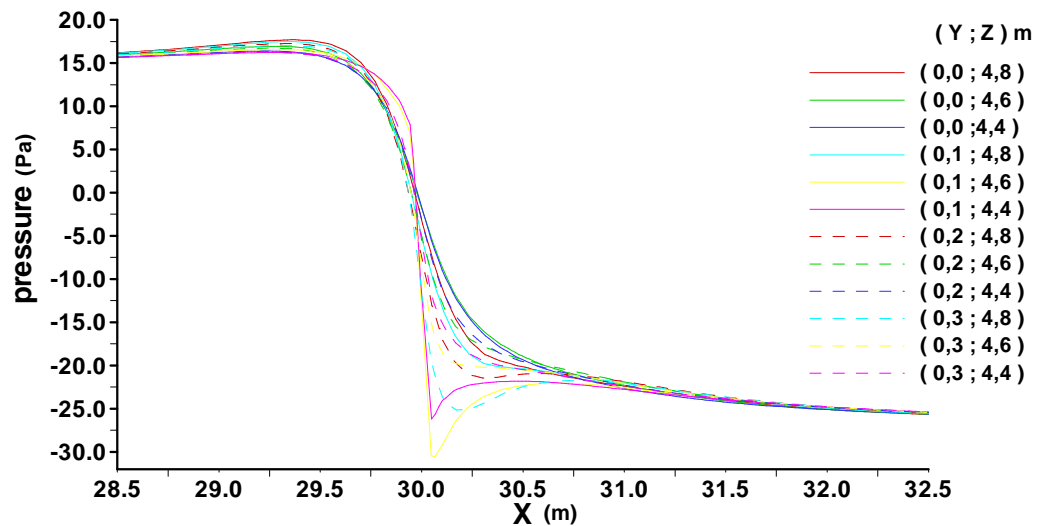
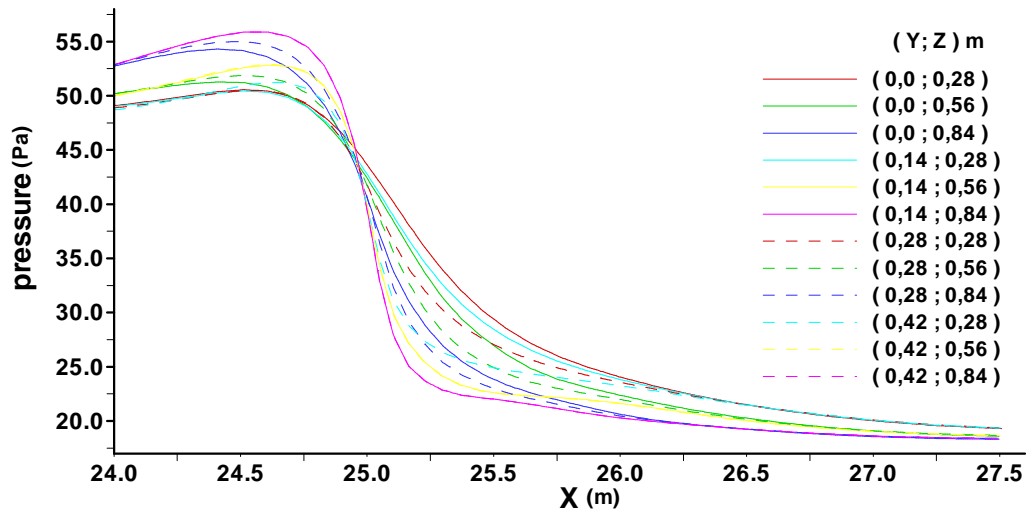


Figura 4. 12- Pressão média exterior e interior na abertura a jusante, caso 2,5%

$$\bar{P}_2 int = 16,52 Pa$$

$$\bar{P}_2 ext = -22,28 Pa$$

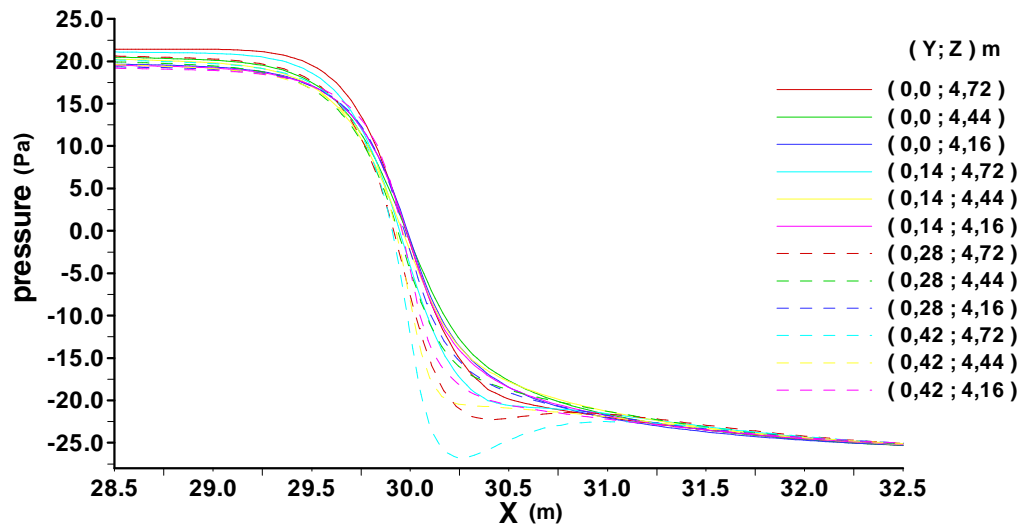
- Abertura de 5%



**Figura 4. 13-** Pressão média exterior e interior na abertura a montante, caso 5%

$$\bar{P}_1 ext = 52,60 Pa$$

$$\bar{P}_1 int = 22,01 Pa$$



**Figura 4. 14-** Pressão média exterior e interior na abertura a jusante, caso 5%

$$\bar{P}_2 int = 19,79 Pa$$

$$\bar{P}_2 ext = -21,81 Pa$$

- Abertura de 7,5%

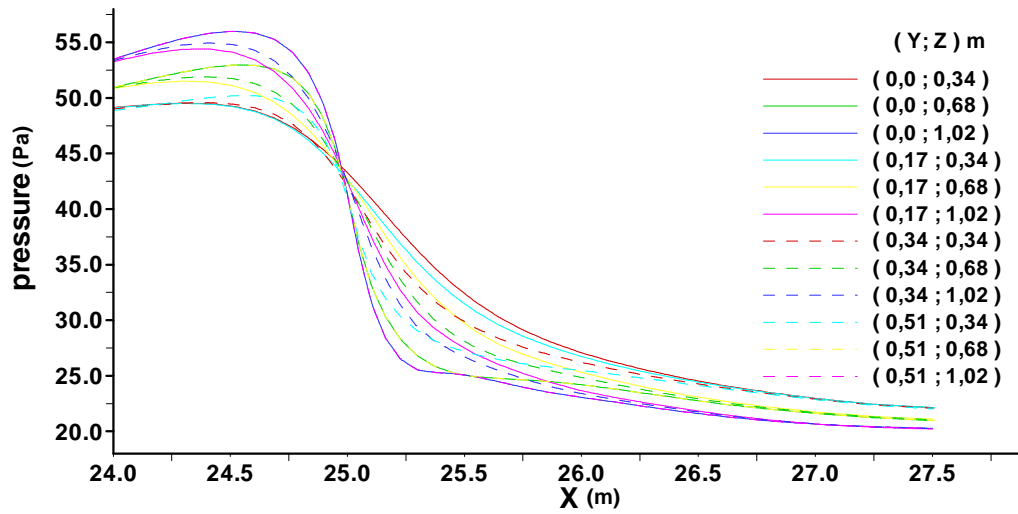


Figura 4. 15- Pressão média exterior e interior na abertura a montante, caso 7,5%

$$\bar{P}_1 ext = 52,31 Pa$$

$$\bar{P}_1 int = 24,78 Pa$$

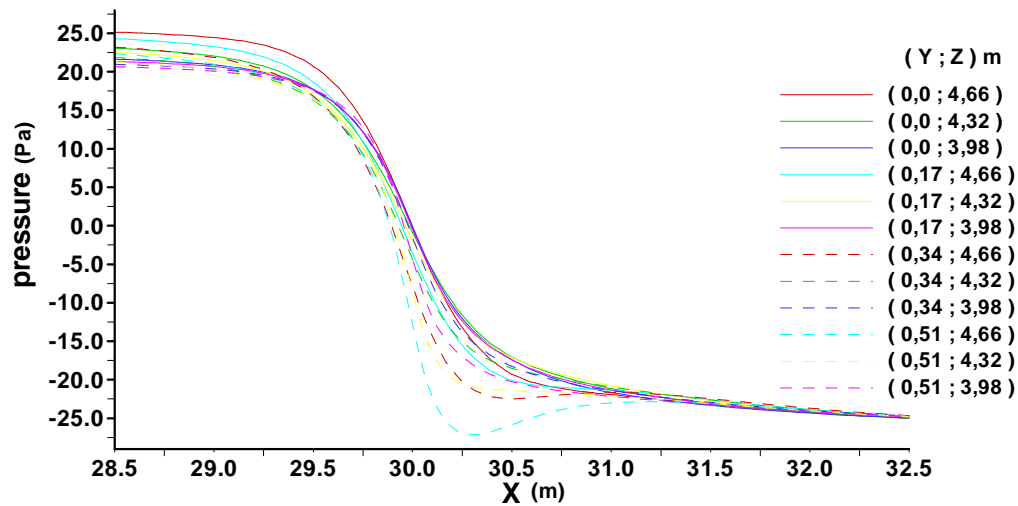


Figura 4. 16- Pressão média exterior e interior na abertura a jusante, caso 7,5%

$$\bar{P}_2 int = 21,38 Pa$$

$$\bar{P}_2 ext = -21,65 Pa$$

- Abertura de 10%

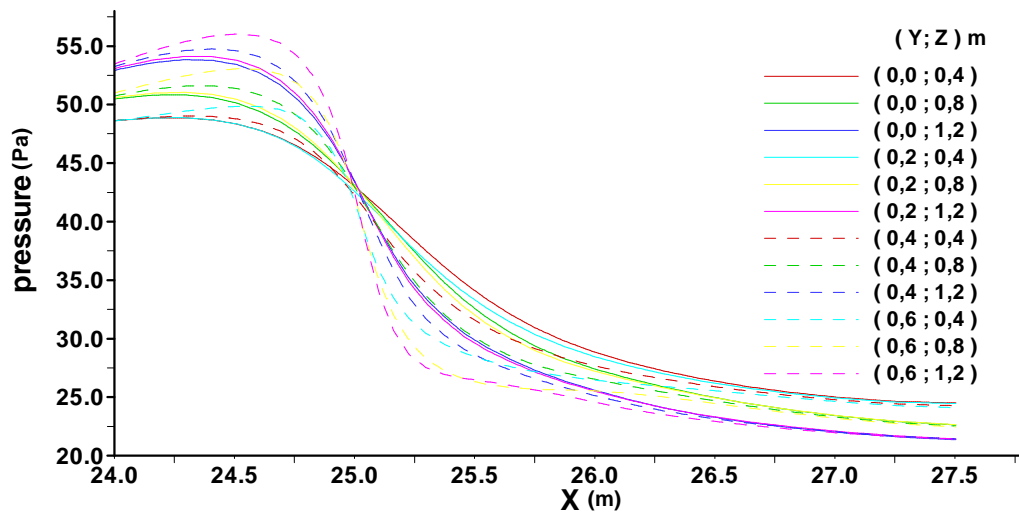


Figura 4. 17- Pressão média exterior e interior na abertura a montante, caso 10%

$$\bar{P}_1 ext = 51,54 Pa$$

$$\bar{P}_1 int = 26,55 Pa$$

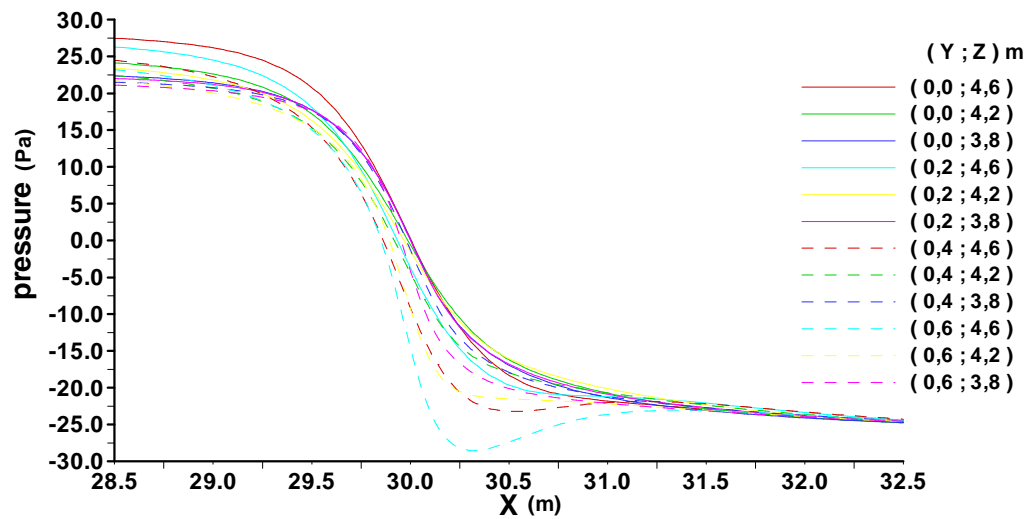


Figura 4. 18- Pressão média exterior e interior na abertura a jusante, caso 10%

$$\bar{P}_2 int = 21,91 Pa$$

$$\bar{P}_2 ext = -21,49 Pa$$

- Abertura de 15%

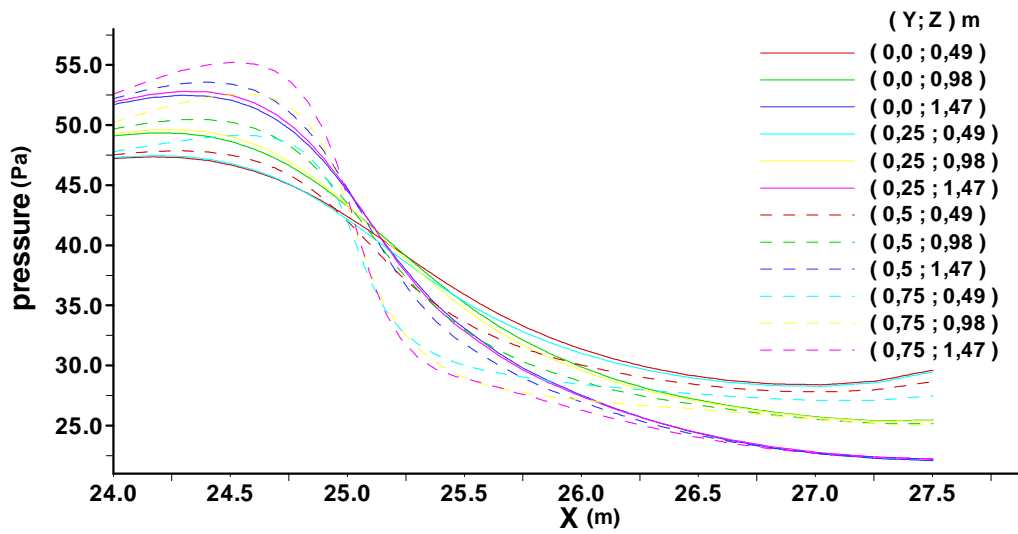


Figura 4. 19- Pressão média exterior e interior na abertura a montante, caso 15%

$$\bar{P}_1 ext = 50,32 Pa$$

$$\bar{P}_1 int = 28,68 Pa$$

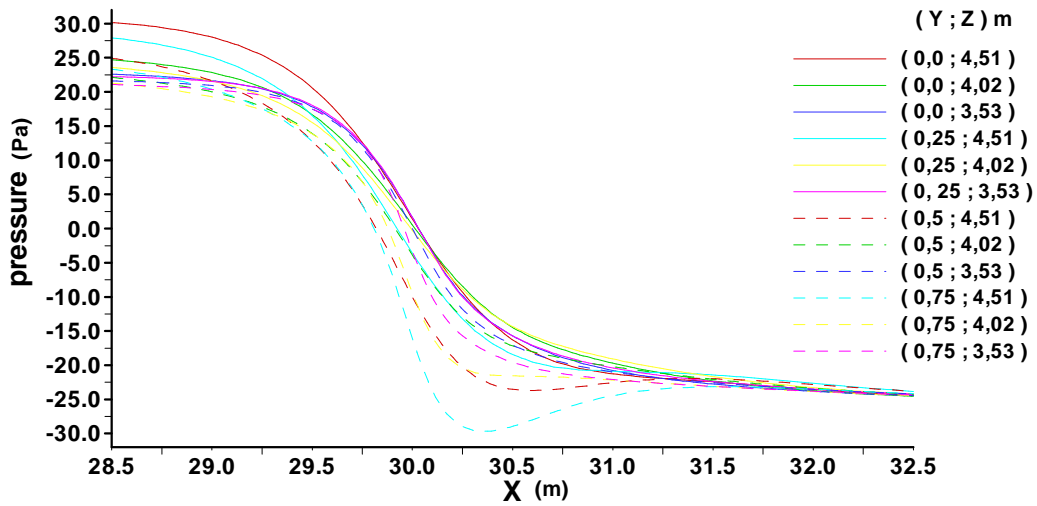


Figura 4. 20- Pressão média exterior e interior na abertura a jusante, caso 15%

$$\bar{P}_2 int = 21,96 Pa$$

$$\bar{P}_2 ext = -21,21 Pa$$

Os resultados anteriormente obtidos estão representados na tabela 4.1.

Aberturas	Abertura 1		Abertura 2		$\Delta P$ (Pa)	
	Pressão Média (Pa)		Pressão Média (Pa)		abertura 1	abertura 2
	exterior (X=24,5m)	interior (X=26m)	interior (X=29m)	exterior (X=31m)		
2,50%	51,36	17,33	16,52	-22,28	34,03	38,80
5%	52,60	22,01	19,79	-21,81	30,59	41,60
7,50%	52,31	24,78	21,38	-21,65	27,53	43,03
10%	51,54	26,55	21,91	-21,49	24,99	43,39
15%	50,32	28,68	21,96	-21,21	21,64	43,18
<b>Opaco</b>	<b>(X=25m)</b>			<b>(X=30m)</b>		
2,50%	63,44			-23,06		
5%	62,88			-22,69		
7,50%	62,75			-22,42		
10%	62,74			-22,13		
15%	62,80			-21,65		

**Tabela 4. 1**-Pressão média exterior e interior e diferença de pressão nas aberturas

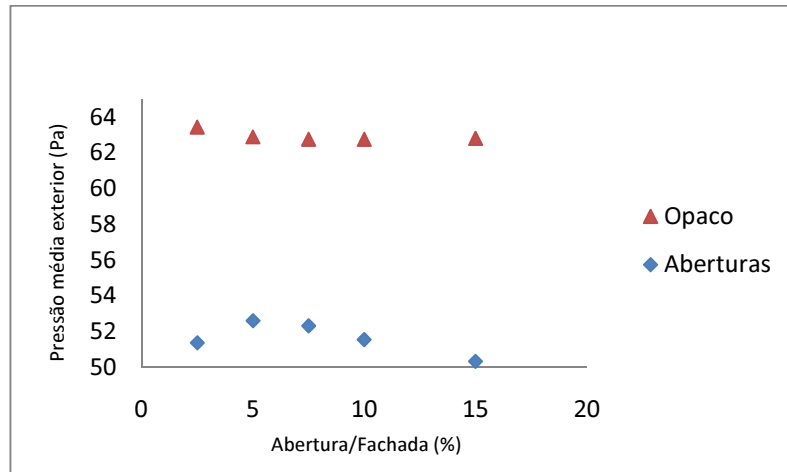
Na tabela 4.1 estão representadas as diferenças de pressões ( $\Delta P$ ), considerando as pressões médias interiores a um metro de distância das aberturas.

Para a análise das características da perda de carga nas aberturas foi também calculado as diferenças de pressões ( $\Delta P^*$ ), considerando a pressão interior no centro do cubo ( $x=27,5m; y=0m; z=2,5m$ ), isto é, a pressão média interior, quer para a abertura 1, quer para a abertura 2 igual ao valor da pressão no centro do cubo. Obtêm-se os seguintes valores.

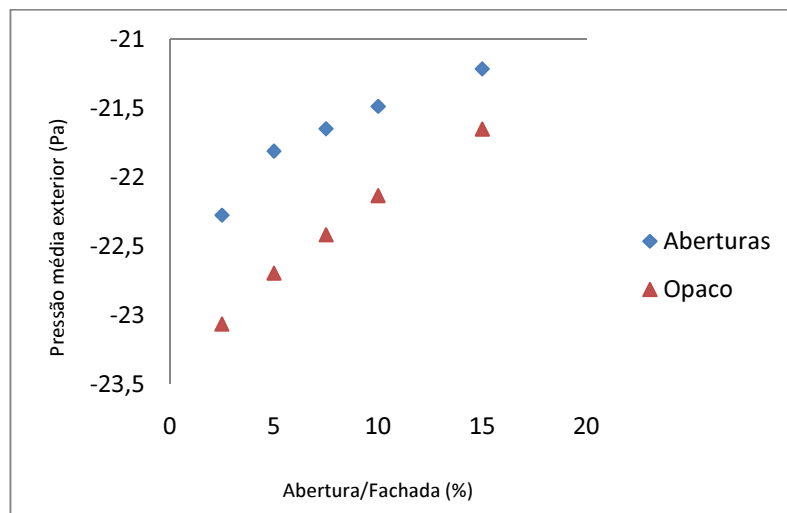
Aberturas	Pressão Média (Pa)			$\Delta P^*$ (Pa)	
	exterior (X=24,5m)	centro (X=27,5m; Y=0m; Z=2,5m)	exterior (X=31m)	abertura 1	abertura 2
2,50%	51,36	14,37	-22,28	36,99	36,65
5%	52,6	18,31	-21,81	34,29	40,12
7,50%	52,31	20,15	-21,65	32,16	41,8
10%	51,54	21,08	-21,49	30,46	42,57
15%	50,32	21,3	-21,21	29,02	42,51

**Tabela 4. 2**-Pressão no centro, pressão média exterior e diferença de pressão nas aberturas

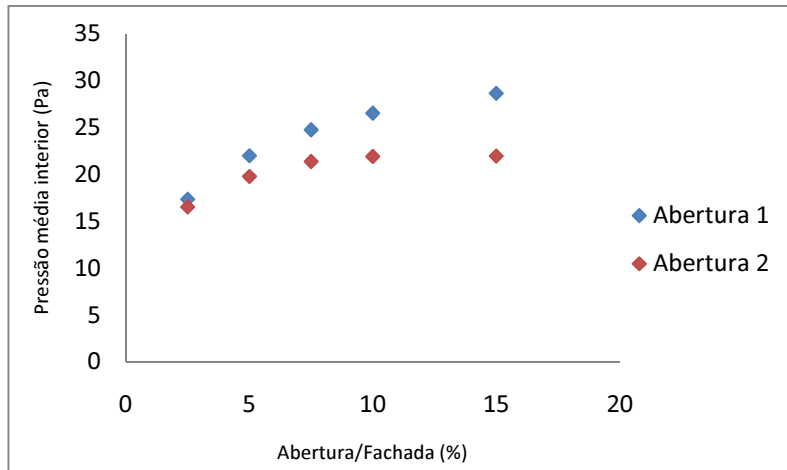
Da figura 4.21 à figura 4.24 é ilustrado a pressão média exterior e interior, assim como a diferença de pressão nas aberturas do cubo, considerando  $\Delta P$ .



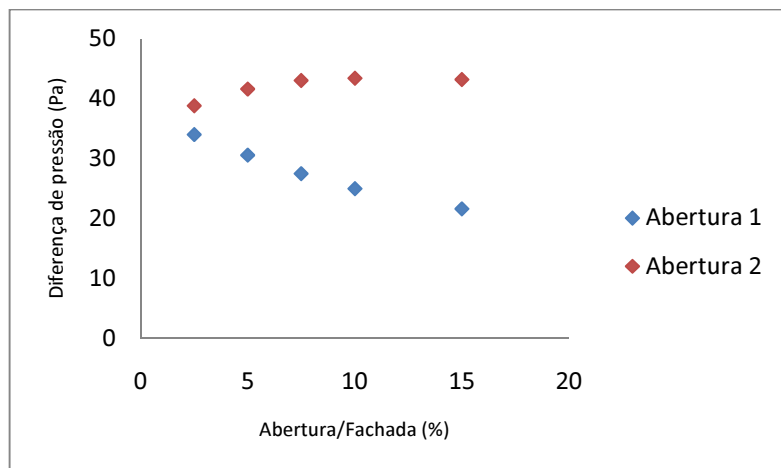
**Figura 4. 21-** Pressão média exterior a montante (x=24,5m)



**Figura 4. 22-** Pressão média exterior a jusante (x=31m)



**Figura 4. 23-** Pressão média interior



**Figura 4. 24-** Diferença de pressão nas aberturas ( $\Delta P$ )

Como se pode verificar a diferença da pressão na abertura 1 têm um decréscimo de valor à medida que a dimensão da abertura aumenta, contrariamente à diferença da pressão na abertura 2 que sofre um acréscimo de valor face ao aumento da dimensão da abertura. Este aumento da pressão na abertura 2 só não se verifica para o caso da abertura correspondente a 15% da área da fachada.

## 4.2 Coeficiente da perda de carga nas aberturas

As características do escoamento nas aberturas de ventilação podem ser expressas pelo seu coeficiente da perda de carga. A perda de carga numa singularidade do escoamento, neste caso a abertura de ventilação, pode ser obtida a partir da equação 4.1:

$$\xi = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \times \rho \times U^2} \quad \text{Eq.4.1}$$

onde,

- $\rho$  é a massa volúmica ( $\rho=1,225 \text{ Kg/m}^3$ )
- $U$  é a velocidade média nas aberturas (m/s)
- $\Delta P$  é a diferença de pressão (Pa)
- $\xi$  é o coeficiente da perda de carga característica, que pretendemos determinar.

Na tabela 4.3 estão representados os valores dos caudais mássicos (ver anexo 1), das áreas, assim como o valor das respectivas velocidades médias nas aberturas, para cada simulação efectuada.

Abertura	A(m <sup>2</sup> )	Q(kg/s)	U <sub>1;2</sub> =Q/( $\rho$ A) (m/s)
2,50%	0,320	1,850	4,720
5%	0,627	3,733	4,859
7,50%	0,938	5,669	4,931
10%	1,248	7,616	4,981
15%	1,901	11,801	5,067

**Tabela 4. 3-**Valores das áreas, do caudal mássico e das velocidades médias nas aberturas

É de referir que os escoamentos simulados são isotérmicos, sendo assim  $U_1 = U_2$ .

A perda de carga das aberturas foi obtida através da equação 4.1.

A próxima tabela ilustra os valores da velocidade, diferença de pressão e da perda de carga para as diversas aberturas, considerando as diferenças de pressões  $\Delta P$ .

Abertura	$\Delta \bar{P}_1$ (Pa)	$\Delta \bar{P}_2$ (Pa)	U(m/s)	$\xi_1$	$\xi_2$
2,50%	34,03	38,80	4,72	2,49	2,84
5%	30,59	41,60	4,86	2,12	2,88
7,50%	27,53	43,03	4,93	1,85	2,89
10%	24,99	43,39	4,98	1,65	2,86
15%	21,64	43,18	5,07	1,38	2,75

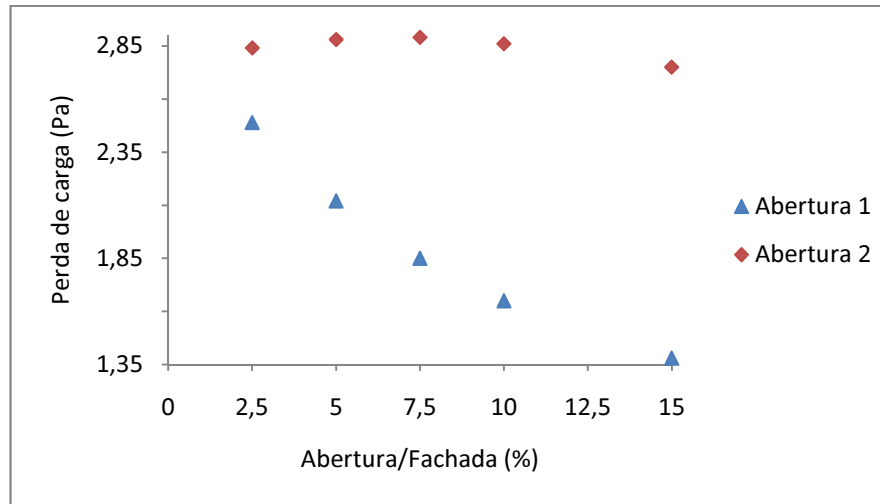
**Tabela 4. 4-**Perda de carga nas aberturas, considerando  $\Delta P$ .

Na tabela 4.5 estão representados os valores obtidos da perda de carga das aberturas, considerando as diferenças de pressões ( $\Delta P^*$ ).

Abertura	$\Delta \bar{P}_1$ (Pa)	$\Delta \bar{P}_2$ (Pa)	U(m/s)	$\xi_1$	$\xi_2$
2,50%	36,99	36,65	4,72	2,71	2,69
5%	34,29	40,12	4,86	2,37	2,77
7,50%	32,16	41,80	4,93	2,16	2,81
10%	30,46	42,57	4,98	2,01	2,80
15%	29,02	42,51	5,07	1,85	2,70

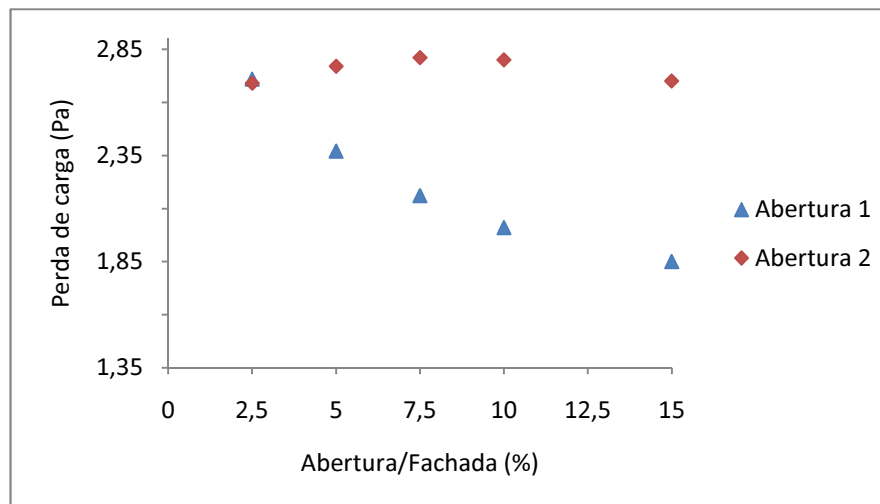
**Tabela 4. 5-** Perda de carga nas aberturas, considerando  $\Delta P^*$

A figura 4.25 ilustra os valores da perda de carga nas aberturas, considerando as pressões médias interiores perto das aberturas, isto é,  $\bar{P}_1_{int}$  em  $x=26m$  e  $\bar{P}_2_{int}$  em  $x=29m$ .



**Figura 4. 25-** Perda de carga nas aberturas ( $\Delta P$ )

A figura 4.26 ilustra os valores da perda de carga nas aberturas, considerando a pressão interior no centro do cubo ( $x=27,5m; y=0m; z=2,5m$ ).



**Figura 4. 26-** Perda de carga nas aberturas  $\Delta P^*$

Conclui-se que existe uma maior variação da perda de carga na abertura 1 do que na abertura 2. Na abertura a montante a perda de carga diminui quando se aumentou a área da abertura. Enquanto, na abertura a jusante a perda de carga tende a estabilizar.



## 5. Conclusões

O CFD é uma ferramenta muito importante em vários domínios da engenharia. Permite testar diferentes configurações num ambiente virtual e obter uma previsão do escoamento gerado. Contudo o tempo requerido para se proceder às simulações com programas de CFD continua a ser elevado.

Neste trabalho foram apresentados várias simulações numéricas, que permitiram analisar e visualizar o comportamento do escoamento quer no interior quer no exterior do cubo em análise.

Este estudo permitiu concluir que, quer a pressão no exterior e no interior do cubo, quer os valores da perda de carga variam com a porosidade da fachada.

Foi possível verificar que o valor da pressão exterior da abertura 1 diminuiu face aos valores obtidos para o modelo opaco. Enquanto o valor da pressão exterior da abertura 2 foi muito semelhante aos resultados obtidos para o modelo opaco.

Relativamente à diferença da pressão nas aberturas conclui-se que na abertura 1 existe um decréscimo de valor à medida que a dimensão da abertura aumenta, contrariamente à diferença da pressão na abertura 2 que sofre um acréscimo de valor face ao aumento da dimensão da abertura. Este aumento da pressão na abertura 2 só não se verifica para o caso da abertura correspondente a 15% da fachada.

O valor da perda de carga varia consoante a dimensão das aberturas de forma distinta a montante e a jusante. Verificou-se que à medida que a abertura aumenta, o valor da perda de carga na abertura 1 diminui. Enquanto, na abertura a jusante a perda de carga tende a estabilizar.

Em relação aos resultados da bolha recirculação verificou-se que, à medida que se aumenta a porosidade o centro da bolha de recirculação desloca-se para mais perto do chão.

Para próximos trabalhos, sugiro o estudo do escoamento no interior do cubo ser promovido pela acção conjunta do vento natural e da libertação de calor, assim como a presença de corpos dentro do espaço cúbico.

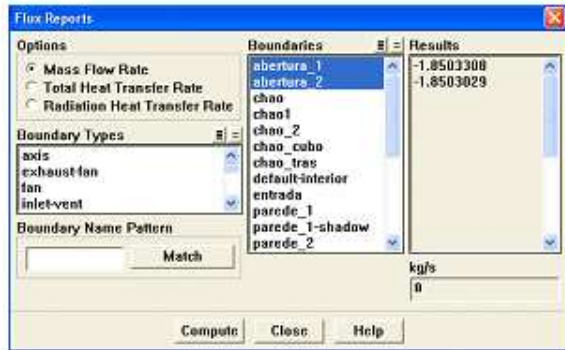
## 6. Referências Bibliográficas

- [1] J.F.A. Dias Delgado, A.R. Janeiro Borges e J.M. Paixão Conde, “Um programa de cálculo de Ventilação Natural de Edifícios”, Métodos Numericos en ingeniería, SEMNI, España 1999.
- [2] A.R. Janeiro Borges, “ Sobre a Influência da Constituição do Vento Natural na Aerodinâmica das construções”, Tese, LNEC, Lisboa,(1964).
- [3] J.A. Gil Saraiva, J.F.A. Dias Delgado e A.R. Janeiro Borges, “Pavilhões industriais: solicitações, interferência e ventilação natural”, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil* (1985).
- [4] HERCKERT, “*Dinâmica de Fluidos Computacional e suas aplicações*”, (2004).
- [5] FERREIRA, “*Análise e Implementação de Esquemas de Convecção e Modelos de Turbulência para simulação de escoamentos Incompressíveis envolvendo Superfícies Livres*”, (2001).
- [6] H.K. VERSTEEG, W. MALALASEKERA, “An introduction to computational fluids dynamics, The finite volume method”, Longman Group Ltd 1995.
- [7] J.F.B.N. Lopes Teixeira, “Estudo do comportamento de um edifício de habitação sujeito a ventilação natural e forçada”, Dissertação ao Mestrado, FCT-UNL, Lisboa 2009.
- [8] F.M. White, “Mecânica dos Fluidos”, McGraw-Hill, 4º ed., 2002.
- [9] FLUENT 6.2 User’s Guide (2005), Fluent Incorporated.

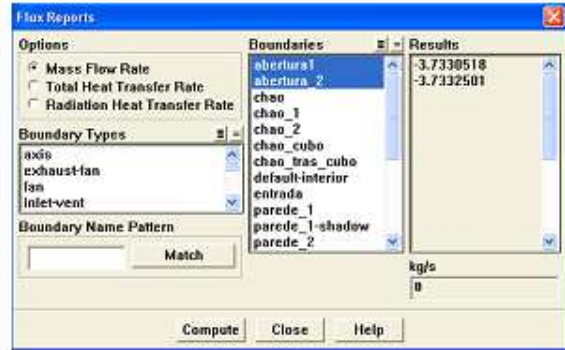


## 7. Anexos

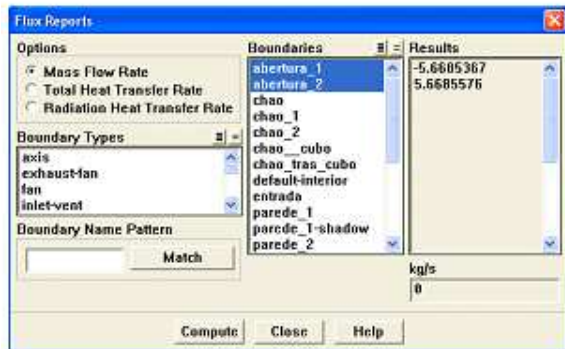
### Anexo 1



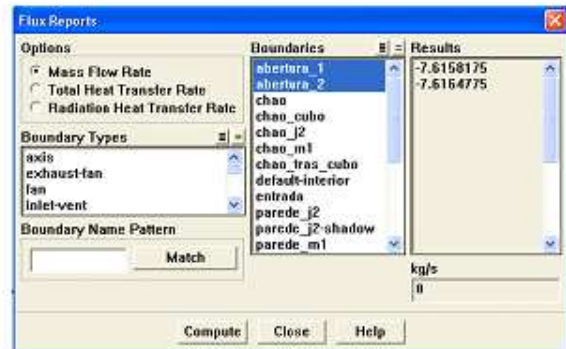
a)



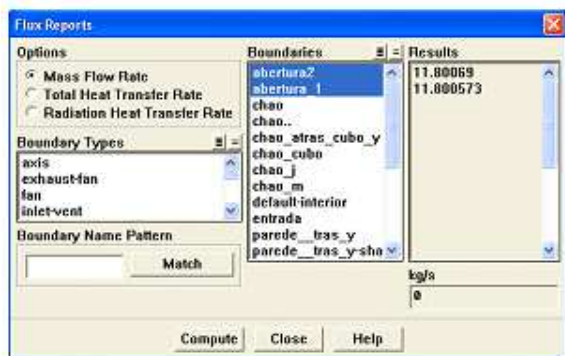
b)



c)



d)



e)

#### Valores dos caudais mássicos

- (a): aberturas correspondentes a 2,5%
- (b): aberturas correspondentes a 5%
- (c): aberturas correspondentes a 7,5%
- (d): aberturas correspondentes a 10%
- (e): aberturas correspondentes a 2,5%