



## **Desempenho energético de elementos construtivos usando CFD**

CFDApi

624(047.3)/  
LEC  
2006/CAMh



## **Desempenho energético de elementos construtivos usando CFD**

Agosto de 2006

Hugo Miguel Rodrigues Campelo

6241047.3/LEC 2006/CANM

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Nº 105001

24 02 10

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| 1ª PARTE .....                                          | 4  |
| TIJOLO 403 .....                                        | 4  |
| • <i>Características do tijolo</i> .....                | 5  |
| • <i>Características da grelha original</i> .....       | 5  |
| • <i>Características da grelha refinada</i> .....       | 6  |
| • <i>Resultados e dados das simulações</i> .....        | 6  |
| TIJOLO 401 .....                                        | 16 |
| • <i>Características da grelha</i> .....                | 17 |
| • <i>Resultados e dados das simulações</i> .....        | 18 |
| TIJOLO 404 .....                                        | 23 |
| • <i>Características da grelha</i> .....                | 23 |
| • <i>Resultados e dados das simulações</i> .....        | 24 |
| TIJOLO 101 .....                                        | 26 |
| • <i>Características da grelha</i> .....                | 27 |
| • <i>Resultados e dados das simulações</i> .....        | 27 |
| TIJOLOS 603, 604 E 605 .....                            | 30 |
| • <i>Resultados e dados das simulações</i> .....        | 30 |
| BLOCO 202 .....                                         | 38 |
| • <i>Características do bloco de betão normal</i> ..... | 38 |
| • <i>Características da grelha original</i> .....       | 38 |
| • <i>Características da grelha adaptada</i> .....       | 39 |
| • <b>RESULTADOS E DADOS DAS SIMULAÇÕES</b> .....        | 40 |
| 2ª PARTE .....                                          | 46 |
| BLOCO 202 – NÃO HOMOGÉNEO .....                         | 46 |
| BLOCO 202 – HOMOGÉNEO .....                             | 52 |
| 3ª PARTE .....                                          | 57 |

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| VENTILAÇÃO POR DESLOCAMENTO. O QUE É? .....      | 57 |
| EM QUE SALA FOI APLICADO ESTE MODELO? .....      | 58 |
| SIMULAÇÃO 1 .....                                | 60 |
| SIMULAÇÃO 2 E 3 .....                            | 63 |
| SIMULAÇÃO 4 (ALTERAÇÃO DA SIMULAÇÃO 1) .....     | 69 |
| SIMULAÇÃO 5 E 6 (ALTERAÇÃO DA SIMULAÇÃO 1) ..... | 70 |
| RESUMO E CONCLUSÕES .....                        | 73 |
| RECOMENDAÇÕES FUTURAS .....                      | 75 |
| BIBLIOGRAFIA .....                               | 75 |

## 1ª PARTE

Esta primeira parte contemplou estudos térmicos em paredes simples nas quais nenhum tipo de isolamento é utilizado, tal como em nenhum destes casos se revela interesse pela dinâmica do sistema físico sendo que todas as simulações se realizaram em estado estacionário.

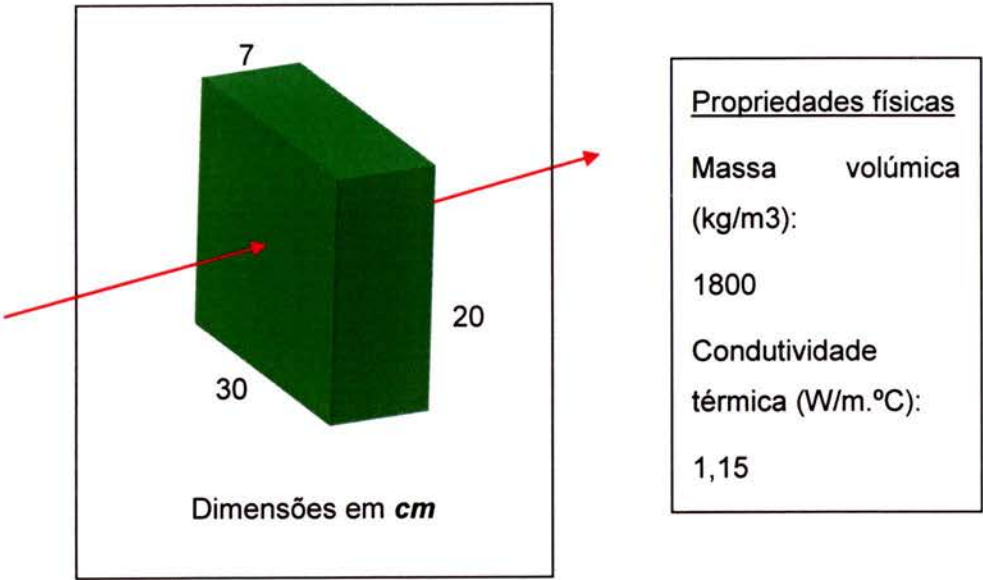
### Tijolo 403

Efectuou-se um estudo de transferência de calor em tijolo (referência do LNEC<sup>1</sup> - 403) enquanto elemento constitutivo de uma parede de alvenaria simples (referência da parede na tabela do LNEC<sup>1</sup> – 18 403 05). Neste caso em particular utilizaram-se duas grelhas com diferentes graus de discretização do espaço no sentido de avaliar qual a influência do refinamento na “exactidão” do resultado (comparando com valores tabelados em [1]). Realizou-se também a análise paramétrica em relação ao gradiente térmico imposto (simulação 4) e ao modelo de escoamento laminar ou turbulento como modelizadores da dinâmica do ar dentro da parede (simulações 1 e 2).

---

<sup>1</sup> “Caracterização Térmica de paredes de Alvenaria”, LNEC, Lisboa (1986), Carlos A. Pina dos Santos e José A. Vasconcelos de Paiva

- Características do tijolo



- Características da grelha original

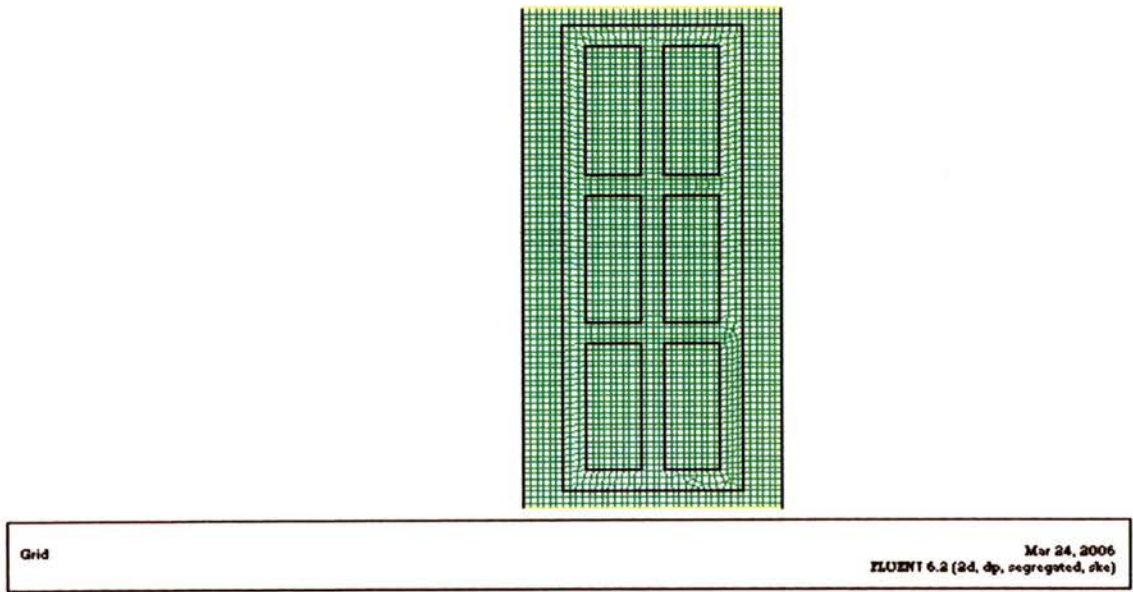


Figura 1. Imagem ilustrativa da grelha original

| Level | Cells | Faces | Nodes | Partitions |
|-------|-------|-------|-------|------------|
| 0     | 3470  | 7654  | 4185  | 1          |

- Características da grelha refinada

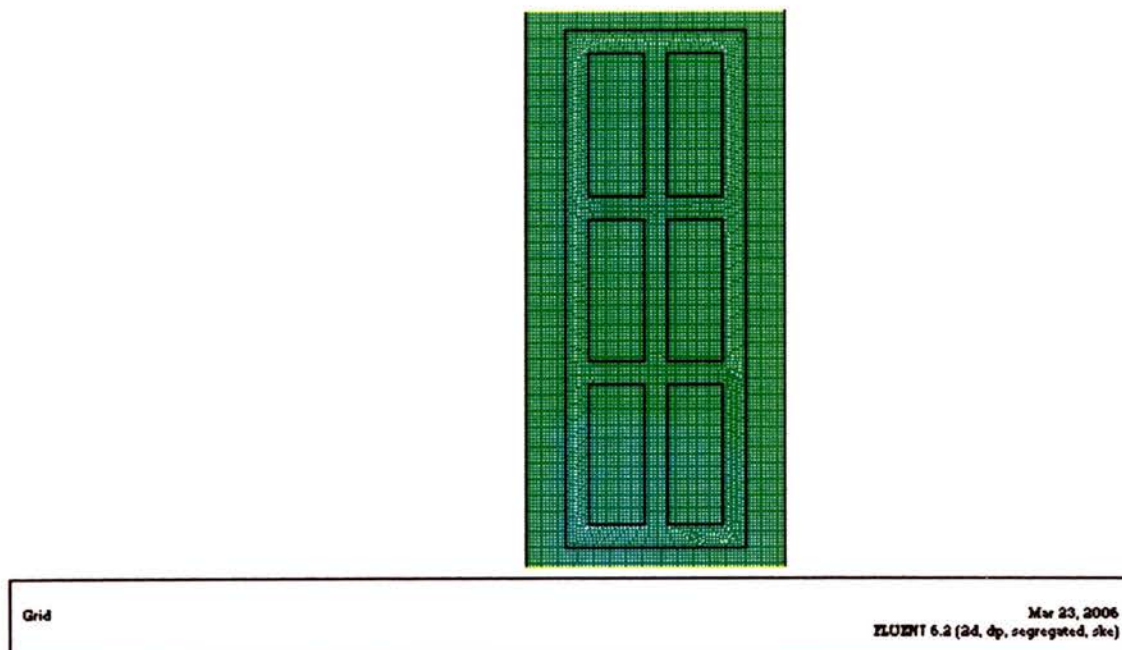


Figura 2. Imagem ilustrativa da grelha refinada

| Level | Cells | Faces | Nodes | Partitions |
|-------|-------|-------|-------|------------|
| 0     | 13880 | 29188 | 15309 | 1          |

- Resultados e dados das simulações

Não obstante o facto de se pretender estudar a influência de determinadas variáveis no caudal térmico observado, o fenómenos físicos são semelhantes em todas simulações pelo que existem condições fronteira e modelos comuns a todas elas:

- 1) no sentido de garantir transferência de calor unidimensional definiram-se fronteiras de simetria nas paredes paralelas ao sentido da transferência de calor;
- 2) apenas uma zona é que não é sólida e que corresponde ao volume definido pelos orifícios onde se definiu o ar como tendo uma densidade variável;

### Simulação 1 – Laminar ou turbulento?

Grelha: ficheiro tijolo\_filipe.msh

Ficheiro case: tijolo403\_lam.cas

Ficheiro data: tijolo403\_lam.dat



Figura 3. Mapa dos contornos da velocidade do ar que circula nos orifícios do tijolo

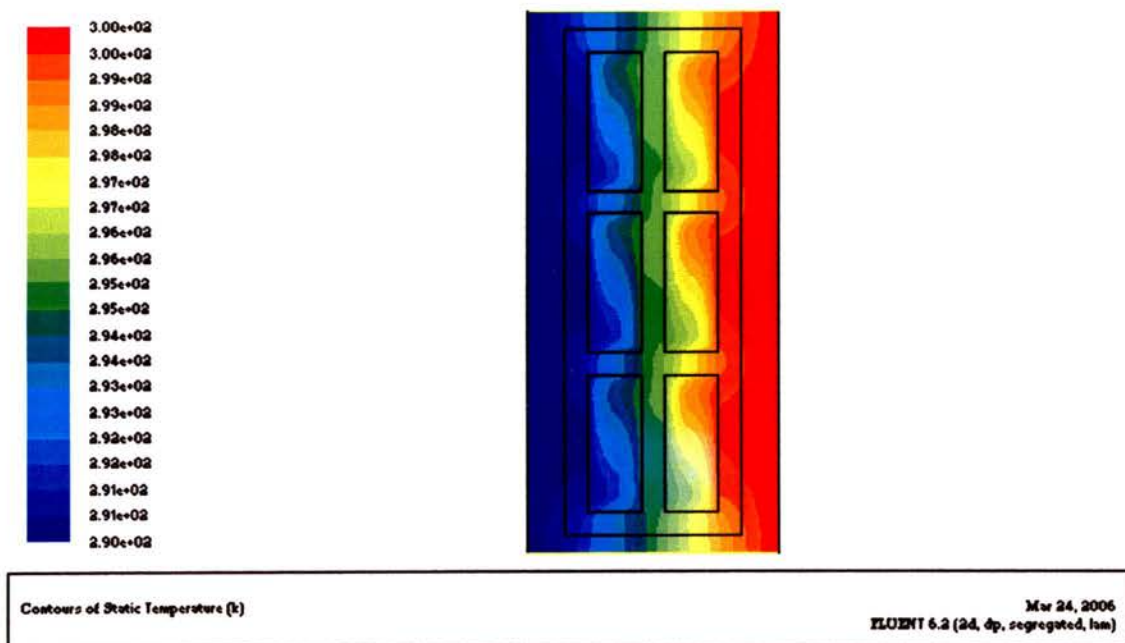


Figura 4. Mapa dos contornos de temperatura ao longo da parede

## Simulação 2 – Laminar ou turbulento?

**Grelha:** ficheiro tijolo\_filipe.msh

**Ficheiro case:** tijolo403\_ske.cas

**Ficheiro data:** tijolo403\_ske.dat

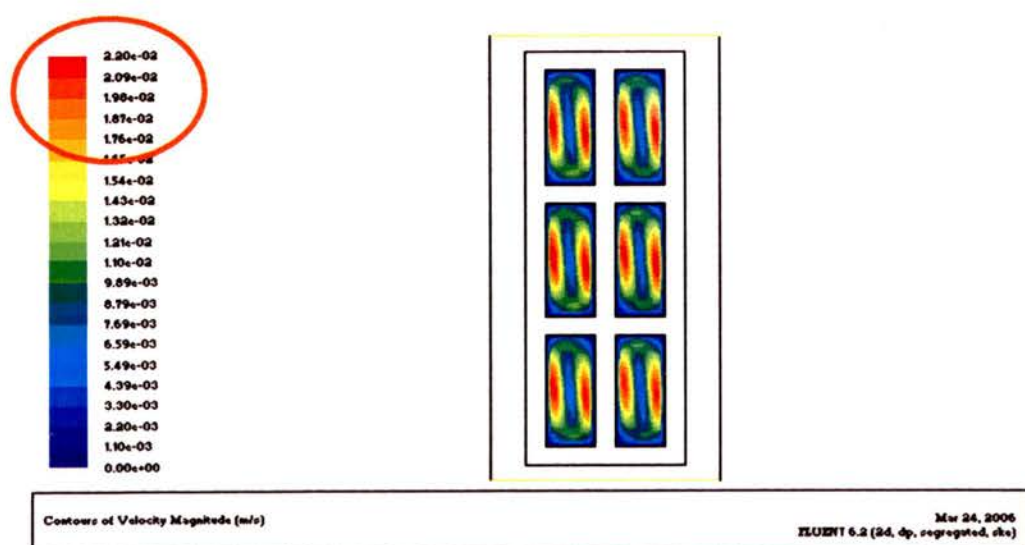


Figura 5. Mapa dos contornos da velocidade do ar que circula nos orifícios do tijolo

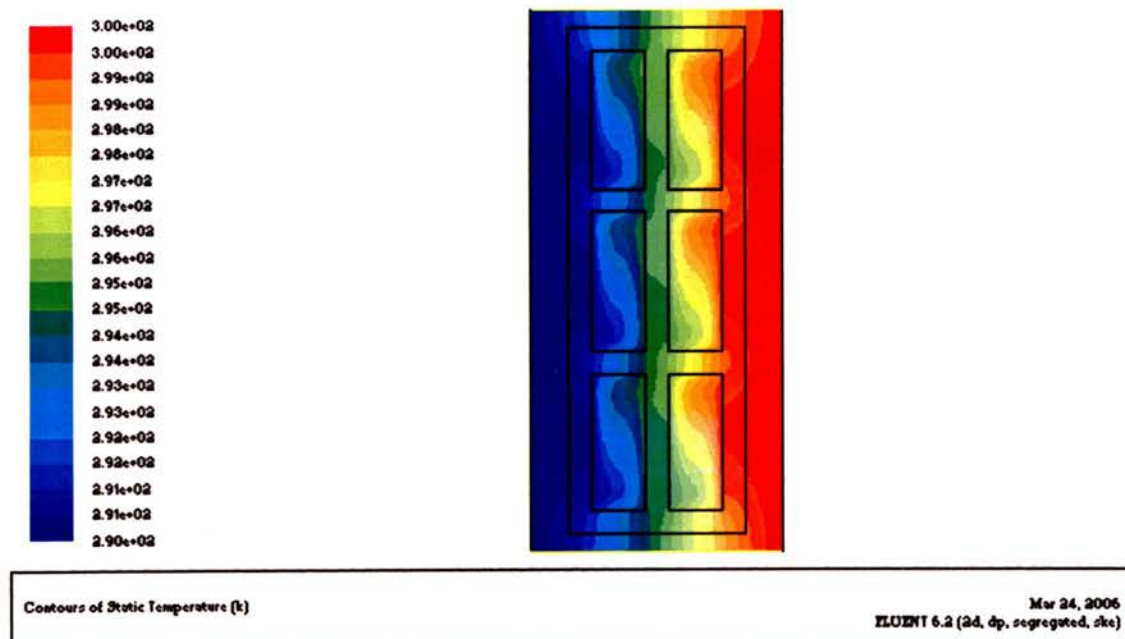


Figura 6. Perfil de temperaturas ao longo da parede

#### Comparação entre a simulação 1 e 2

O coeficiente global de transferência de calor das parede considerando o modelo de escoamento do ar como sendo laminar (simulação 1) é  $4,1945 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ , ao invés, considerando um escoamento turbulento (modelo k-epsilon – simulação 2) o valor aumenta para  $4,2057 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$  e aproxima-se do valor tabelado de  $4,9 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ .

Esta constatação, assenta no facto de na simulação 2 a velocidade máxima do ar nos orifícios ter sofrido um ligeiro aumento de cerca de 2,2% (verificar ênfase dado às escalas das figuras 3 e 5).

A figura 7 permite fundamentar de forma consistente as afirmações supracitadas uma vez que releva o facto de no caso turbulento o gradiente térmico dentro dos orifícios ser mais acentuado (simbolizado por uma maior diferença de cores).

Uma vez verificada esta aproximação em relação ao resultado tabelado pelo LNEC em todas as simulações subsequentes foi utilizado o modelo de turbulência K-epsilon, para prever com maior rigor o comportamento do ar nos orifícios.

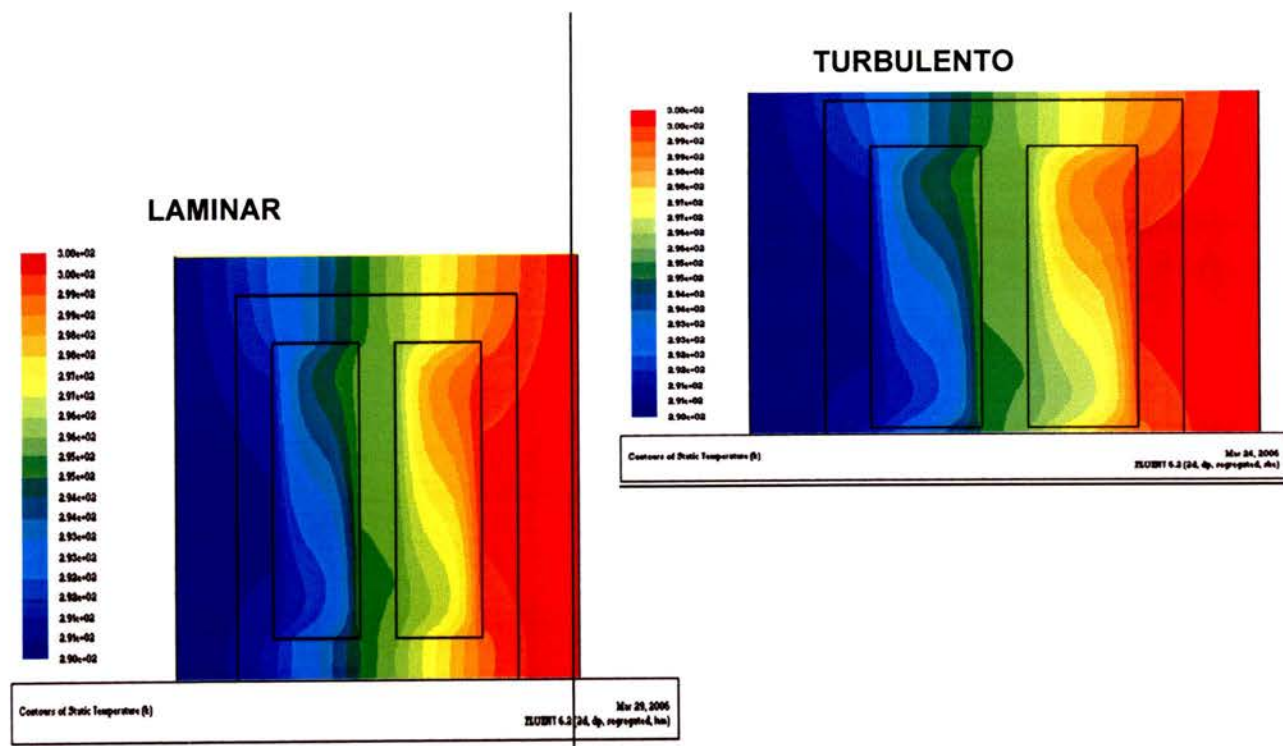


Figura 7. Comparação entre os perfis de temperatura dos regimes de escoamento laminar e turbulento

### Simulação 3 – Grelha refinada ou esparsa?

**Grelha:** ficheiro tijolo\_filipe.msh

A grelha foi refinada (ver figura 2) utilizando o software Fluent recorrendo ao menú Adapt > Region.

Apresentam-se em seguida os dados do refinamento da grelha:

| Grid size ( original / adapted / change) |        |         |        |
|------------------------------------------|--------|---------|--------|
| cells (                                  | 3470 / | 13880 / | 10410) |
| faces (                                  | 7654 / | 29188 / | 21534) |
| nodes (                                  | 4185 / | 15309 / | 11124) |

Ficheiro case: tijolo1\_camp\_plus\_ske.cas

Ficheiro data: tijolo1\_camp\_plus\_ske.dat

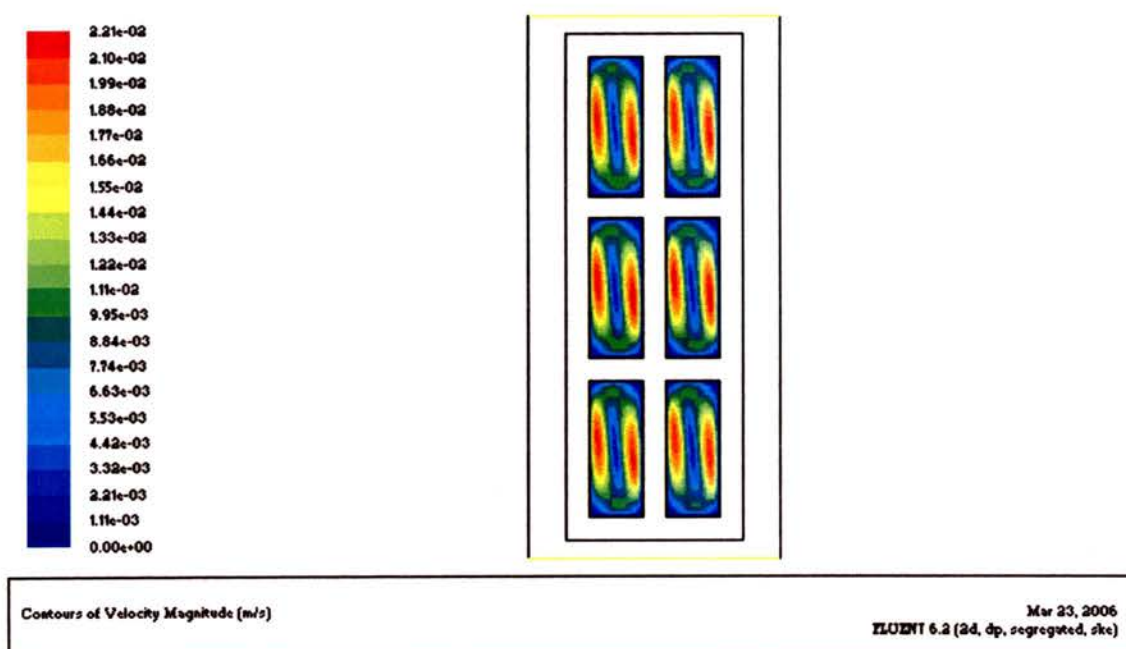


Figura 8. Perfil de velocidades dentro dos orifícios

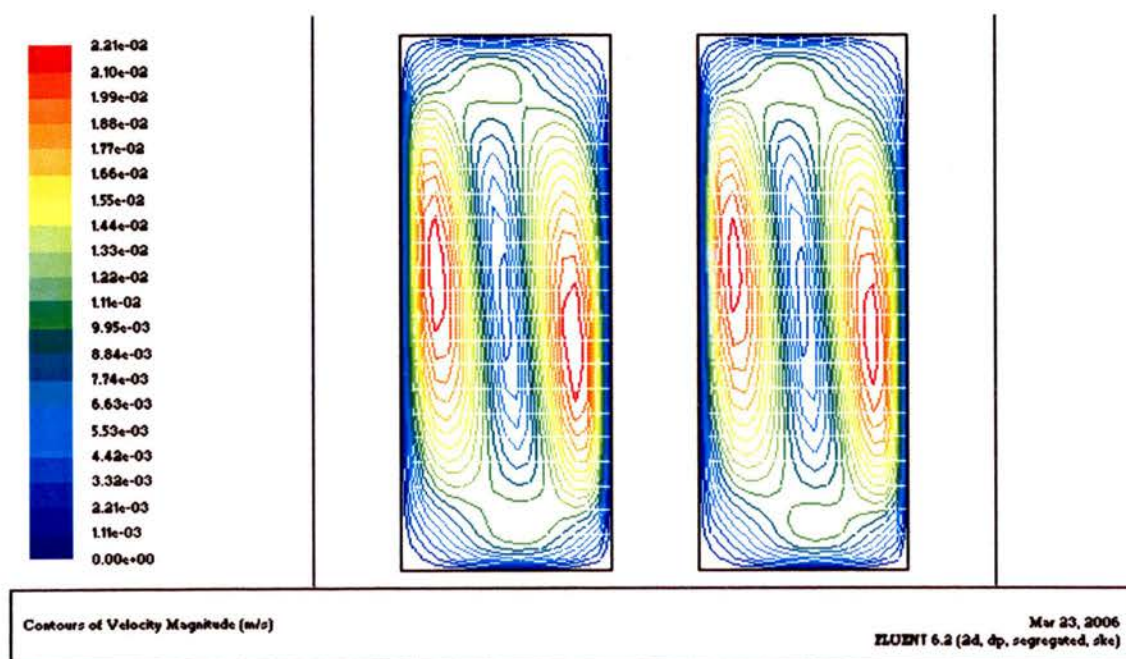


Figura 9. Perfil de velocidades da figura 8 ampliado. Verificação da condição de *no slip* nas paredes

Esta simulação, nomeadamente os contornos apresentados na figura 9, continuam a evidenciar tal como nas simulações 1 e 2 que existe alguma vorticidade no ar circulante induzida pela diferença de densidades que provoca movimentos de ascensão e descida, quando contacta com zonas quentes ou frias, respectivamente.

No parâmetro que esta simulação pretendeu estudar (refinamento da grelha) verificou-se que diminuindo o tamanho de cada célula da grelha para metade do valor inicial o esforço computacional sofre um acréscimo médio de cerca de 150% (passando de 0,50s para 1,25s em cada iteração) e que o valor do coeficiente de transferência de calor da parede obtido foi de 4,2296 W/m<sup>2</sup>.°C.

Este valor representa uma variação de +1% face ao obtido na simulação 2 com a grelha original, fundamentando uma fraca influência deste parâmetro. O binómio refinamento da grelha/exactidão do resultado deve ser devidamente equacionado e padece de optimização uma vez que a aproximação do resultado face ao valor “real” pode não compensar o esforço computacional dispendido.

#### **Simulação 4 – gradiente térmico?**

Esta simulação pretende estudar a influência do gradiente térmico no coeficiente de transferência de calor da parede. Como tal nesta simulação utilizou-se a grelha original (figura 1) e as duas condições fronteira de temperatura foram 290K e 310K.

Grelha: tijolo\_filipe.msh

Ficheiro case: tijolo403\_ske\_difdeltat.cas

Ficheiro data: tijolo403\_ske\_difdeltat.dat

Tabela 1. Sumário dos valores de coeficientes de transferência de calor, velocidades bem como coeficientes convectivos (calculados em Fluent) para diferentes casos.

| <b>Ficheiro *.cas</b>           | <b><math>\sigma T</math><br/>(°C<br/>ou<br/>K)</b> | <b>Caudal<br/>térmico<br/>(J/s)</b> | <b>Kparede<br/>(W/m2.°C)</b> | <b>Velocidade<br/>(m/s)</b> | <b>Coeficiente<br/>convectivo<br/>(W/m2.°C)</b> |
|---------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------|
| tijolo403_ske.cas               | 10                                                 | 2,712730                            | <b>4,205</b>                 | 0,01210866                  | 0,1541247                                       |
| tijolo403_ske_difdeltat.cas     | 20                                                 | 5,6078311                           | <b>4,347</b>                 | 0,01795513                  |                                                 |
| tijolo403_ske_difdeltat_30.cas  | 30                                                 | 8,590832                            | <b>4,439</b>                 | 0,02223564                  | 0,3230837                                       |
| tijolo403_ske_difdeltat_50.cas  | 50                                                 | 14,705300                           | <b>4,559</b>                 | 0,02853744                  | 0,646031                                        |
| tijolo403_ske_difdeltat_80.cas  | 80                                                 | 24,06649                            | <b>4,664</b>                 | 0,03499248                  | 0,8160841                                       |
| tijolo403_ske_difdeltat_100.cas | 100                                                | 30,37315                            | <b>4,709</b>                 | 0,03821293                  | 0,8897161                                       |
| tijolo403_ske_difdeltat_140.cas | 140                                                | 43,05811                            | <b>4,7683</b>                | 0,04328484                  | 0,9882333                                       |
| tijolo403_ske_difdeltat_180.cas | 180                                                | 55,77266                            | <b>4,8038</b>                | 0,04731296                  | 1                                               |

### Variação do $K_p$ do tijolo 403 com o gradiente térmico

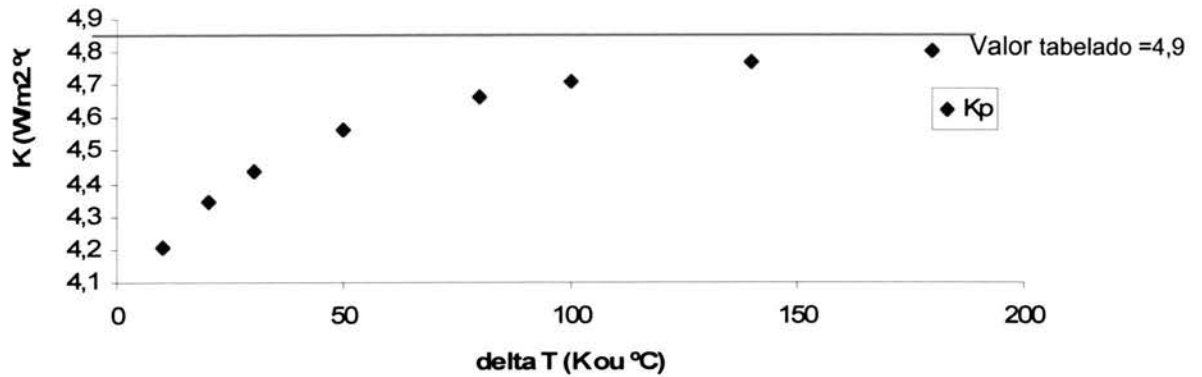


Figura 11. Gráfico ilustrativo da variação do coeficiente de transferência ( $K_p$ ) da parede de alvenaria simples que contempla como unidade estrutural o tijolo 403

### Surface Heat Transfer coefficient

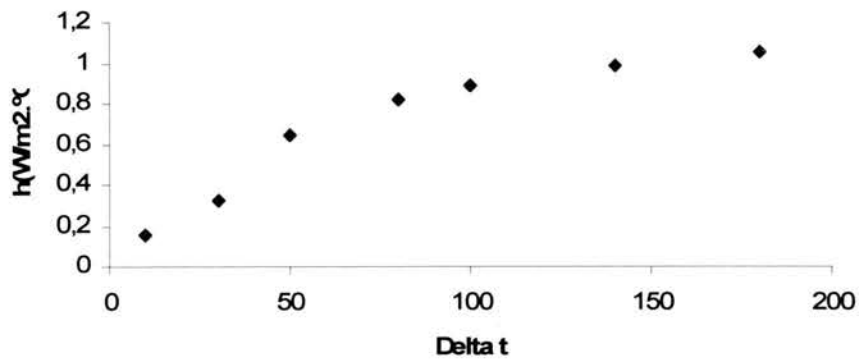


Figura 12. Variação do coeficiente de transferência de calor superficial (avaliado no Fluent para as zonas da grelha correspondentes aos orifícios de ar, através do menu "Reports")

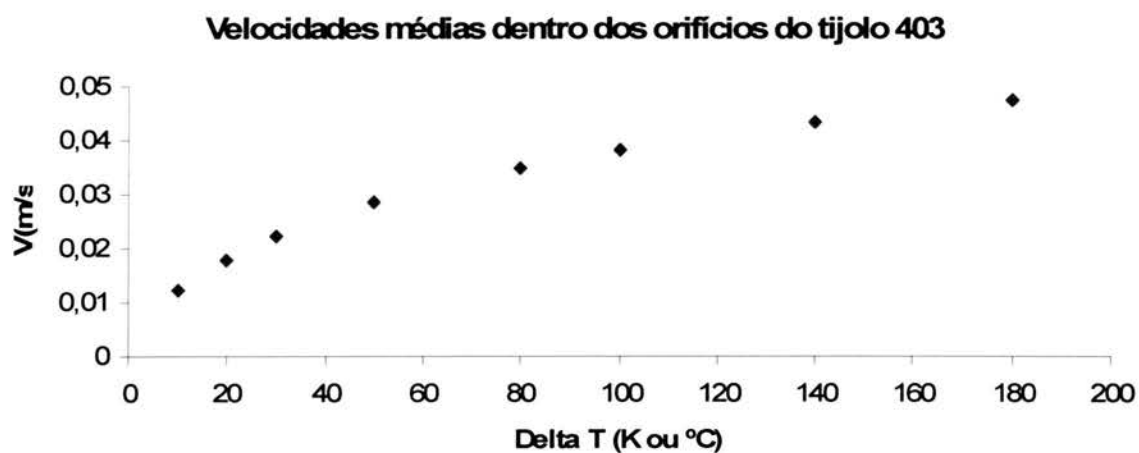


Figura 13. Velocidades médias dentro dos orifícios avaliadas em Fluent (utilizando o menu "Reports>Volume Integrals")

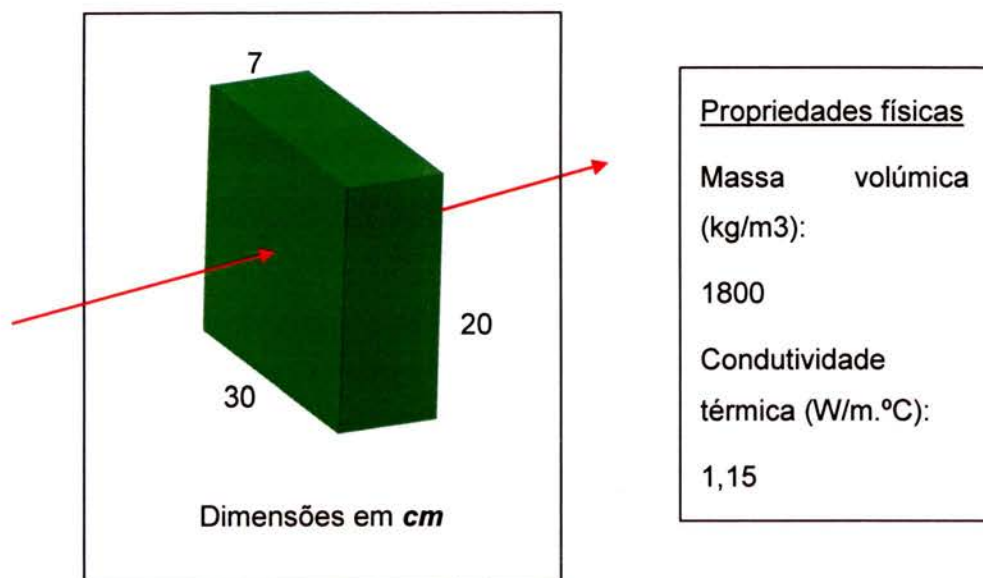
Conclui-se portanto que esta aproximação assintótica em relação ao valor publicado pelo LNEC se verifica devido à variação do coeficiente convectivo do ar.

## Tijolo 401

Efectuou-se um estudo de transferência de calor em tijolo (referência do LNEC<sup>1</sup> - 401) enquanto elemento constitutivo de uma parede de alvenaria simples (referência da parede na tabela do LNEC<sup>1</sup> - 18 401 05). Como se pode verificar pela figura seguinte a área de transferência de calor é exactamente igual à do tijolo 403, neste caso apenas vai diferir a percentagem de furação. Com esta alteração pretendeu-se analisar qual a influência da geometria do próprio tijolo no valor do coeficiente de transferência de calor bem como a concordância ou não em relação ao valor publicado pelo LNEC<sup>1</sup> (simulação 1). Porém a estas simulações bidimensionais acarretam alguma imprecisão nos resultados obtidos e que se deve ao facto de se ter que definir a profundidade de referência sobre a qual se calcula a área de

transferência de calor real. Esta extrapolação seria efectivamente real se as características da parede fossem constantes ao longo desse eixo, porém existem juntas verticais (que correspondem a uma espessura de argamassa homogénea) cuja resistência térmica é desta forma desprezada.

Com o propósito de avaliar qual a influência desta aproximação no coeficiente de transferência de calor da parede realizou-se uma simulação com uma grelha tridimensional deste tijolo (simulação 2).



- **Características da grelha**

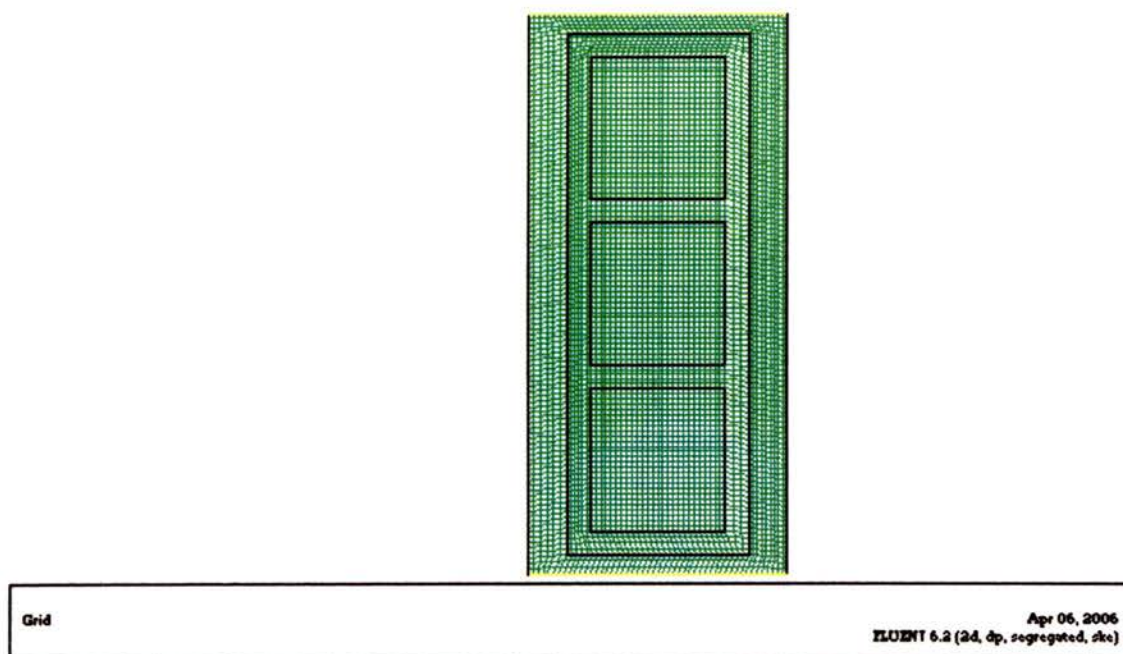


Figura 14. Grelha representativa do tijolo 401.

| Level | Cells | Faces | Nodes | Partitions |
|-------|-------|-------|-------|------------|
| 0     | 5400  | 11546 | 6147  | 1          |

## • Resultados e dados das simulações

Apesar de nas simulações supracitadas e relativas ao tijolo 403 se ter verificado uma influência directa da amplitude da força directriz nos resultados obtidos nestes dois casos pretendeu-se estudar a preponderância de outros parâmetros pelo que a referida amplitude manteve-se constante em todas as simulações subsequentes e igual a 10°C (ou K).

### Simulação 1 – Geometria?

Grelha: ficheiro tijolo401.msh

Ficheiro case: tijolo401\_ske.cas

Ficheiro data: tijolo401\_ske.dat

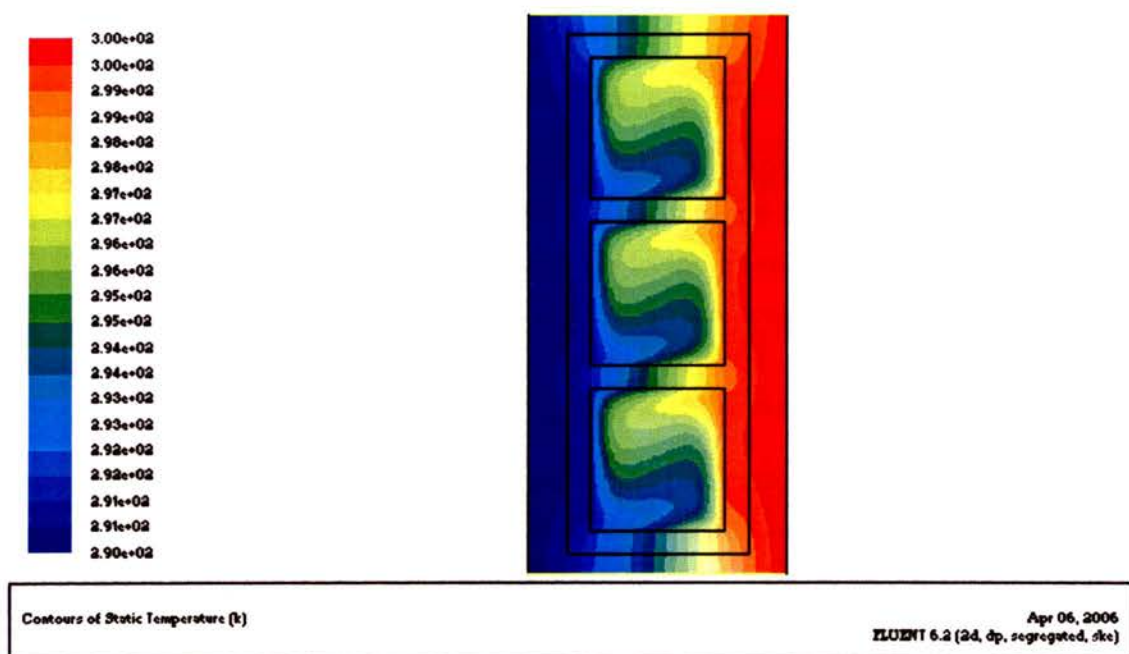


Figura 15. Variação da temperatura ao longo da parede.

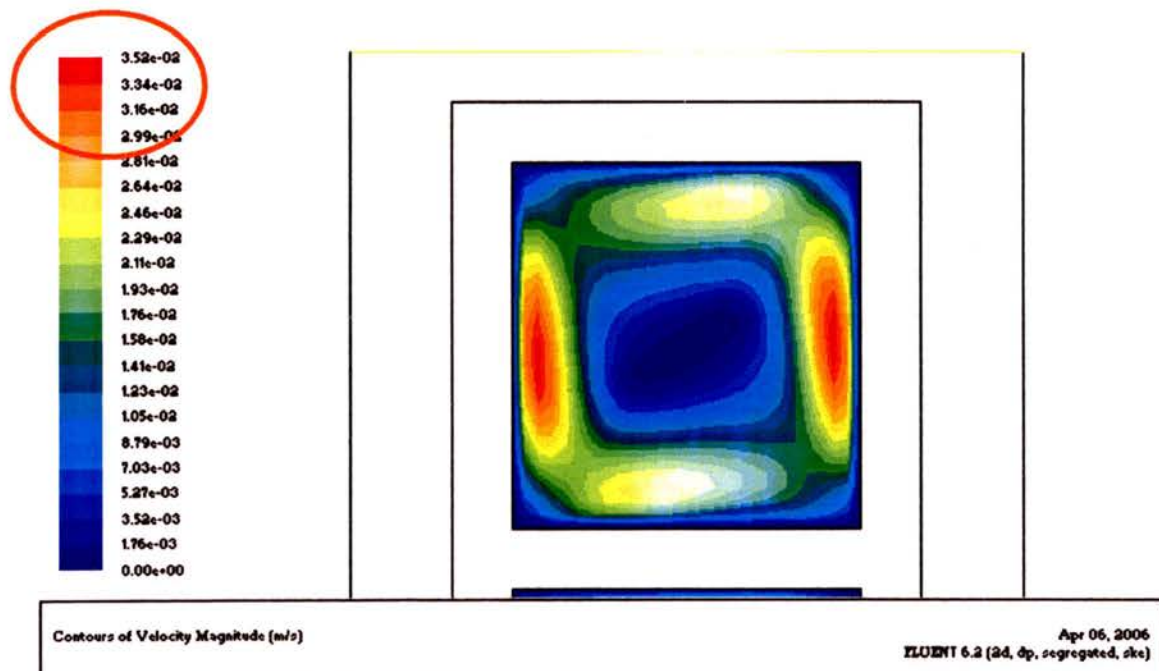


Figura 16.

Esta parede apresenta uma percentagem de furação de 60,2%, o que representa um acréscimo de 10,4% em relação à simulação que serviu de contraponto a esta (simulação 2 – tijolo 403). Na prática crê-se, por pura interpretação semântica do termo que aparece mencionado nas tabelas do LNEC<sup>1</sup> (“percentagem de furação”), que estes valores signifiquem que uma maior massa de ar em circulação exista nesta simulação.

A parede em causa apresenta um caudal térmico em estado estacionário de 3,17 J/s (Watts), o que para uma diferença de temperaturas de 10K e para uma área de transferência de calor de 0,0645 m<sup>2</sup>, representa um coeficiente de transferência de calor (Kp) de 4,90 W/m<sup>2</sup>.°C. O valor tabelado<sup>1</sup> é 6,12 W/m<sup>2</sup>.°C pelo que o resultado obtido em simulação apresenta uma variação relativa de -24,8%.

Esta subavaliação do Kp face ao valor publicado parece estar fortemente correlacionada com o coeficiente convectivo do ar e consequentemente com as suas velocidades de circulação. De notar, no mapa de contornos da figura 16 que a velocidade máxima registada tem o valor de 3,52x10<sup>-2</sup> m/s (variação de cerca de 38% face ao valor máximo registado na figura 5).

Detalhando esta análise:

- Sabe-se por correlações empíricas deduzidas através de análise adimensional que o coeficiente convectivo h do ar representado sobre a forma adimensional do número de Nusselt é directamente proporcional à potência 0,8 do Reynolds e a um valor empírico que ronda os 0,01 (em termos de ordem de grandeza) pelo que realizando um cálculo de algibeira se chega à conclusão que isto significa um aumento do h na ordem dos 2%.
- Este aumento parece mais consonante com a diferença de resultados registada entre a simulação 2 do tijolo 403 e a simulação 1 do tijolo 401 (aproximadamente 14%).

#### Conclusão relativa à influência da geometria

O afastamento em relação ao valor publicado aumentou.

## Simulação 2 – 3D?

Grelha: ficheiro tijolo401\_3d.msh

Ficheiro case: tijolo401\_3d3.cas

Ficheiro data: tijolo401\_3d3.dat

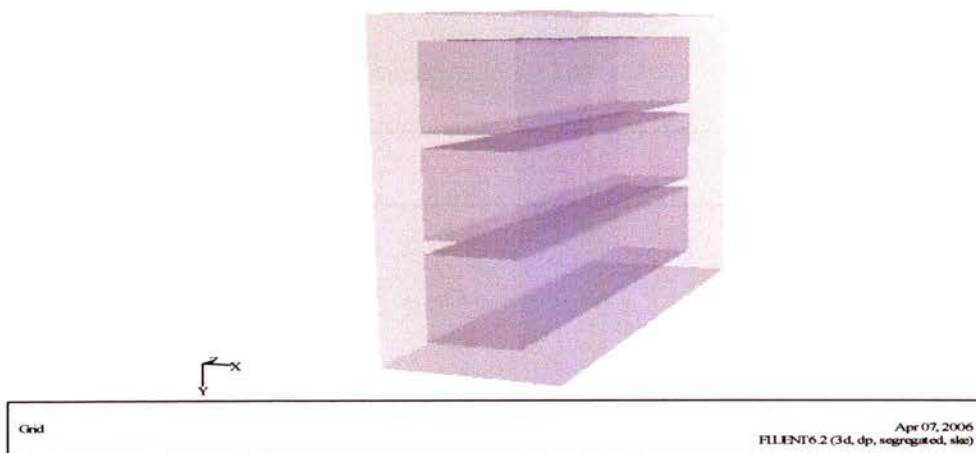


Figura 17.

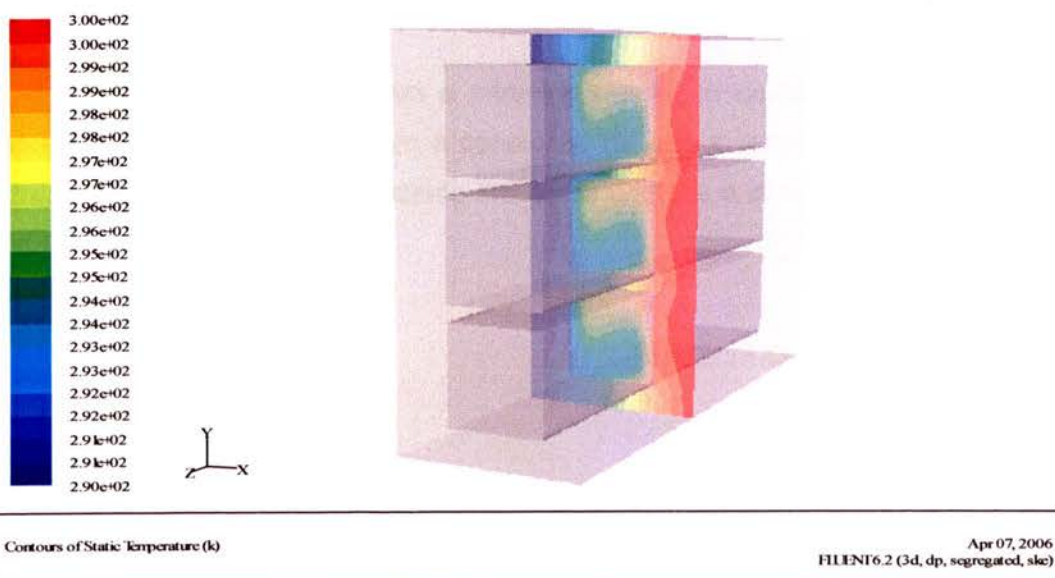


Figura 18.

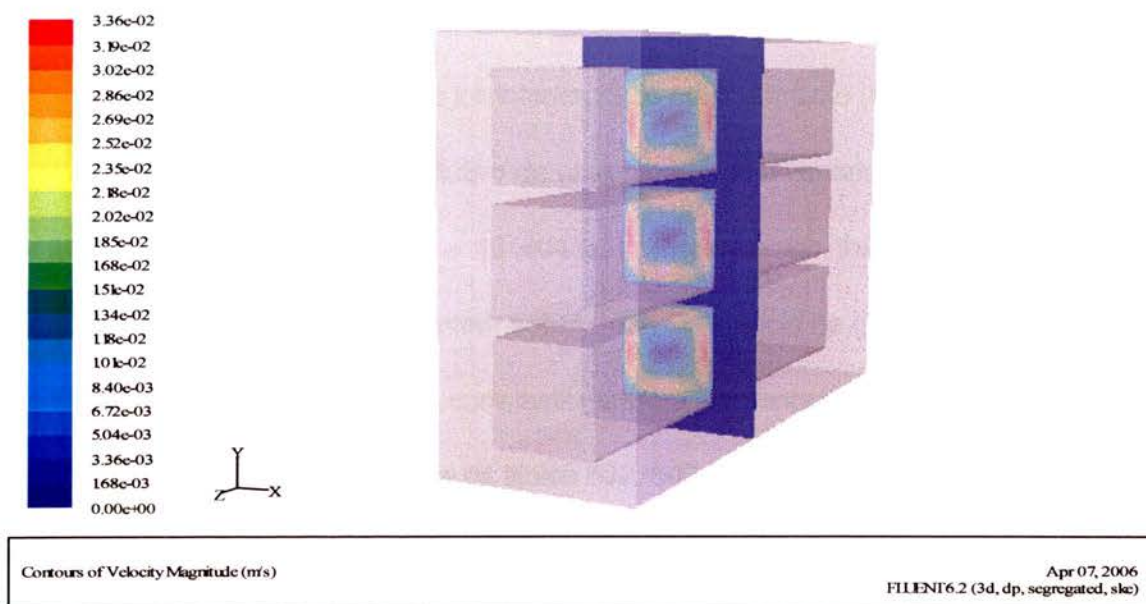


Figura 19.

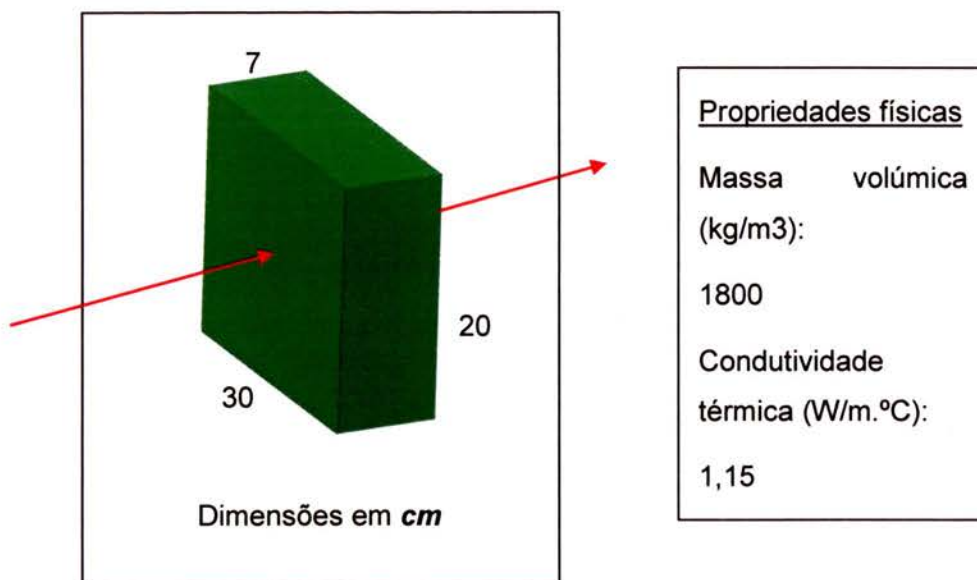
A parede tridimensional simulada apresenta um caudal térmico de 3,62 W/m<sup>2</sup>.°C, o que para um gradiente térmico de 10K e para uma área de transferência de calor de 0,067 m<sup>2</sup>, representa um coeficiente de transferência global (Kp) igual a 5,35 W/m<sup>2</sup>.°C.

Este valor simboliza um desvio percentual relativo ao valor publicado de - 14,5%.

Fazendo a analogia com a primeira simulação desta mesma parede, estas evidências numéricas conduzem à conclusão de que a representação tridimensional apresenta-se mais exacta reduzindo em cerca de 10% o erro em relação ao valor do LNEC<sup>1</sup>.

## Tijolo 404

Efectuou-se um estudo de transferência de calor em tijolo (referência do LNEC<sup>1</sup> - 404) enquanto elemento constitutivo de uma parede de alvenaria simples (referência da parede na tabela do LNEC<sup>1</sup> – 18 404 05). Esta parede foi alvo de uma única simulação para que se pudesse inferir sobre qual a influência da geometria, bem como na tentativa de estabelecer uma correlação entre a percentagem de furação (que foi complementada mais à frente com os tijolos 602, 603 e 604) e o erro associado a cada resultado.



- Características da grelha

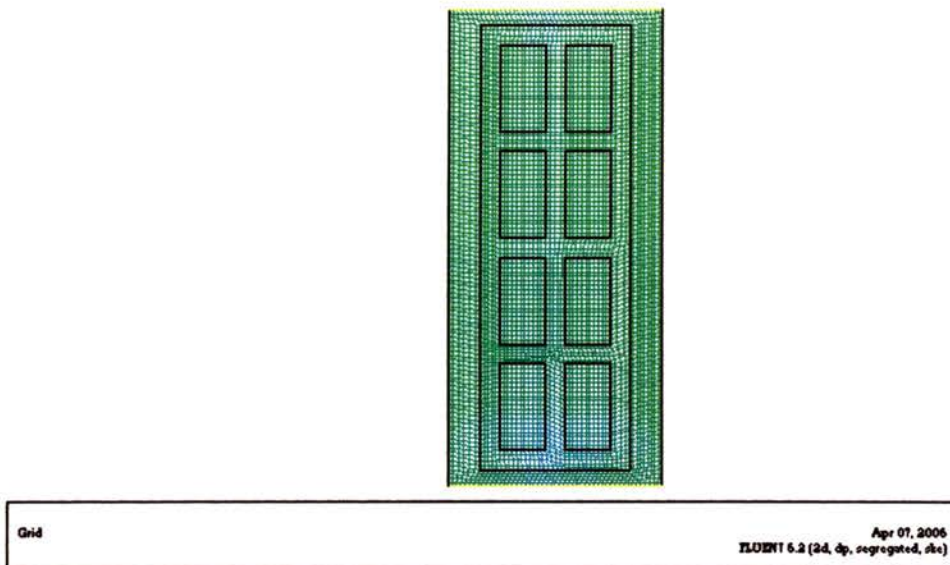


Figura 20.

| Level | Cells | Faces | Nodes | Partitions |
|-------|-------|-------|-------|------------|
| 0     | 5400  | 11708 | 6309  | 1          |

- **Resultados e dados das simulações**

**Simulação 1 – Geometria?**

Grelha: ficheiro tijolo404.msh

Ficheiro case: tijolo404\_ske.cas

Ficheiro data: tijolo404\_ske.dat

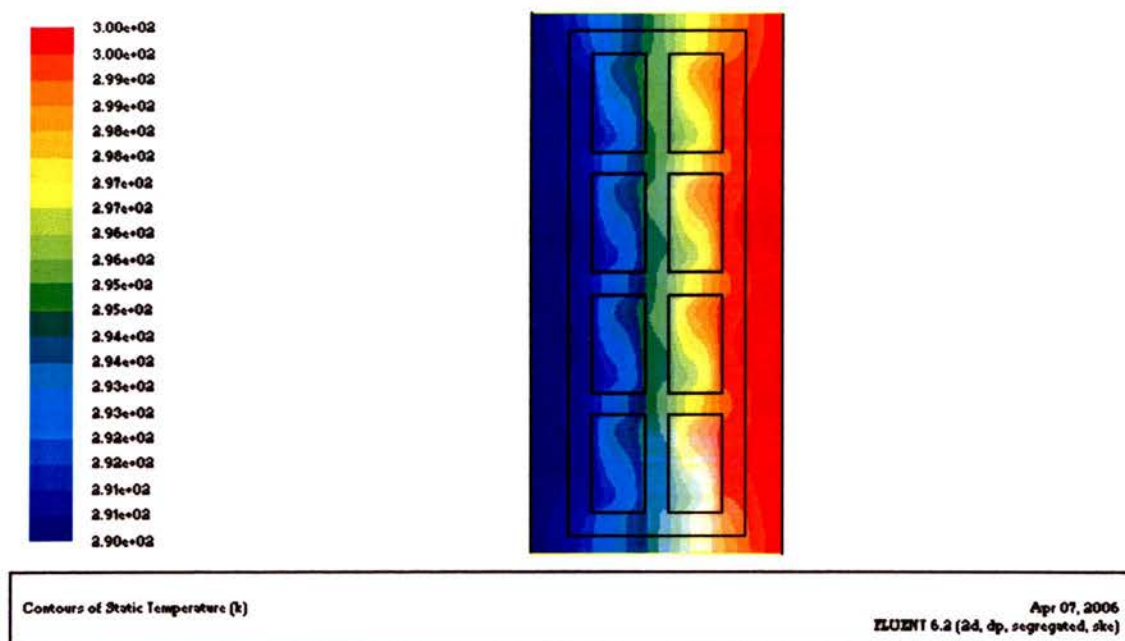


Figura 21.

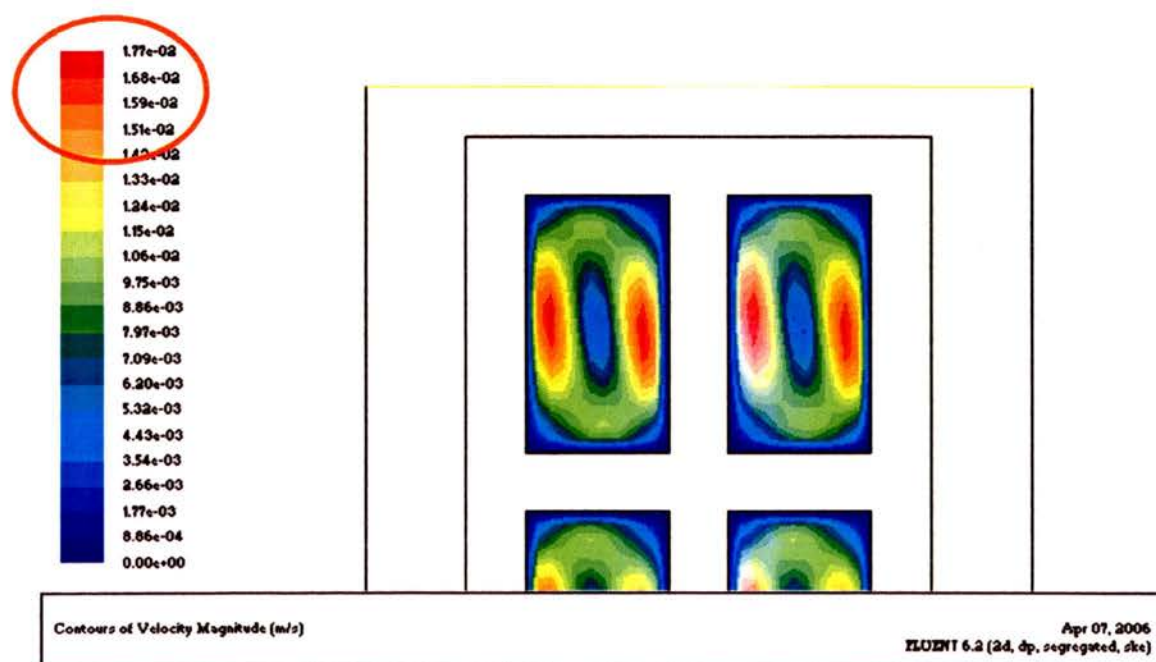


Figura 22.

A parede em questão apresenta uma percentagem de furação de 46,9% (2,9 inferior ao tijolo 403). A ISO 6946 – “Building Components and Building

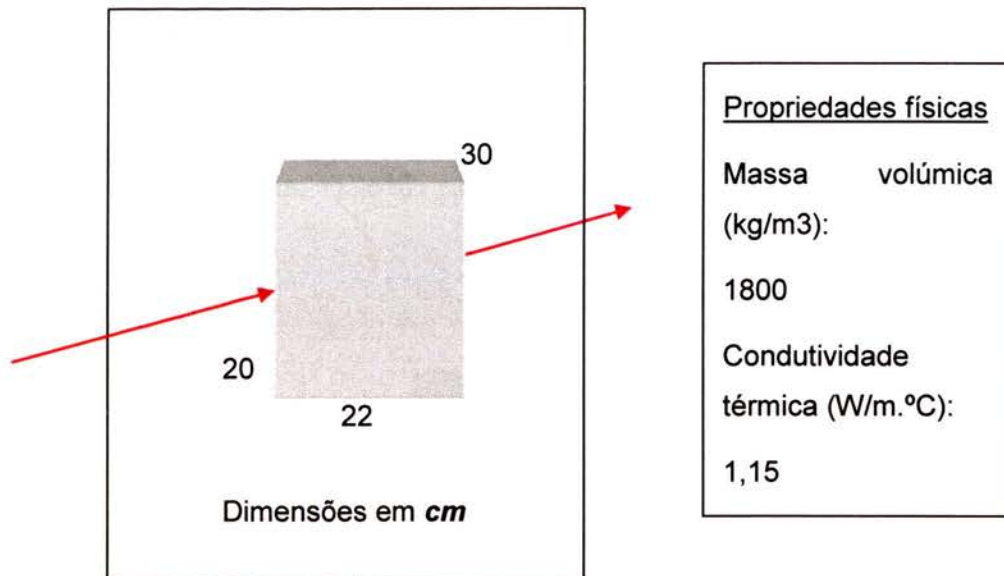
Elements – Calculation Method” utiliza um rácio para a avaliação do nível de ventilação de “buracos” em tijolos que se baseia no quociente entre a área de transferência de calor (S) e a espessura dos mesmos (L). Esse rácio como se pode verificar pela análise das respectivas grelhas (figuras 14 e 20) diminuiu do tijolo 401 para o 404, uma vez que a área de transferência de cada buraco é agora inferior. A menor ventilação destes buracos sugere velocidades menores, o que de facto se verifica (ver enfâse na figura 22). A velocidade máxima é cerca de metade da obtida no mesmo problema físico mas para o tijolo 401.

Esta parede apresenta um caudal térmico de 3,14 W o que para uma área de transferência de calor igual a 0,0645 m<sup>2</sup> e um  $\sigma T=10^{\circ}\text{C}$ , corresponde a um coeficiente global de transferência de 4,87 W/m<sup>2</sup>.°C.

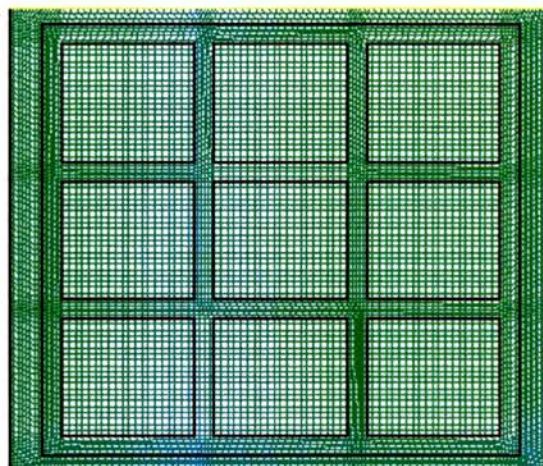
Este resultado materializa um desvio relativo de -8,11% ao valor do LNEC<sup>1</sup>.

## Tijolo 101

Efectuou-se um estudo de transferência de calor em tijolo (referência do LNEC<sup>1</sup> - 101) enquanto elemento constitutivo de uma parede de alvenaria simples (referência da parede na tabela do LNEC<sup>1</sup> – 18 101 05). Esta simulação visou essencialmente a influência do parâmetro geométrico.



- Características da grelha



|      |                                                      |
|------|------------------------------------------------------|
| Grid | Apr 07, 2006<br>FLUENT 5.2 (2d, dp, segregated, ske) |
|------|------------------------------------------------------|

Figura 23.

- Resultados e dados das simulações

### Simulação 1 – Geometria?

Grelha: ficheiro tijolo101.msh

Ficheiro case: tijolo101\_ske.cas

Ficheiro data: tijolo101\_ske.dat

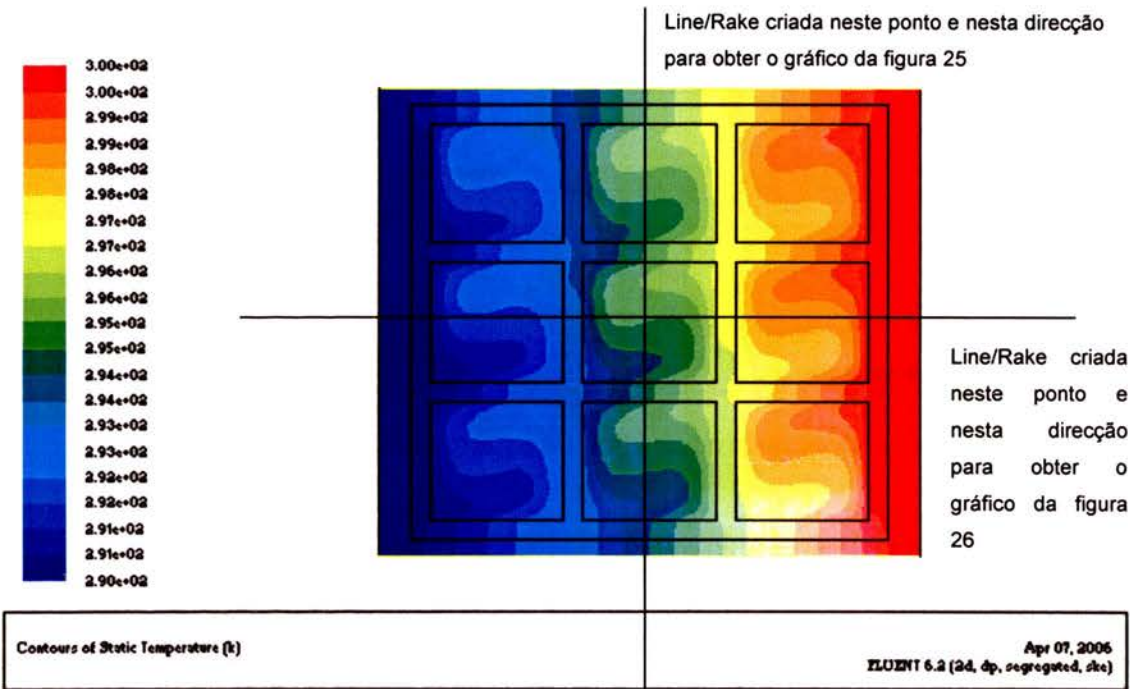


Figura 24.

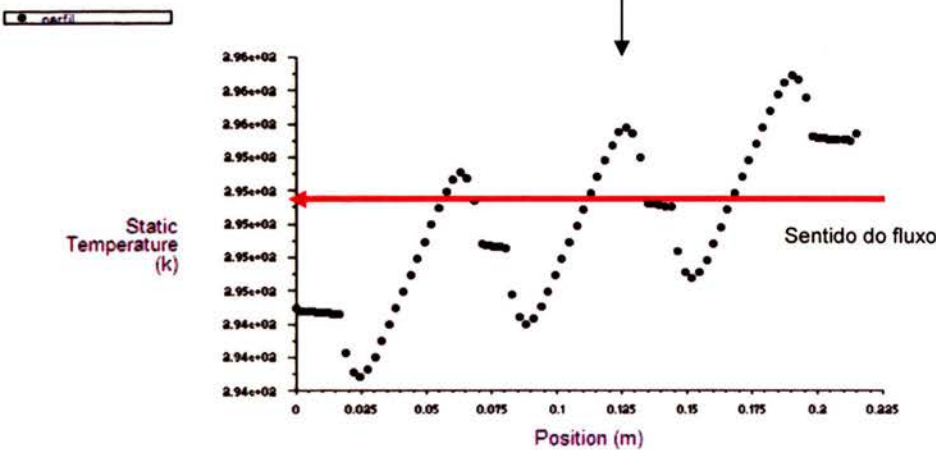


Figura 25. Representação gráfica do perfil de temperaturas na direcção dos yy (vertical)

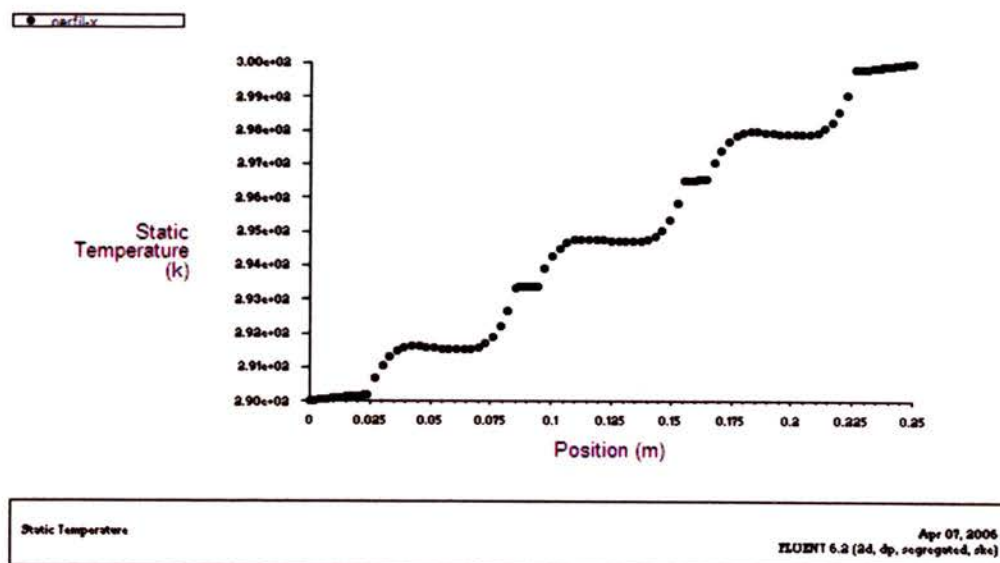


Figura 26. Representação gráfica do perfil de temperaturas ao longo do eixo dos xx (horizontal).

Como se pode verificar pela análise do gráfico da figura 26 as maiores variações de temperatura coincidem precisamente com o ar, onde está concentrada a praticamente toda a resistência térmica, uma vez que a sua condutividade é baixa (aproximadamente 0,02 W/m.K). Esta constatação de certa forma valida os valores obtidos.

Este tijolo apresenta uma percentagem de furação de 67,8% e um caudal térmico de 1,051 W, o que para uma área de transferência de 0,0645 m<sup>2</sup> e para uma diferença de temperaturas de 10K, representa um K<sub>p</sub> de 1,63 W/m<sup>2</sup>.°C. Esse valor apresenta um desvio relativo de -51,6% face ao do LNEC1.

Para esta subavaliação também contribui um facto que se pretendeu enfatizar no gráfico da figura 25 e que regista uma diferença de 1K em cada buraco e medida na vertical o que, não obstante ser mais verosímil que as aproximações realizadas pelo LNEC, torna a transferência de calor bidimensional.

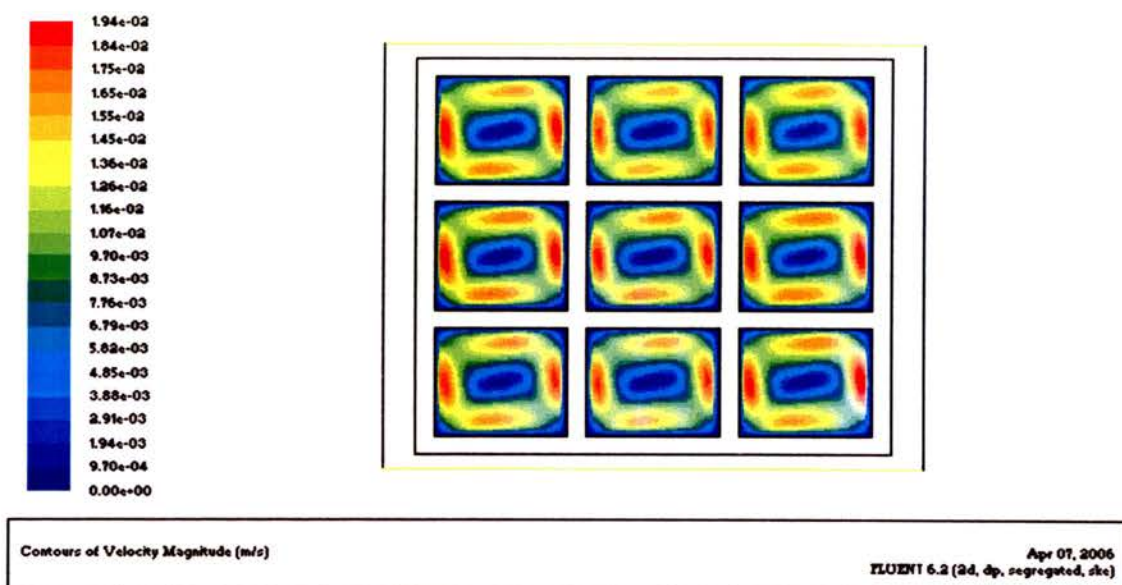


Figura 27.

### Conclusões

As velocidades continuam na mesma ordem de grandeza das simulações anteriores e já referidas, porém esta parede regista o maior desvio até então registado -51,6%.

## Tijolos 603, 604 e 605

Efectuou-se um estudo de transferência de calor em três tijolos (referência do LNEC<sup>1</sup> - 602, 603, 604) enquanto elemento constitutivo de uma parede de alvenaria simples (referência da parede na tabela do LNEC<sup>1</sup> – 18 602 05, 18 603 05 e 18 604 05). As simulações foram realizadas em grelhas tridimensionais e o único intuito foi o de obter uma correlação entre a massa de ar presente na parede e os aparentes desvios percentuais aos valores publicados e que se têm verificado até então.

### • Resultados e dados das simulações

## Simulação 1 – Tijolo 604

Grelha: ficheiro tijolo604.msh

Ficheiro case: tijolo604\_corrigido.cas

Ficheiro data: tijolo604\_corrigido.dat

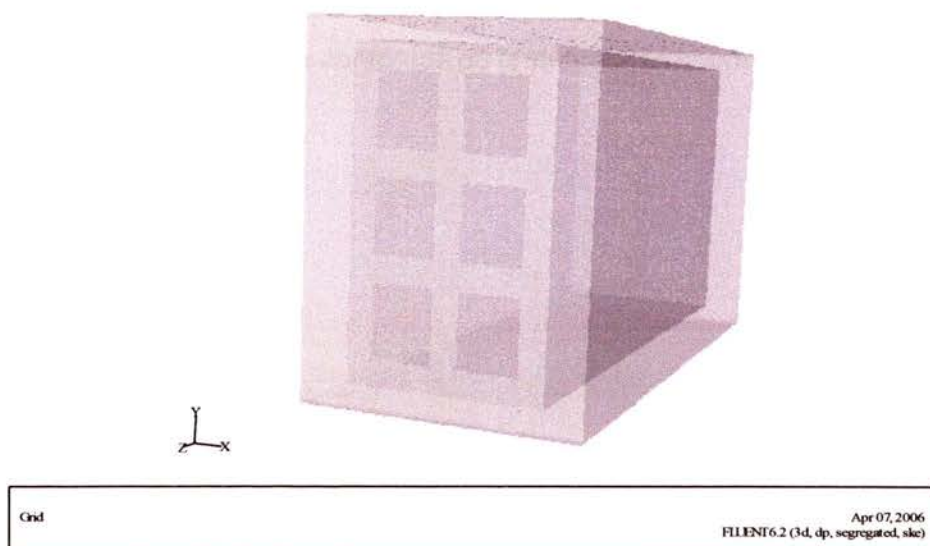
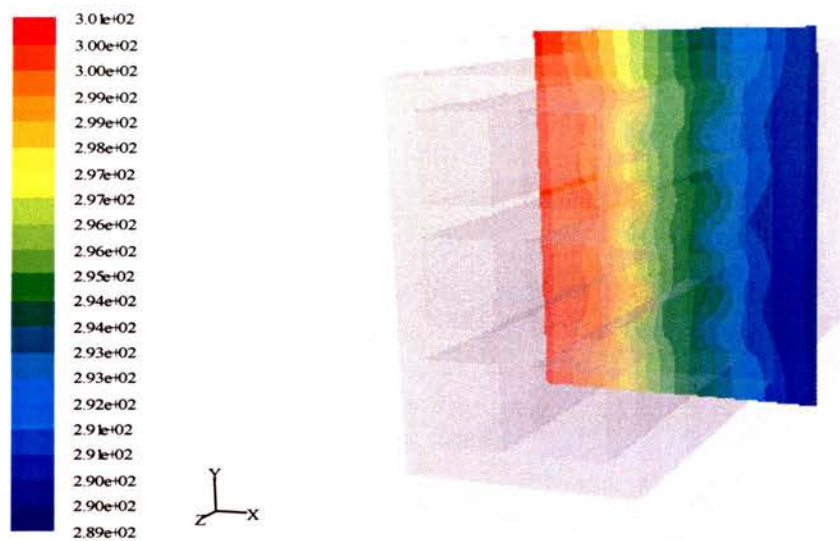


Figura 28. Representação esquemática da grelha da parede do tijolo 604



Contours of Static Temperature (k)

Apr 07, 2006  
FLUENT 6.2 (3d, dp, segregated, sle)



Figura 29. Mapa de contornos de temperaturas sobre uma *iso-surface*

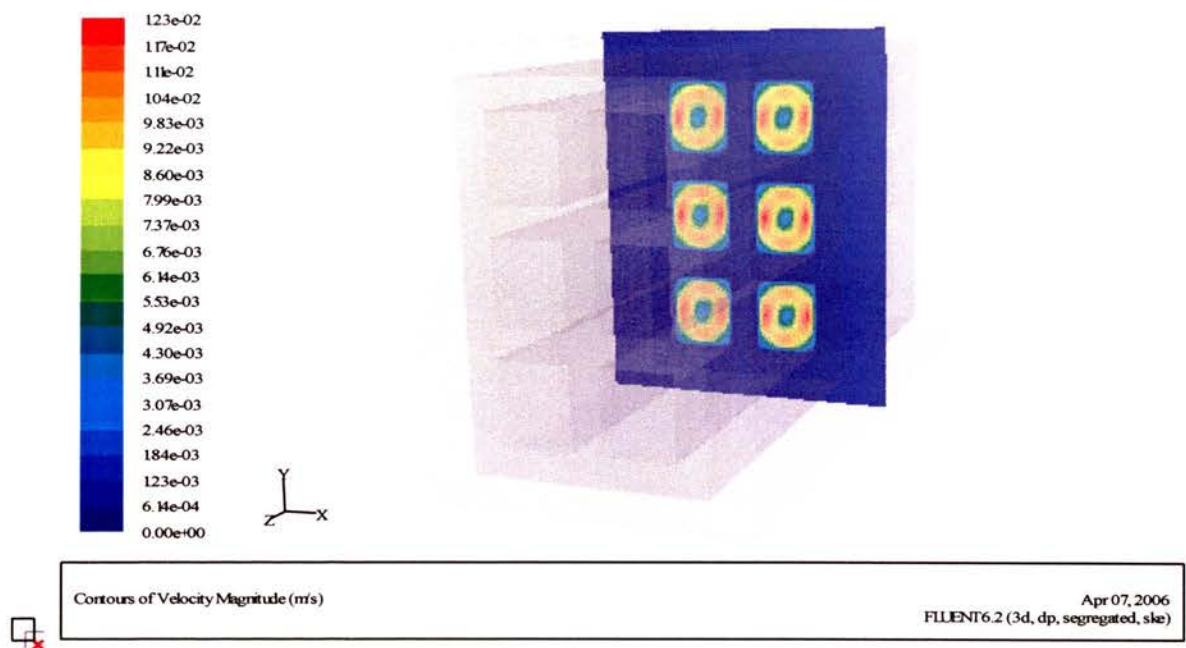


Figura 30. Mapa de contornos de velocidade dentro dos orifícios

### **Simulação 2– Tijolo 603**

Grelha: ficheiro tijolo603.msh

Ficheiro case: tijolo603.cas

Ficheiro data: tijolo603.dat

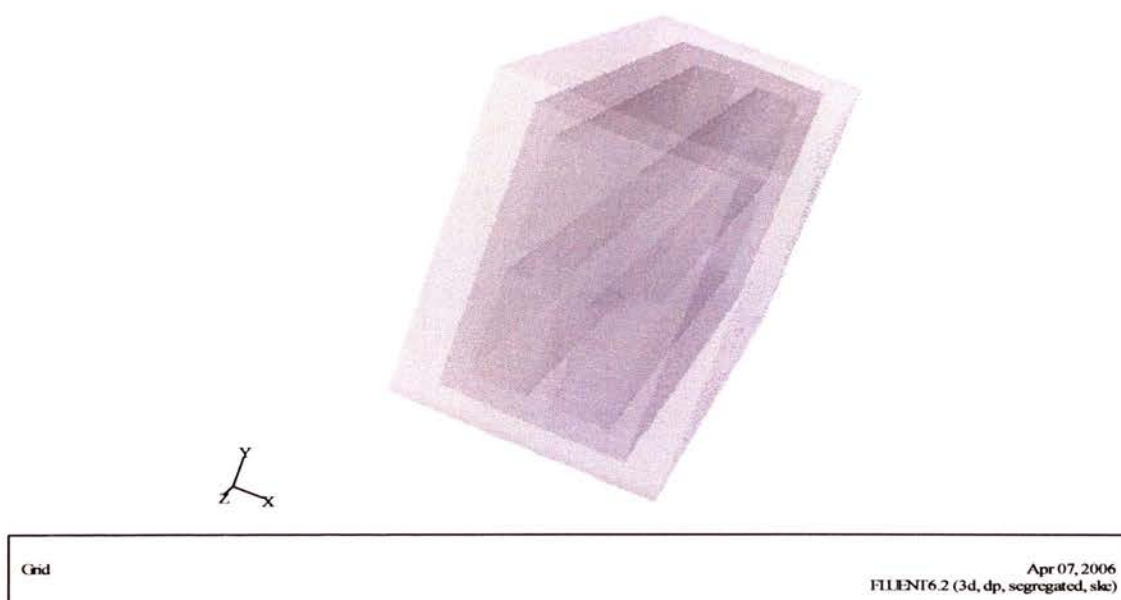


Figura 31. Representação esquemática da grelha da parede do tijolo 603

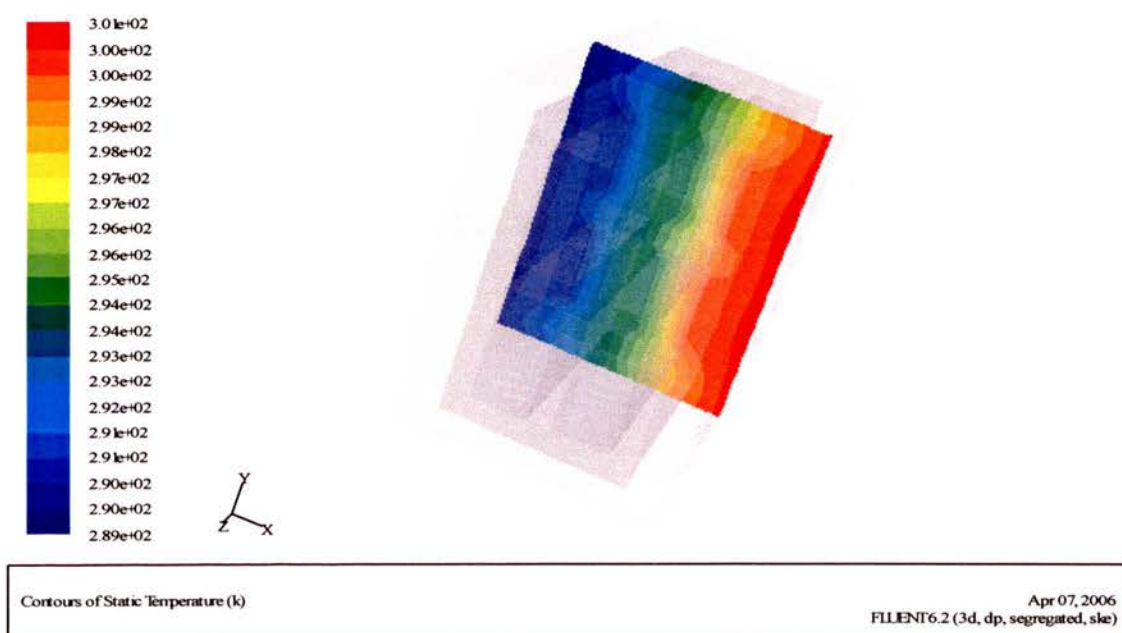


Figura 32. Mapa de contornos de temperaturas sobre uma *iso-surface*

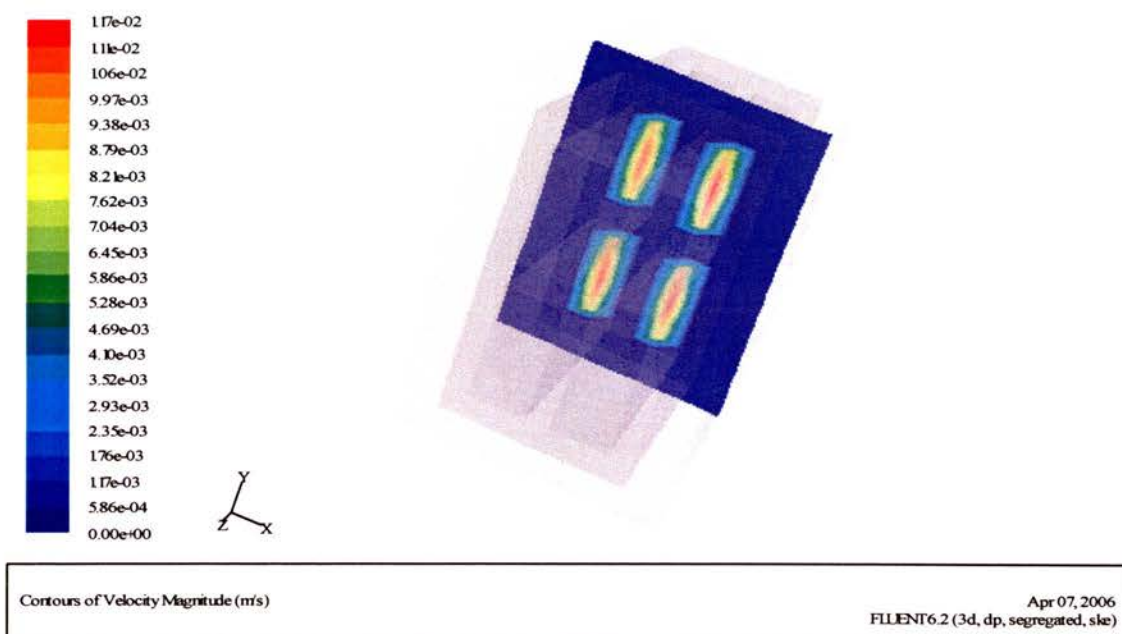


Figura 33. Mapa de contornos de velocidade dentro dos orifícios

### **Simulação 3 – Tijolo 602**

Grelha: ficheiro tijolo602\_3d.msh

Ficheiro case: tijolo602\_3d.cas

Ficheiro data: tijolo602\_3d.dat

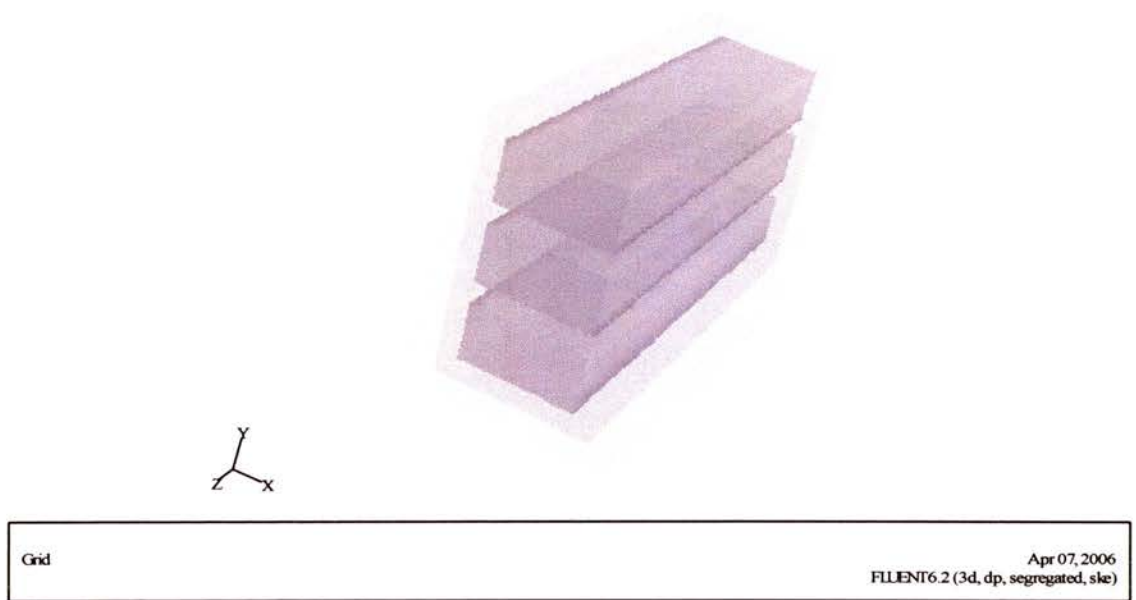


Figura 34. Representação esquemática da grelha da parede do tijolo

602

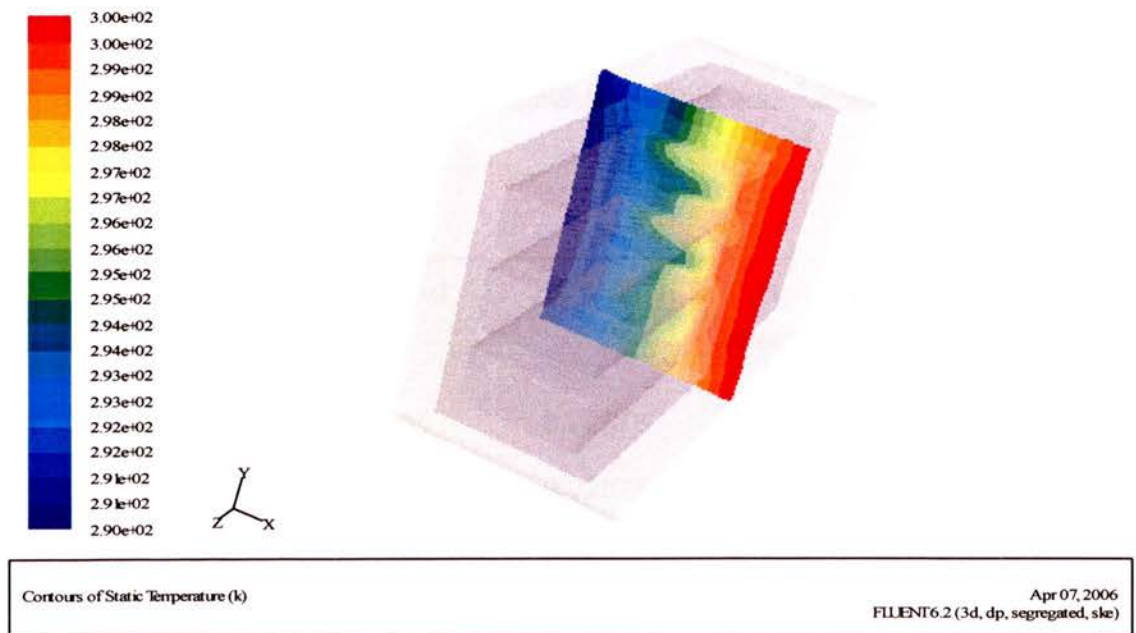


Figura 35. Mapa de contornos de temperaturas sobre uma *iso-surface*

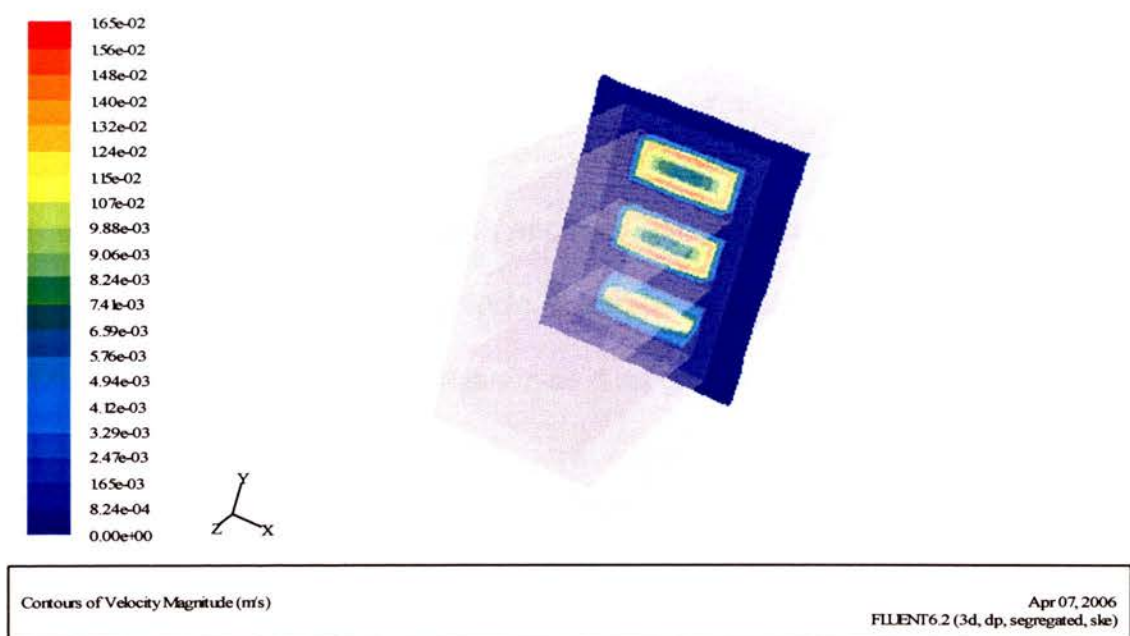


Figura 36. Mapa de contornos de velocidade dentro dos orifícios

### Comparação e análise de resultados das simulações 1,2 e 3

Tabela 2.

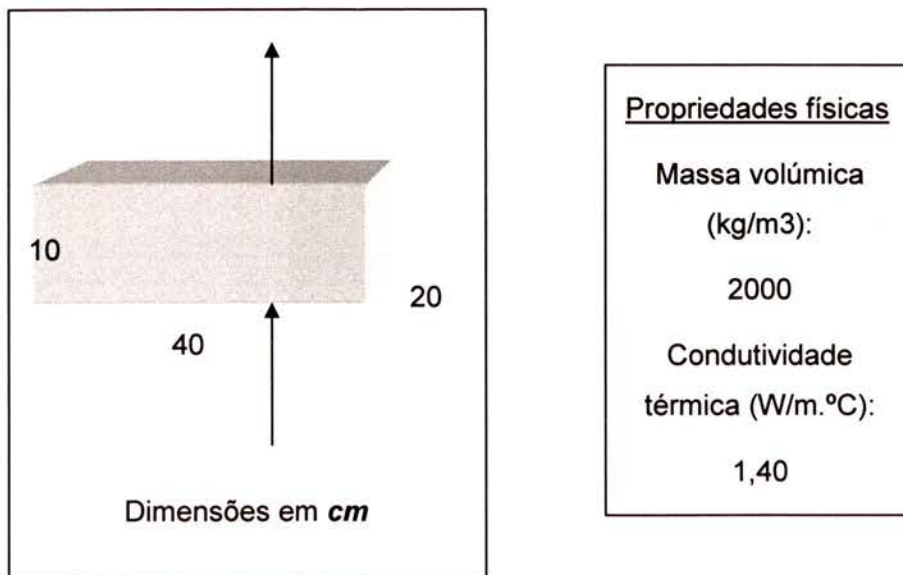
| Tijolo | % de furação | Q (J/s) | A (m2)  | Kp (W/m2.°C) | Desvio % |
|--------|--------------|---------|---------|--------------|----------|
| 604    | 40,8         | 1,80    | 0,02875 | 6,26         | +2,94    |
| 603    | 45,9         | 1,61    | 0,02875 | 5,85         | +5,54    |
| 602    | 49,3         | 1,95    | 0,02875 | 6,79         | -1,69    |

Destas simulações não se podem tirar conclusões acerca de uma eventual influência da quantidade de ar, porém os resultados obtidos do coeficiente global são bastante próximos (<10%) dos valores tabelados pelo LNEC.

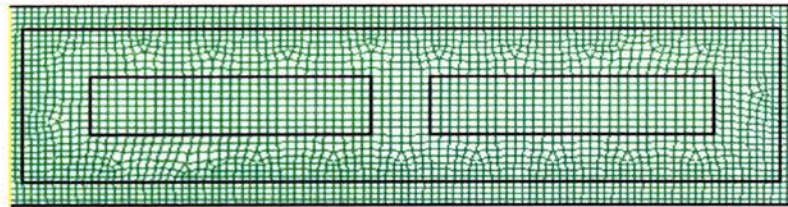
## Bloco 202

Efectuou-se um estudo de transferência de calor num bloco de betão normal (referência do LNEC<sup>1</sup> - 202) enquanto elemento constitutivo de uma parede de alvenaria simples (referência da parede na tabela do LNEC<sup>1</sup> – 171 202). Neste caso em particular utilizaram-se duas grelhas com diferentes graus de discretização (simulações 1 e 2) para verificar qual a influência deste parâmetro. Na simulação 3, utilizou-se uma grelha tridimensional para constatar qual a influência deste tipo de representação na modelização deste problema físico.

- **Características do bloco de betão normal**



- **Características da grelha original**

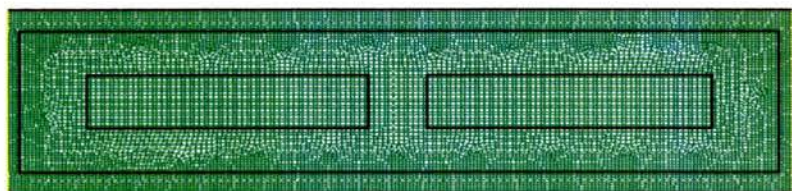


|      |                                      |  |  |  |              |
|------|--------------------------------------|--|--|--|--------------|
| Grid | FLUENT 6.2 (2d, dp, segregated, lam) |  |  |  | Apr 07, 2006 |
|------|--------------------------------------|--|--|--|--------------|

Figura 37.

| Level | Cells | Faces | Nodes | Partitions |
|-------|-------|-------|-------|------------|
| 0     | 2902  | 6343  | 3442  | 1          |

- Características da grelha adaptada



|      |                                      |  |  |  |              |
|------|--------------------------------------|--|--|--|--------------|
| Grid | FLUENT 6.2 (2d, dp, segregated, lam) |  |  |  | Apr 07, 2006 |
|------|--------------------------------------|--|--|--|--------------|

Figura 38.

| Level | Cells | Faces | Nodes | Partitions |
|-------|-------|-------|-------|------------|
| 0     | 11608 | 24294 | 12687 | 1          |

- Resultados e dados das simulações

### Simulação 1 – Grau de discretização?

Grelha: ficheiro bloco1.msh

Ficheiro case: bloco\_corrigido.cas

Ficheiro data: bloco\_corrigido.dat

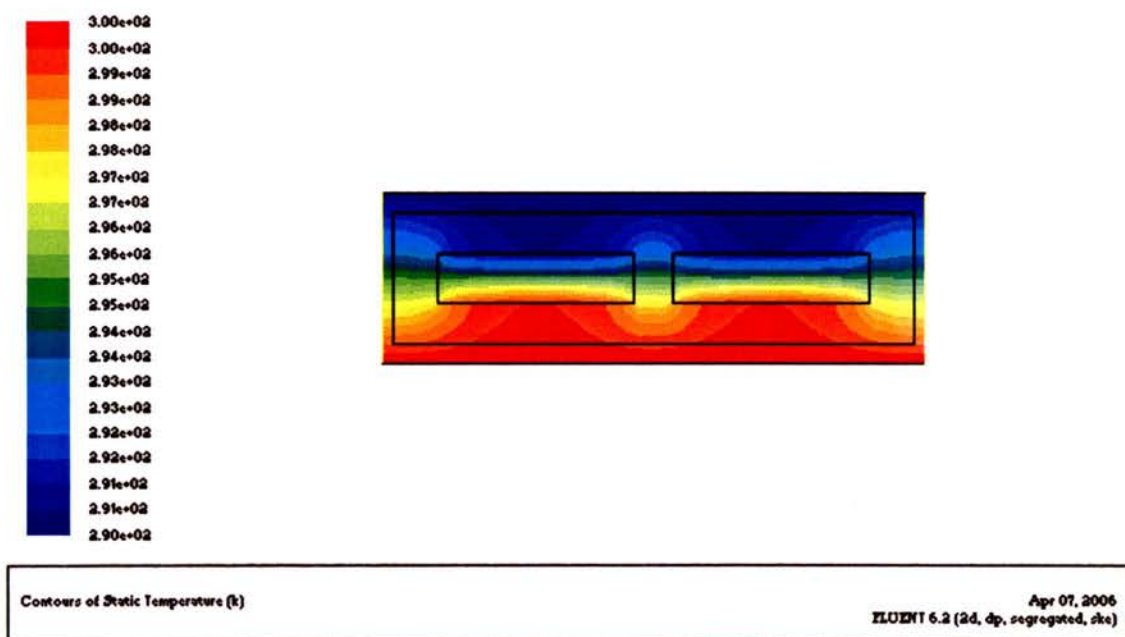


Figura 39.

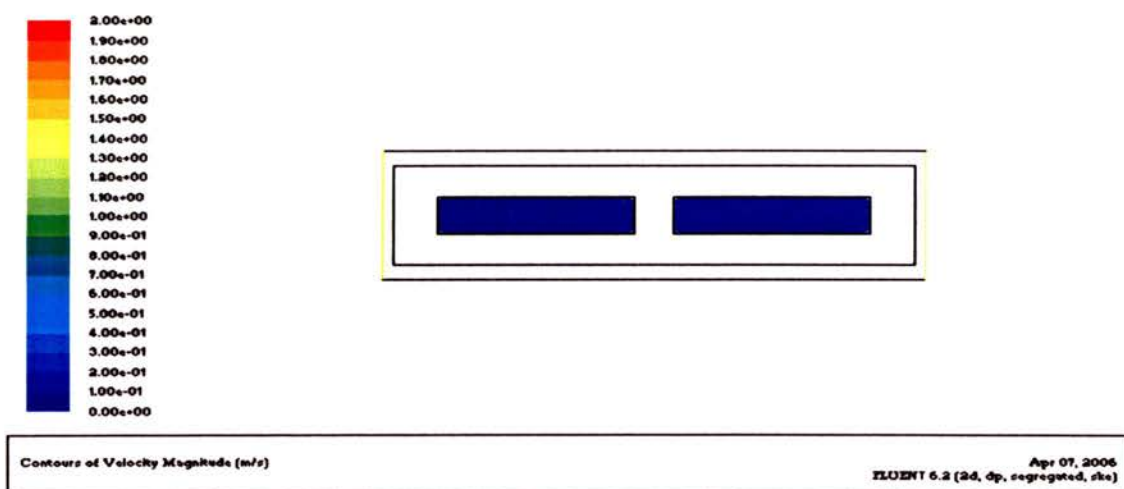


Figura 40.

Como se pode verificar pelo mapa de velocidades da figura 40, não existe ar em circulação. Esta constatação faz todo o sentido uma vez que devido à forma de colocação do bloco na parede não existe aceleração gravítica em nenhum dos dois eixos representados, pelo que não existe convecção de calor. O “achatamento” do perfil verificado na zona dos orifícios (ver figura 39) deve-se ao facto de a resistência térmica do ar ser superior à do bloco.

Esta simulação corresponde a um caudal térmico de 3,51 W, o que para uma área de transferência de calor de 0,083 m<sup>2</sup> representa um coeficiente global de 4,23 W/m<sup>2</sup>.°C. Este valor apresenta um desvio em relação ao tabelado de -29,8%.

Este valor porém não tem interesse prático, visto que esta grelha bidimensional não consegue modelizar com rigor este problema físico. Devido ao posicionamento dos buracos face à direcção da transferência de calor, a representação em questão inviabiliza um dos dois mecanismos de transferência de calor que na realidade estão presentes: aquele que é devido ao choque molecular, a condução e aquele que se deve ao movimento global do fluido, a convecção.

Na simulação seguinte esta grelha foi novamente utilizada mas apenas para avaliar qual a melhoria que um maior refinamento introduz na exactidão do resultado pelo que o resultado não padece de ser interpretado

cientificamente. Conquanto, na terceira e última simulação, este problema aparecerá bem modelizado através de uma grelha tridimensional.

**Simulação 2 – Grau de discretização?**

Grelha: ficheiro bloco1.msh

Ficheiro case: bloco\_corrigido.cas

Ficheiro data: bloco\_corrigido.dat

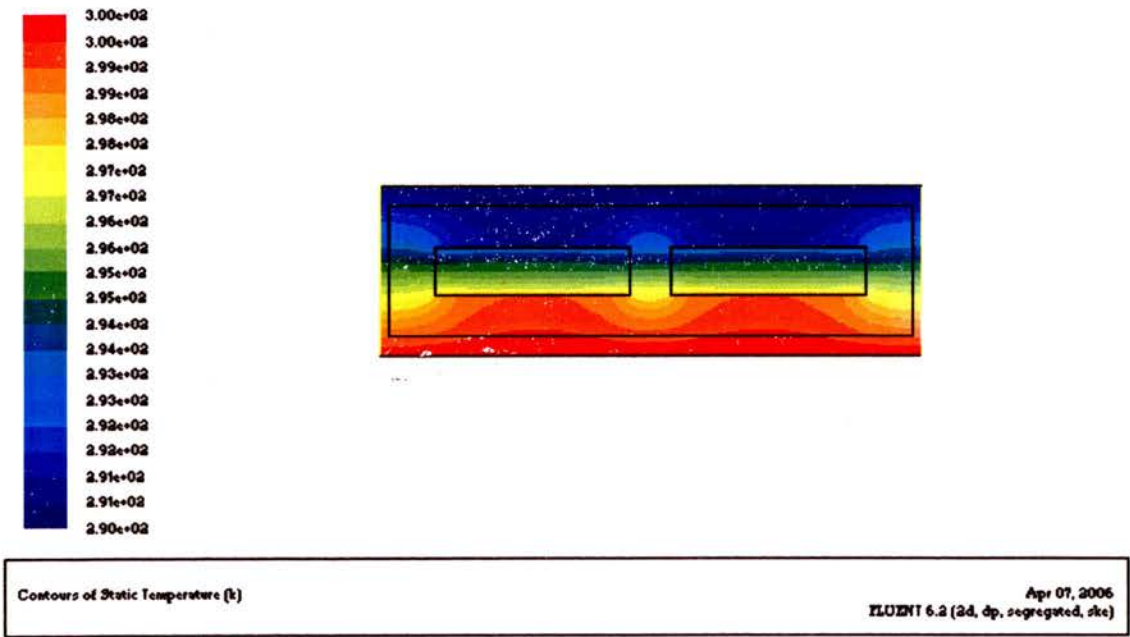


Figura 41.

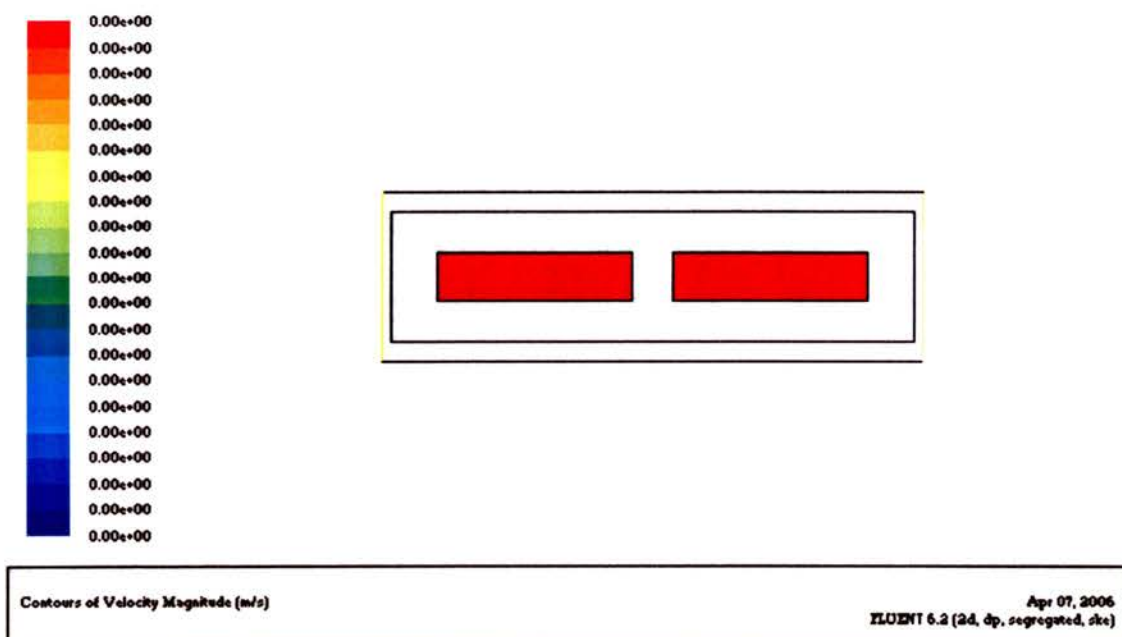


Figura 42.

Nesta parede e para uma área de transferência igual à da primeira simulação o coeficiente global agora registado é de 5,07 W/m<sup>2</sup>.°C o que reflecte uma diferença em relação ao resultado anterior de cerca de 21%. Com este resultado conclui-se que a primeira grelha utilizada era muito esparsa.

### Simulação 3 – 3D?

Grelha: ficheiro bloco202\_3d.msh

Ficheiro case: bloco202\_3d\_maisit.cas

Ficheiro data: bloco202\_3d\_maisit.dat

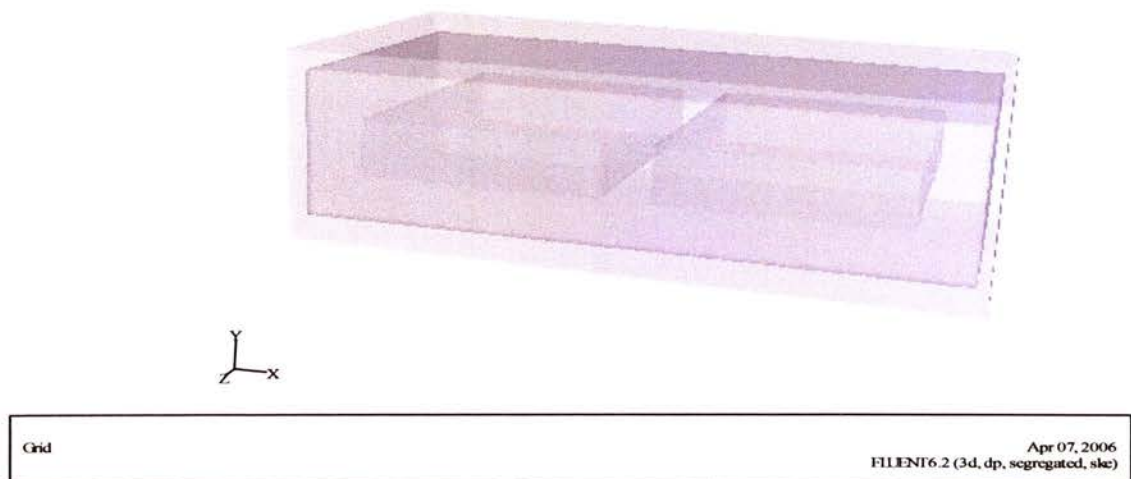


Figura 43. Esquema da grelha da parede tridimensional

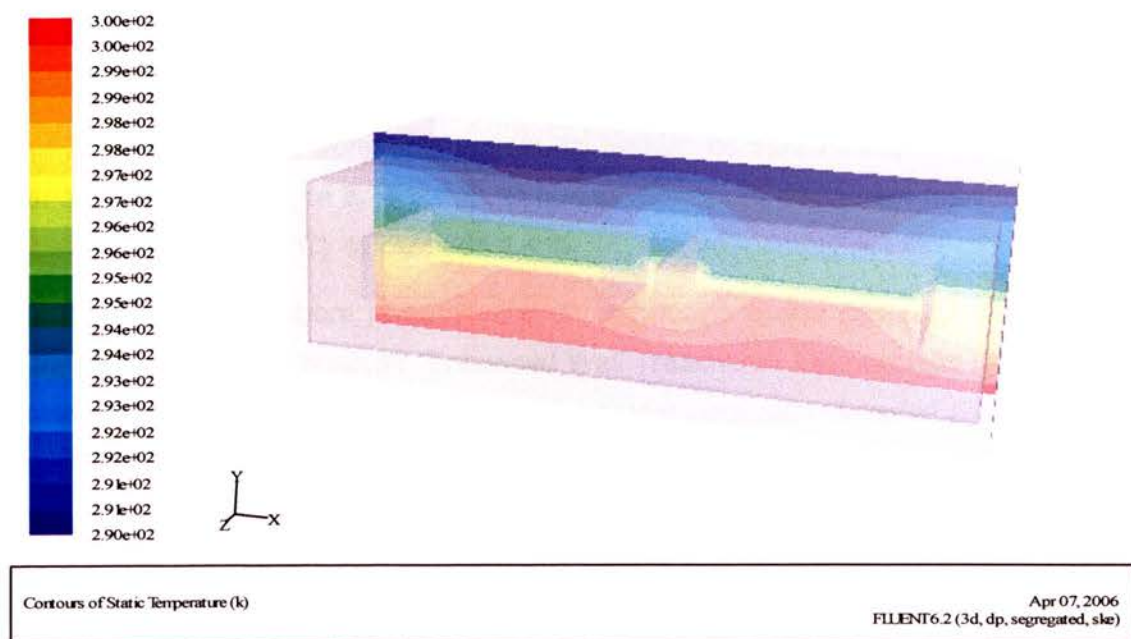


Figura 44. Mapa de contornos de temperatura sobre uma *iso-surface*

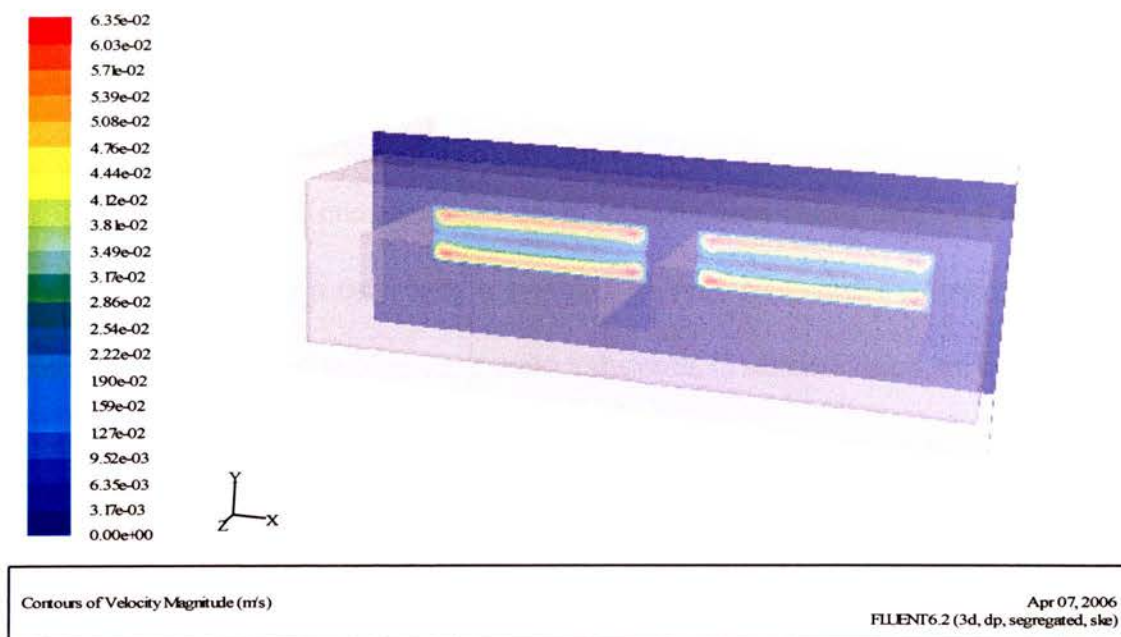


Figura 45. Mapa de contornos de velocidade sobre uma *iso-surface*

Esta grelha permite modelizar os dois mecanismos de transporte de calor: convecção e condução.

Esta simulação apresenta um caudal térmico de 5,00 W, o que corresponde a um coeficiente global de 5,74 W/m<sup>2</sup>.°C que simboliza um desvio em relação ao valor tabelado (5,49 W/m<sup>2</sup>.°C) de cerca de 4,4 %.

Este valor embora já apresentando um desvio quase desprezável, foi ainda mais refinado usando a opção "Enhanced Wall Treatment". Esta decisão fundamenta-se pelo facto de as velocidades observadas serem bastantes elevadas (ver escala da figura 45) o que indicia uma espessura da camada limite térmica muito pequena pelo que uma maior discretização do espaço nas zonas adjacentes às paredes dos orifícios acarreta maior precisão.

Após esta melhoria o resultado do coeficiente global cifrou-se nos 5,66 W/m<sup>2</sup>.°C o que representa um desvio em relação ao valor tabelado de +2,92%.

## 2ª PARTE

Por oposição à primeira parte deste trabalho esta última fase destinou-se ao cálculo do tempo que o calor leva a transferir-se num dado sistema físico, como tal realizaram-se duas simulações em estado transiente. O sistema físico em questão é a parede 171 202 (alvo de estudos supracitados), porém aparece acrescida de uma camada de 4 cm de poliestireno extrudido em placas. Os valores do coeficiente de transferência global ( $K_p$ ) obtidos foram comparados com os tabelados pelo LNEC<sup>2</sup>.

### Bloco 202 – Não Homogéneo

Grelha: ficheiro bloco202\_isolante\_corrigido.msh

Ficheiro case: bloco202\_isolante\_corrigido\_41400.cas

Ficheiro data: bloco202\_isolante\_corrigido\_41400.dat

Nesta simulação foi adoptado um passo de 1 segundo na resolução numérica das equações de transporte (time step size = 1s). Heuristicamente sabe-se que o passo deve corresponder aproximadamente ao tempo que o calor leva a percorrer uma célula do espaço discretizado, pelo que com a dimensão de uma célula da grelha e com a velocidade média dentro dos orifícios alcançou-se um tempo da ordem de grandeza acima descrita.

---

<sup>2</sup> “Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios”, C.A. Pina dos Santos e José A. Vasconcelos de Paiva, Lisboa (1990)

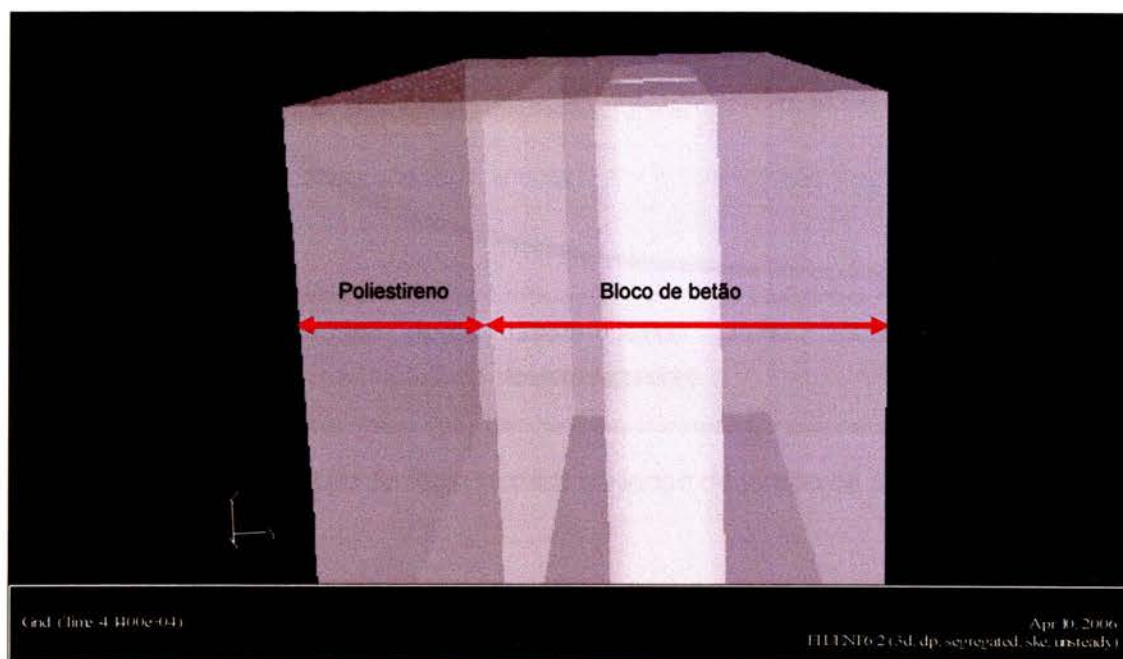


Figura 45. Esquema de faces que constituem a grelha da parede

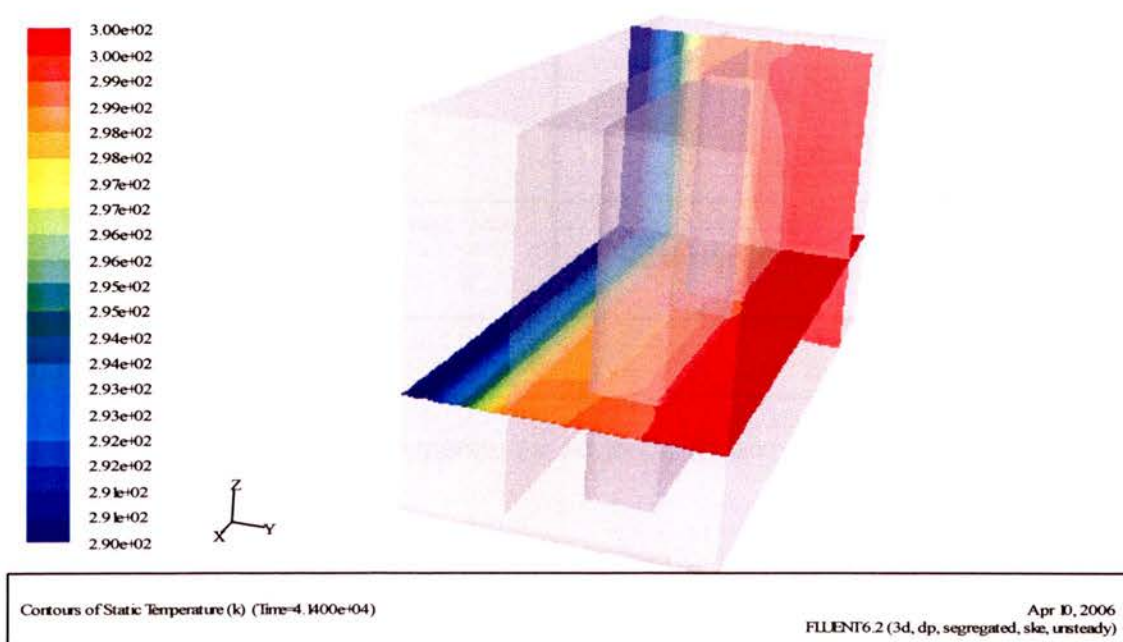


Figura 46. Mapa de temperaturas após 41400 time steps (ou seja 41400 segundos)

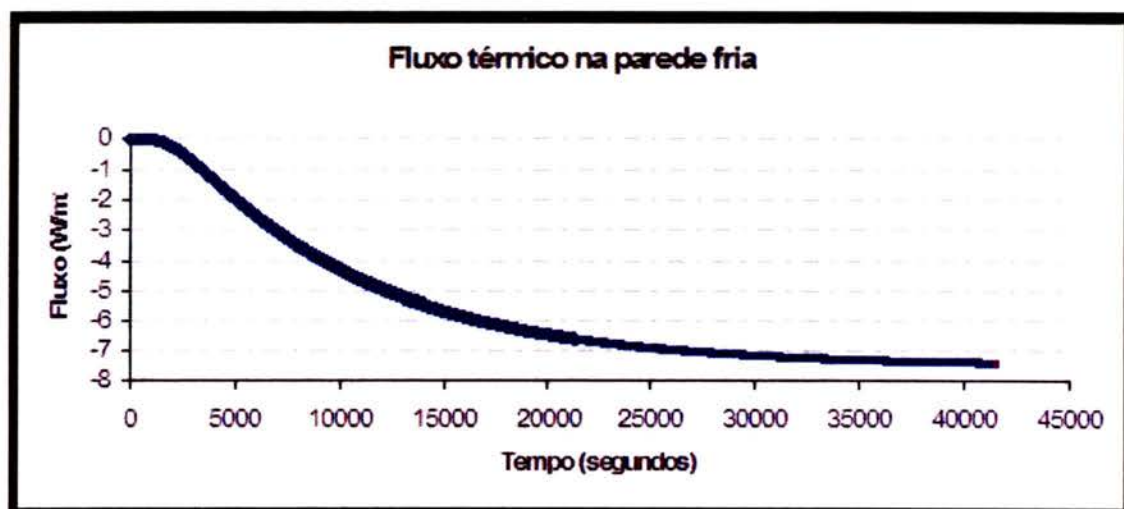


Figura 47. Variação do fluxo térmico ao longo do tempo de simulação

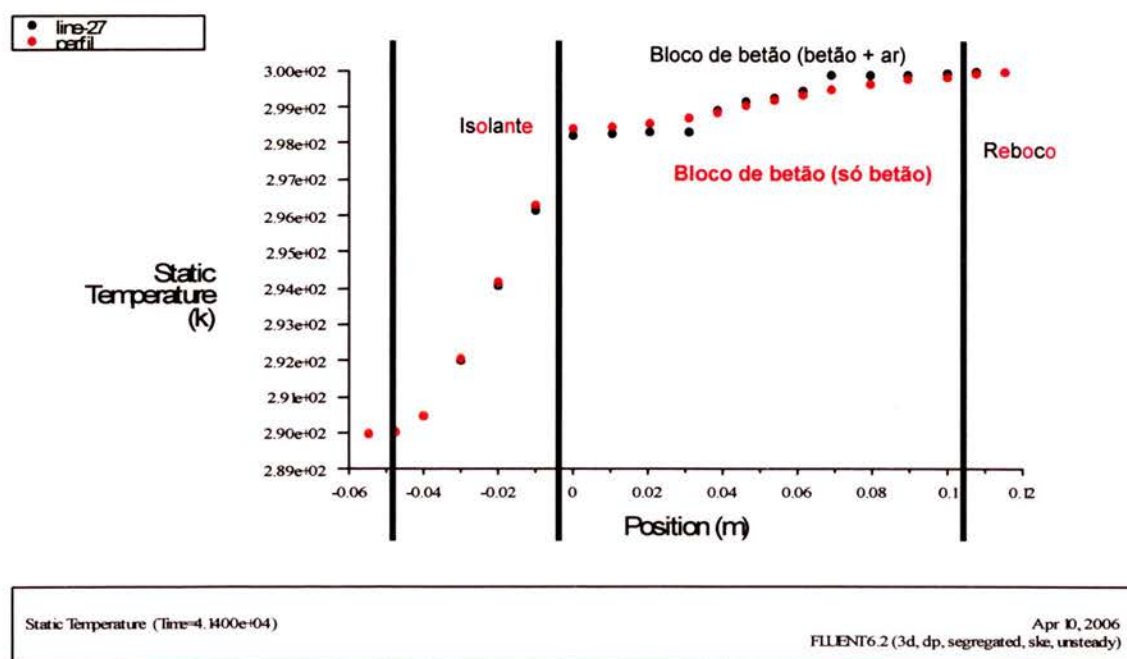


Figura 48. Perfil de temperaturas ao longo do eixo de transferência de calor (yy)

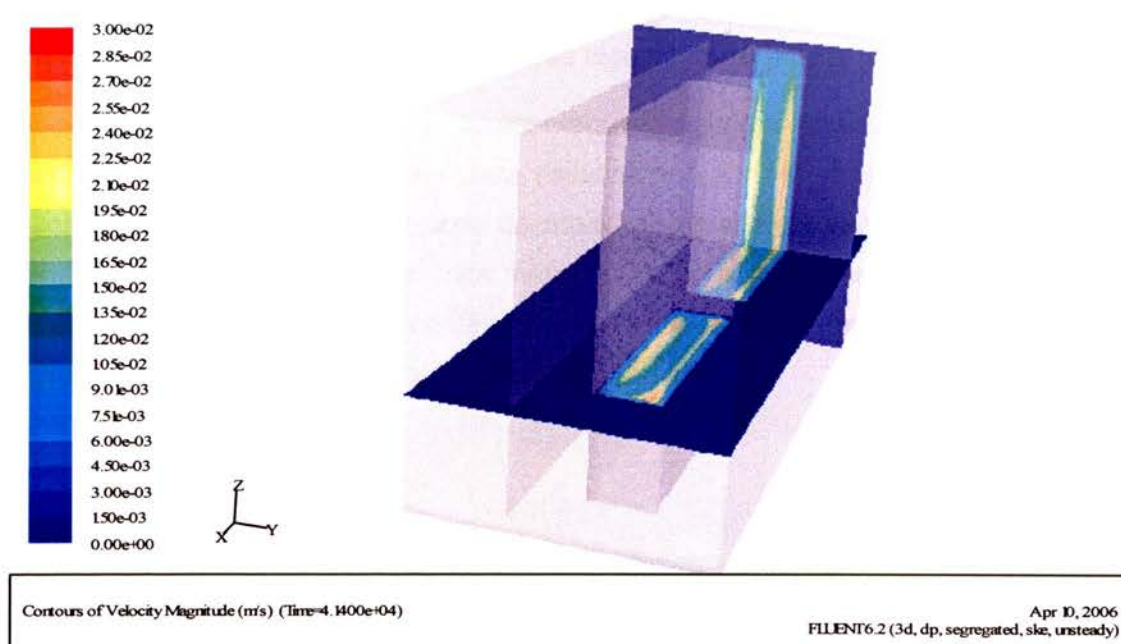


Figura 49. Mapa de velocidades

Para esta parede o valor do fluxo térmico obtido foi, em valor absoluto e em estado estacionário (como se pode verificar no gráfico da figura 47), de  $7.38 \text{ W/m}^2$  pelo que para um gradiente térmico de  $10\text{K}$ , o coeficiente global de transferência é  $0,738 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ . O valor tabelado pelo LNEC em [2] é  $0,65 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ , pelo que este resultado constitui um desvio percentual relativo de  $+11,9\%$ .

Como se pode verificar pelo gráfico da figura 47, o caudal térmico estabilizou no eixo temporal ao fim de cerca de 41400 segundos, correspondendo a 11 horas e meia.

O gráfico da figura 48 pretende de certa forma validar o resultado obtido, demonstrando que o perfil de temperaturas obtido em estado estacionário é coerente com as resistências térmicas envolvidas neste fenómeno de transporte. Assim sendo, podem-se observar gradientes térmicos pouco acentuados no bloco e no reboco e uma queda acentuada de temperatura na zona do poliestireno. Esta última constatação salienta-se que é devidamente potenciada pela grande massa térmica do isolante (elevada capacidade calorífica) bem como pela sua reduzidíssima condutividade térmica ( $0,035 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ ).

No sentido de avaliar se o tempo de transferência de 41400 segundos é razoável tentou-se determinar analiticamente este mesmo tempo, porém esse

Como tal e como se passa a apresentar nas figuras seguintes nota-se alguma semelhança entre o perfil de uma placa espessa (em que só um dos lados troca calor, vulgo, placa semi-infinita) e o perfil do nosso sistema. Esta semelhança faz todo o sentido pois o lado do isolante troca muito pouco calor com o exterior, pelo que não sendo totalmente adiabática confere ao perfil de temperaturas que lhe antecede alguma semelhança com o da placa semi-infinita.

Gráfico de temperatura estática versus posição axial da placa. O eixo horizontal representa a dimensão axial da placa em metros, variando de 0,15 a 0. O eixo vertical esquerdo representa a temperatura estática em Kelvin (K), variando de 289 a 301. O eixo vertical direito representa a temperatura em graus Celsius (°C), variando de 289 a 301. Os dados são plotados como pontos azuis, mostrando uma temperatura constante de aproximadamente 290 K para posições maiores que 0,10 m, e uma elevação abrupta para posições menores que 0,10 m, atingindo cerca de 300 K na posição 0.

50

Perfil após 1800 segundos

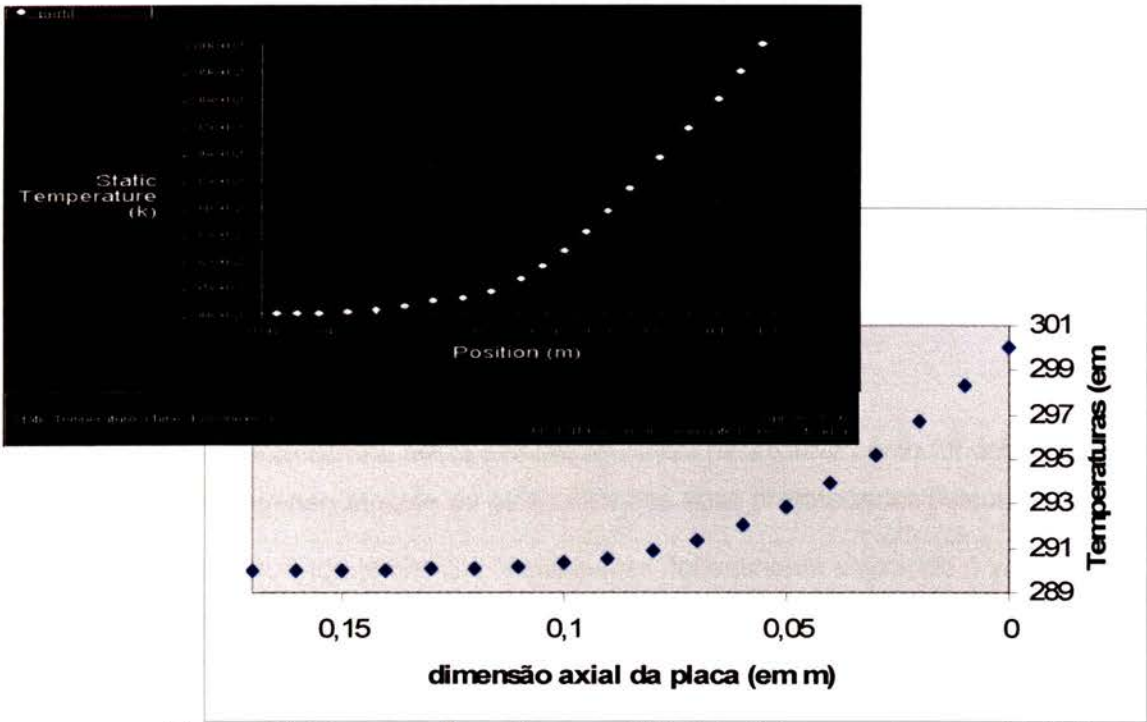


Figura 51. Comparação entre o perfil “teórico” de uma placa semi-infinita (cinzento) e o perfil de temperaturas do sistema em estudo (preto)

Perfil após 41400 segundos (estado final)

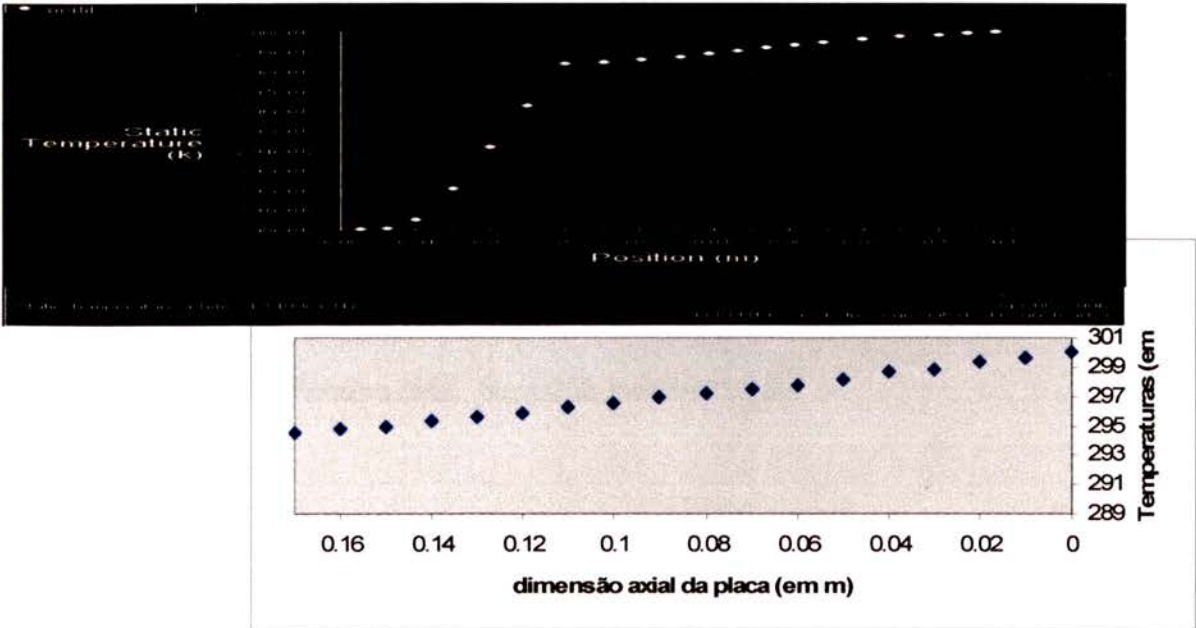


Figura 52. Comparação entre o perfil “teórico” de uma placa semi-infinita (cinzento) e o perfil de temperaturas do sistema em estudo (preto)

O valor final da temperatura a meio da placa é de 298.5K como se pode verificar pelo gráfico da figura 52, pelo que fazendo o cálculo para saber quanto tempo demora o centro de uma placa semi-infinita a chegar à mesma temperatura, chegou-se a um valor de cerca de 170 000 segundos. Na placa o processo de transporte é mais lento, aliás como se pode observar nas figuras 50 a 52, pelo que o valor de 41400 parece parcialmente validado.

## Bloco 202 – Homogéneo

O aspecto central desta simulação passa pela forma como foi definido o material homogéneo através da estimativa das suas propriedades físicas.

A condutividade térmica “equivalente” foi estimada utilizando o valor do coeficiente global da parede obtido anteriormente e através da espessura total da parede:

$$K_{equivalente} = U_{parede} \cdot espessura(m) = 0.738 \times 0.17 = 0.1245 \text{ W / m}^\circ\text{C}$$

A massa volúmica foi estimada ponderando os volumes dos diversos elementos constitutivos da parede:

$$\rho_{homogéneo} = \frac{volume_1}{volume_{total}} \cdot \rho_1 + ..... + \frac{volume_N}{volume_{total}} \cdot \rho_N$$

A capacidade calorífica foi estimada, de uma forma idêntica à massa volúmica mas ponderando as massas.

Grelha: ficheiro bloco202\_isolante\_corrigido.msh

Ficheiro case: bloco202\_pelamassa.cas

Ficheiro data: bloco202\_pelamassa.dat

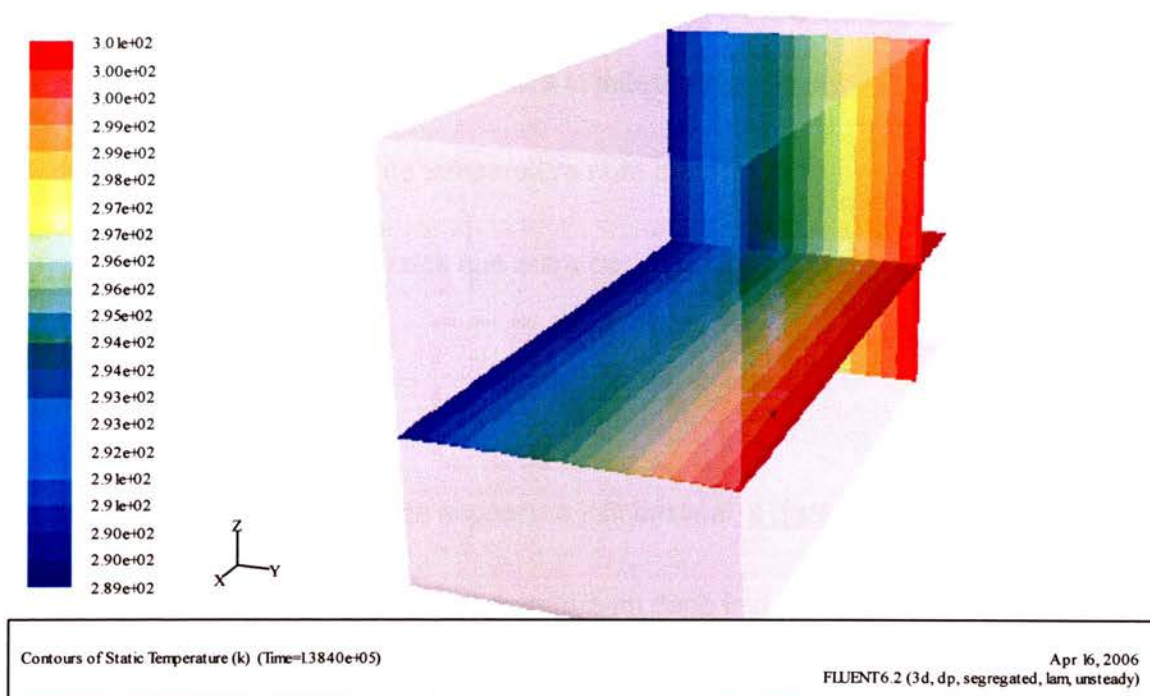


Figura 53. Perfil de temperaturas do bloco definido como um material “pseudo-homogéneo”

Segundo esta simulação o sistema leva cerca de **140 000 segundos** a atingir o estado estacionário, o que revela uma grande inércia térmica. Este resultado apresenta um aumento superior a 200% relativamente ao tempo do bloco não-homogéneo. Neste sentido, foram testadas várias hipóteses com o intuito de avaliar se apenas a capacidade calorífica influencia este processo ou se existem outras variáveis que não estão a ser consideradas. Conquanto recorreu-se ao modelo matemático que descreve este sistema físico:

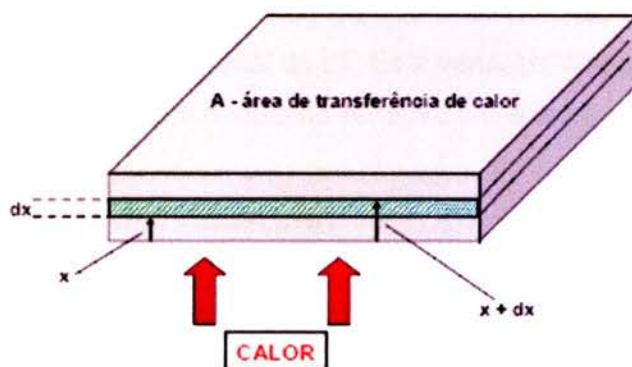


Figura 54. Placa sólida, e dentro desta, um elemento de espessura infinitesimal (dx)

Na face inferior do elemento de espessura infinitesimal, à distância  $x$ , vem que:

- Gradiente de temperatura num dado instante:  $\frac{\partial T}{\partial x}$
- Energia térmica que entra por esta face durante o intervalo de tempo  $dt$ :

$$-k \cdot A \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) \cdot dt$$

Na face superior do elemento de espessura infinitesimal, à distância  $x+dx$ , vem que:

- Gradiente de temperatura num dado instante:  $\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx$
- Energia térmica que entra por esta face:

$$-k \cdot A \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right) \cdot dt$$

A subtracção das duas equações relevadas a vermelho representa a acumulação de calor que ocorre no elemento de espessura  $dx$  durante o intervalo de tempo  $dt$ :

$$dE_Q = k \cdot A \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \cdot dx \cdot dt$$

Por outro lado, o calor acumulado durante esse intervalo  $dt$  faz variar a temperatura do elemento infinitesimal de  $dT$ . Esta variação, como o sistema de encontra a pressão constante é dado pela variação entálpica:

$$dE_Q = dm \cdot c_p \cdot dT = (\rho \cdot A \cdot dx) \cdot c_p \cdot dT$$

A igualdade entre as duas últimas equações supracitadas resultam na equação diferencial que traduz a transferência de calor em estado transiente nesta parede de área constante:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

Eq.(A)

A equação (A) sugere que a variação da temperatura ao longo do tempo é proporcional a um conjunto de três propriedades físicas cuja relação se designa vulgarmente por difusividade térmica ( $\alpha$ ):

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot Cp}$$

Este é o termo que deve ser mantido constante, ou seja, as propriedades do material “pseudo-homogéneo” devem respeitar a difusividade térmica, que representa fisicamente, o coeficiente de difusão do calor sensível.

Esta foi então calculada para o caso do bloco 202 não homogéneo, pelo que em seguida se descreve esse procedimento:

1) Em Report > Volume Integrals...

a) calcular a massa volúmica ponderada pelo volume

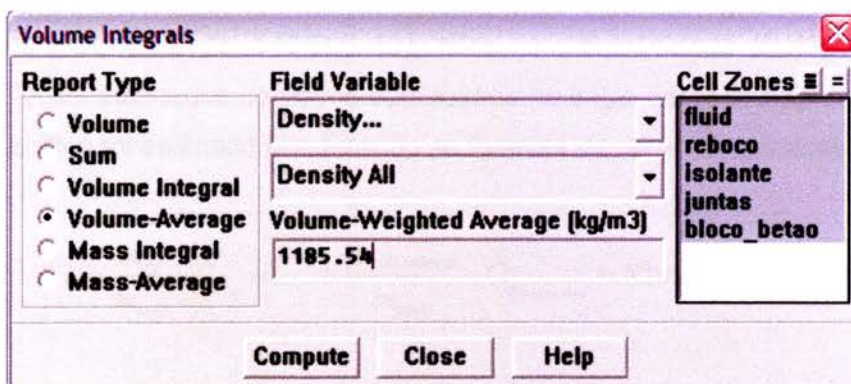


Figura 55.

b) calcular a condutividade térmica ponderada pelo volume

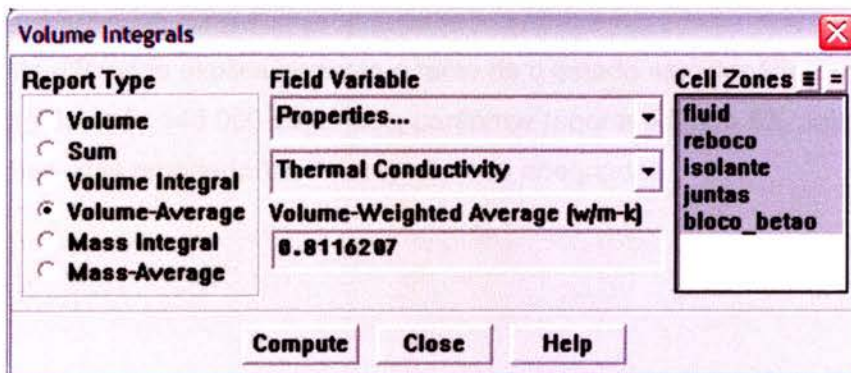


Figura 56.

c) calcular o calor específico ponderado pelo volume

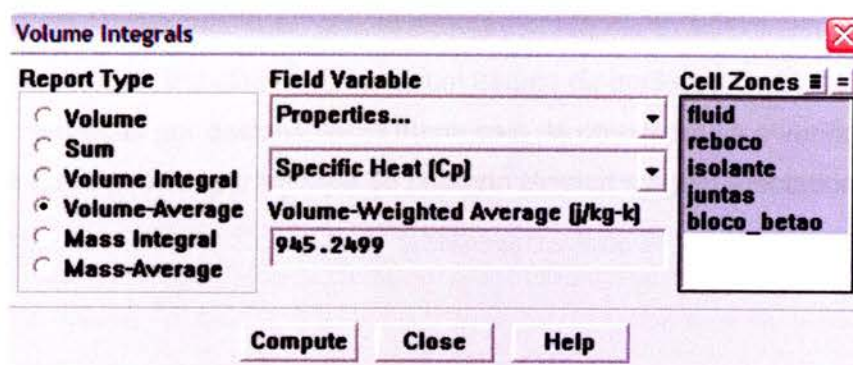


Figura 57.

o que resulta para o caso do bloco não homogéneo numa difusividade térmica de:

$$\alpha = \frac{0.8116}{(945.25 \cdot 1185.54)} = 7.25e - 07 \text{ m}^2 / \text{s}$$

Para a simulação do bloco homogéneo e que resultou num tempo de transferência de calor de 140 000 segundos, a condutividade térmica e a massa volúmica foram estimadas conforme supracitado no início deste exemplo, conquanto o calor específico foi estimado ponderando as massas de cada componente:

$$\overline{C_p} = \frac{m_{ar}}{m_{total}} \cdot C_{p_{ar}} + \dots + \frac{m_{poliestireno}}{m_{total}} \cdot C_{p_{poliestireno}} = 829.03 \text{ J / kg} \cdot ^\circ \text{C}$$

Este conjunto de valores corresponde a uma difusividade térmica de:

$$\alpha = \frac{0.1245}{(829.03 \cdot 1416.98)} = 1.07e - 07 \text{ m}^2 / \text{s}$$

Esta diferença explica portanto o facto de o estado estacionário nesta situação só ser atingido após 140 000 segundos, conforme reporta a figura 53, pelo que estas ponderações (das propriedades físicas) não são adequadas.

### 3ª PARTE

Nesta parte do trabalho realizou-se um estudo de implementação de um sistema de ventilação por deslocamento numa sala de uma moradia e verificou-se de que forma é que os vários parâmetros do conforto térmico surgem afectados por essa perturbação.

#### Ventilação por deslocamento. O que é?

Como qualquer processo de ventilação implica a renovação do ar com o intuito de manter as condições de habitabilidade de um determinado local, porém o conceito específico consiste em insuflar ar frio a baixas velocidades ao nível do solo, contribuindo para que o ar mais quente suba até ao nível do tecto onde é realizada a extracção (ver figura seguinte). Ou seja é criado um caudal estratificado utilizando as forças de impulsão criadas dentro da sala.

Consubstancia, genericamente, um modo de obter boa qualidade do ar em espaços ocupados e surge por oposição à ventilação por mistura (ou diluição).



Figura 58.

Em que sala foi aplicado este modelo?

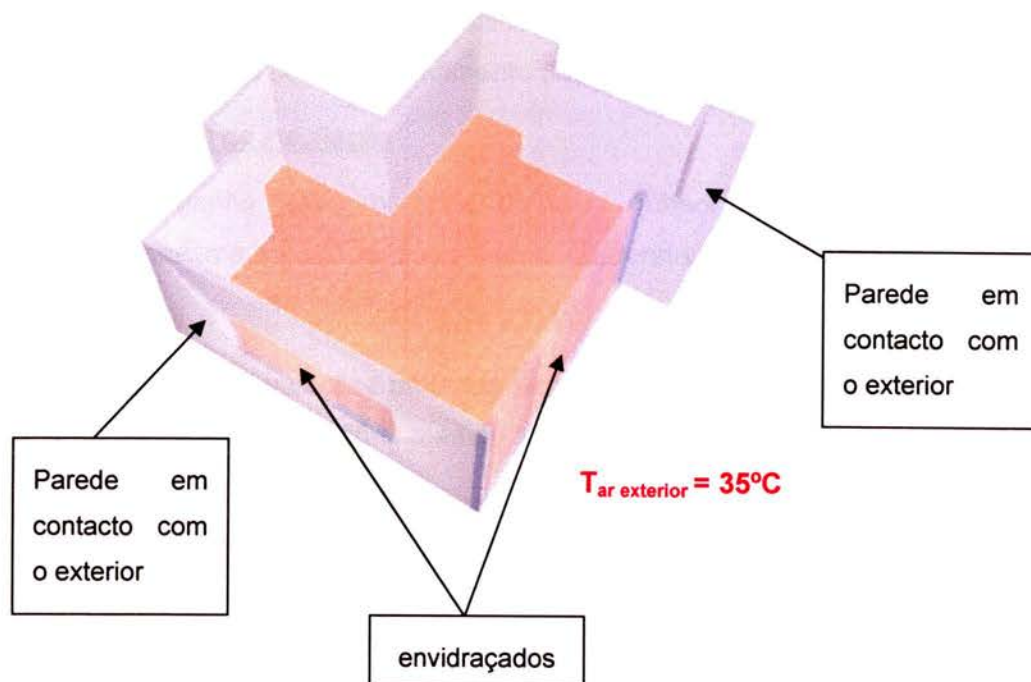


Figura 59.

O piso bem como todas as restantes paredes são interiores e como tal são consideradas adiabáticas.

Perante estas condições estudou-se qual a influência de diversas configurações (entre insuflação e exaustão) na eficácia da ventilação, bem como em alguns casos, no conforto térmico.

Antes de proceder às simulações foi efectuada uma pesquisa no manual REHVA sobre "Sistema de ventilação por deslocamento em espaços não industriais" (Lisboa 2004), no sentido de identificar características comuns a este tipo de ventilação no que diz respeito a caudais de insuflação típicos bem como especificações dos difusores.

#### Resultados relevantes da pesquisa

- A diferença máxima de temperaturas (entre exaustão e insuflação) deve estar compreendida entre a gama de 4-10 K.

- Os caudais típicos de insuflação variam entre 70 e 80 l/s
- Os difusores de utilização comum têm de largura cerca de 60 cm e alturas que variam entre 20 cm e 120 cm.

De acordo com estas características estimou-se uma velocidade do ar de insuflação de acordo com o procedimento descrito em seguida.

#### Estimativa do caudal de insuflação

Potência ganha pelas paredes da sala quando se pretende manter a temperatura na mesma a 20°C com o ar a uma temperatura exterior de 35°C:

$$Q_1 = 630 \text{ W}$$

Nas presentes simulações pretende-se manter o ar da sala a 19°C pelo que o gradiente térmico será não de 15°C mas de 16°C, logo a potência será:

$$\frac{630}{Q_2} = \frac{\cancel{U_1} \cdot \cancel{A_1} / \cancel{(\Delta T_1)}}{\cancel{U_2} \cdot \cancel{A_2} / \cancel{(\Delta T_2)}} \quad \begin{matrix} 15^\circ\text{C} \\ 16^\circ\text{C} \end{matrix}$$

$$Q_2 = 591 \text{ W}$$

Por balanço energético:

$$\rho \cdot C_p \cdot (\theta_{\text{exaustão}} - \theta_{\text{insuflação}}) \cdot q_{\text{ar}} = \phi_{\text{total}}$$

$$\Delta\theta = \theta_{\text{exaustão}} - \theta_{\text{insuflação}} = 6 \text{ K} \quad (\text{segundo referência [3]})$$

$$\rho = 1.2 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$C_p = 1000 \text{ J} / \text{kg} \cdot \text{K}$$

Logo,

$$q_{\text{ar}} = \frac{591}{1.2 \cdot 1000 \cdot 6} = 0.082 \text{ m}^3 / \text{s} = 295.5 \text{ m}^3 / \text{h}$$

Atendendo a que o difusor escolhido tem dimensões de 0.6 m x 0.6 m é possível com o valor do cauda volúmico do ar estabelecer uma velocidade de insuflação:

$$v = \frac{q_{\text{ar}}}{\text{área}} = \frac{295.5}{0.36} = 0.23 \text{ m} / \text{s}$$

## Simulação 1

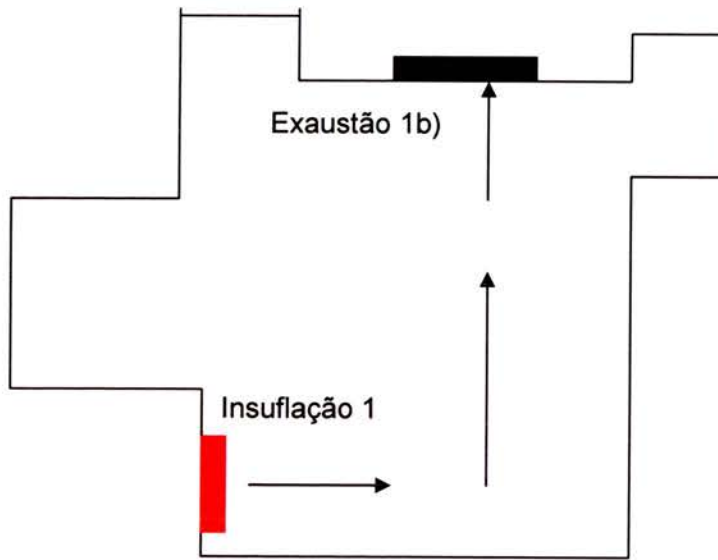


Figura 60.

### Condições fronteira

Insuflacao1 (velocity inlet – 0.23 m/s)

Exaustão 1b) (pressure outlet)

Exaustão 1a) (wall)

Temperatura do ar de insuflação: 17°C

### Grelha

É uma grelha quadrangular com um espaçamento de 8 cm.

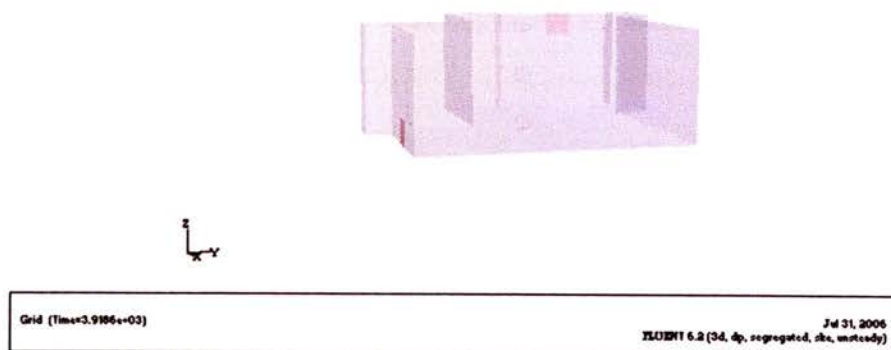


Figura 61.

Nesta simulação bem como em todas as que se seguem foi criado um ponto no centro da sala no qual se monitoriza a variação da temperatura ao longo do tempo.

A simulação foi interrompida quando a potência dissipada para o interior da sala entrou em regime permanente.

Esta situação ocorreu aos 3300 segundos que, com a grelha escolhida, corresponde a 11000 time steps (*time step size* = 0.3 s).

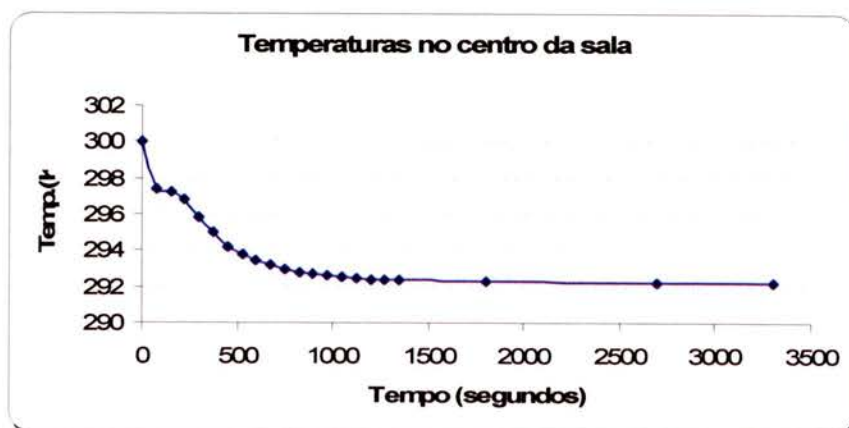


Figura 62.

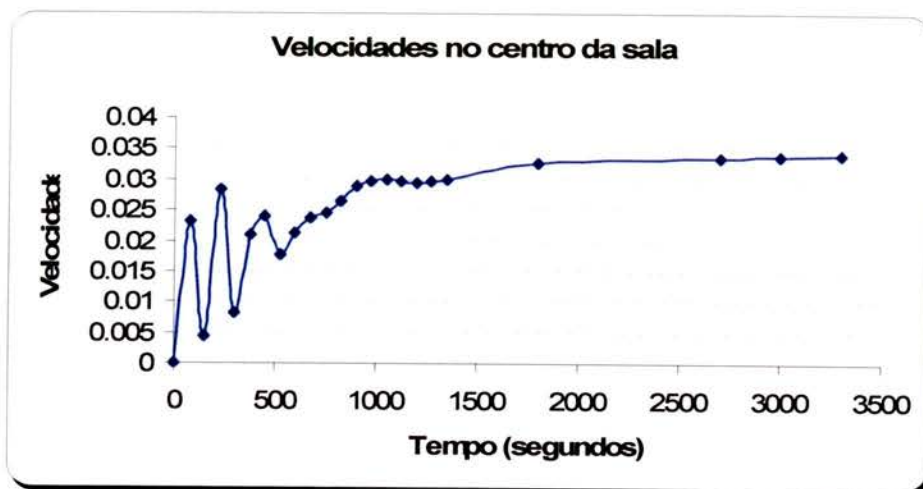


Figura 63.



Figura 64.

# Simulação 2 e 3

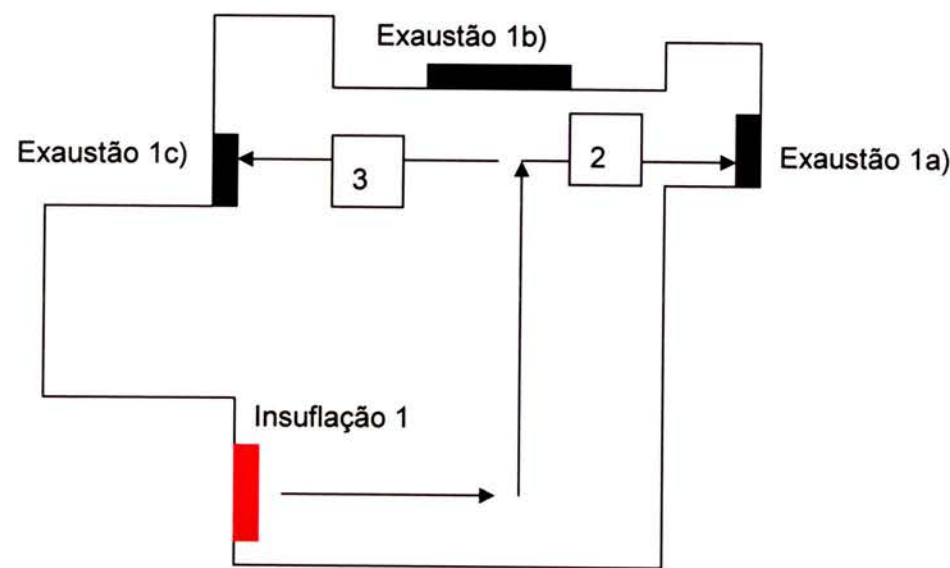


Figura 65.

## Condições fronteira

|                                         |                                |
|-----------------------------------------|--------------------------------|
| Insuflacao1 (velocity inlet – 0.23 m/s) |                                |
| Simulação 2                             | Exaustão 1b) (wall)            |
|                                         | Exaustão 1a) (pressure outlet) |
| Simulação 3                             | Exaustão 1b) (wall)            |
|                                         | Exaustão 1c) (pressure outlet) |

A insuflação e a exaustão têm áreas iguais (0.6 x 0.6)

Temperatura do ar de insuflação: 17°C

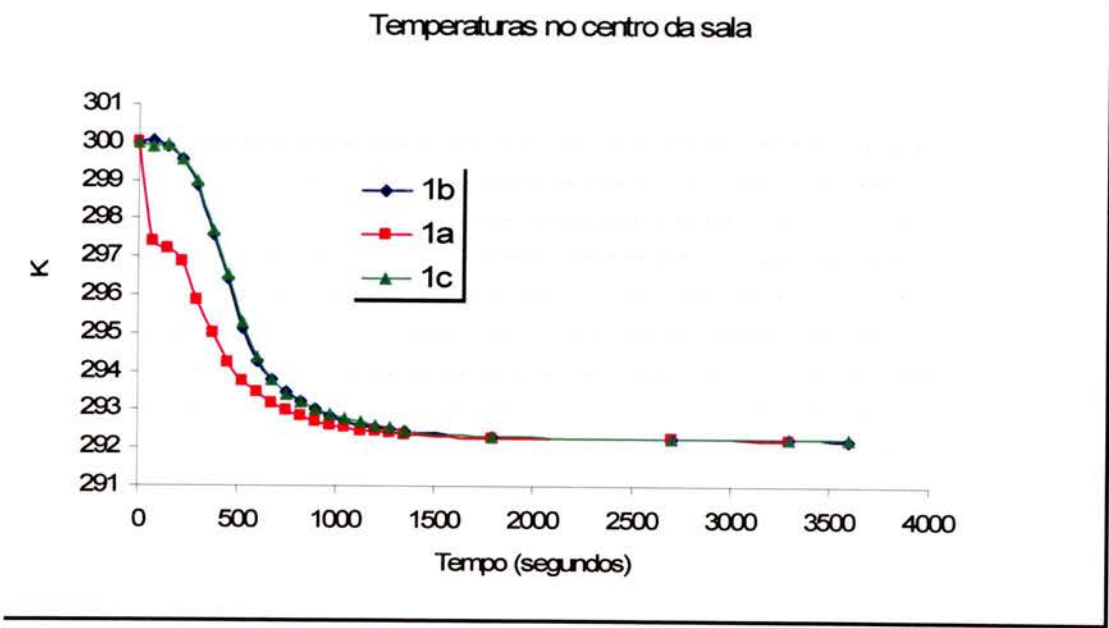


Figura 66.

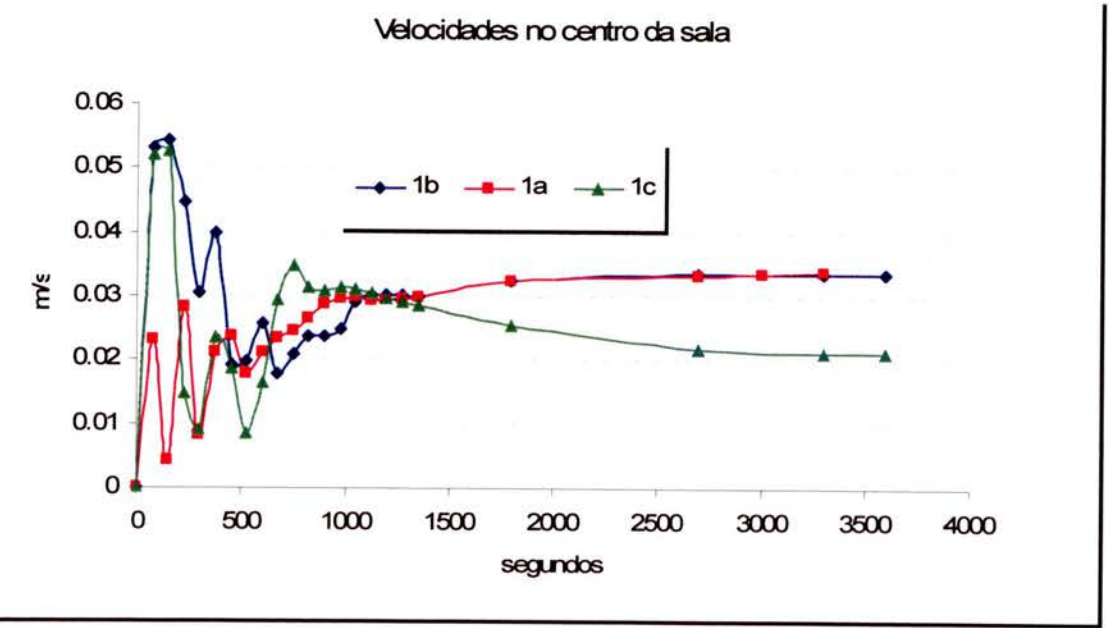


Figura 67.

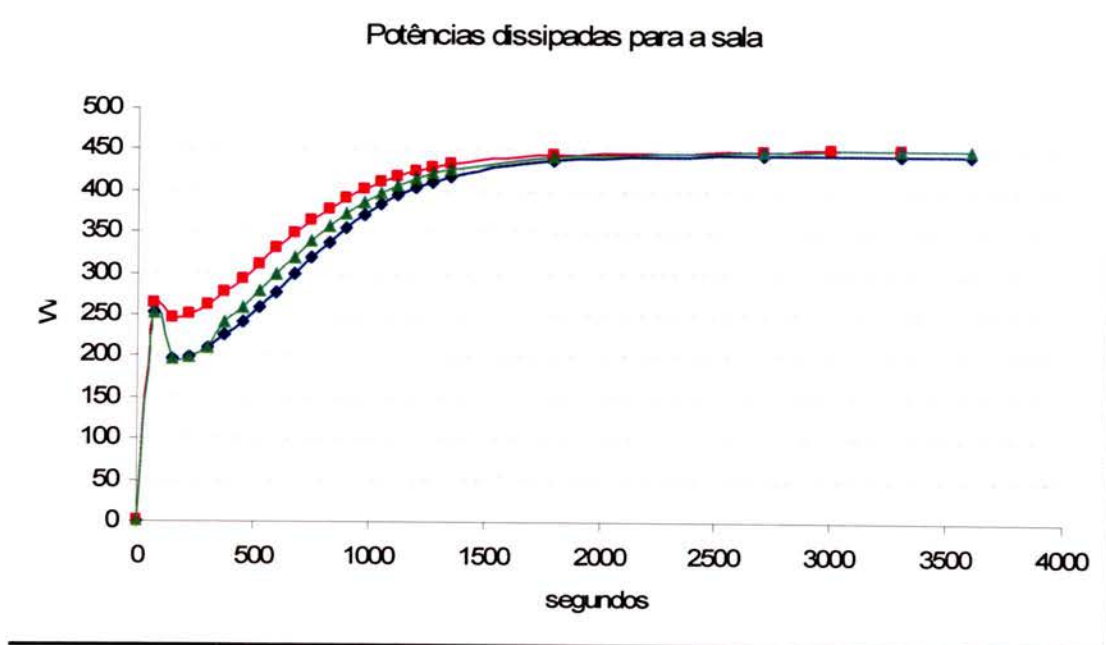


Figura 68.

De salientar que os gráficos das figuras 66 e 68 revelam estados estacionário iguais (o mesmo equilíbrio térmico) para qualquer uma das simulações, uma vez que tanto a temperatura exterior como a temperatura de insuflação são as mesmas.

A potência dissipada ronda os 450 W, inferior à inicialmente estimada (591 W), facto este que deve a uma maior resistência do ar.

O gráfico da figura 67 apresenta uma diferença significativa (cerca de 10%) na velocidade do ar no centro da sala no caso da configuração 1c), pois o facto de exaustão se encontrar mais próxima da insuflação induz uma aerodinâmica diferente ao escoamento. Esta constatação complementa-se quando surgem as stream traces de duas configurações em confronto (1b) e 1c)).

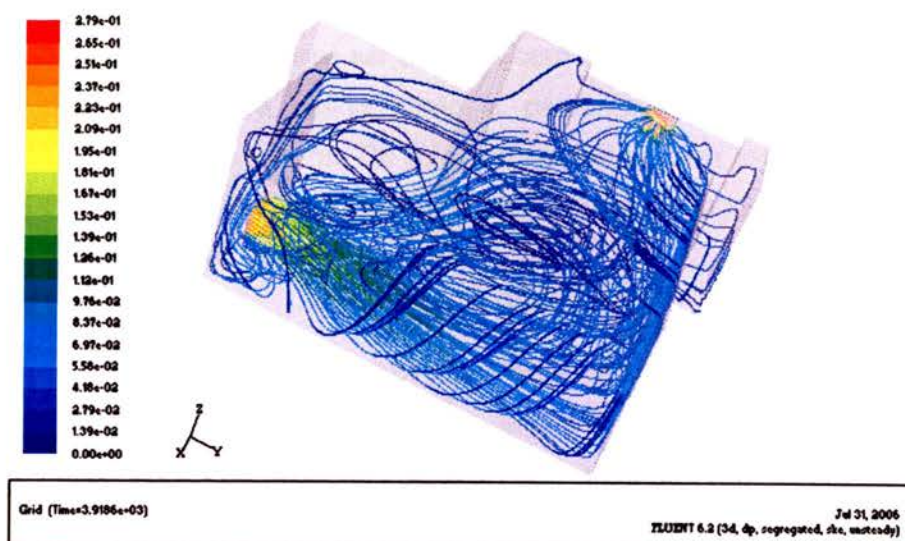


Figura 69.

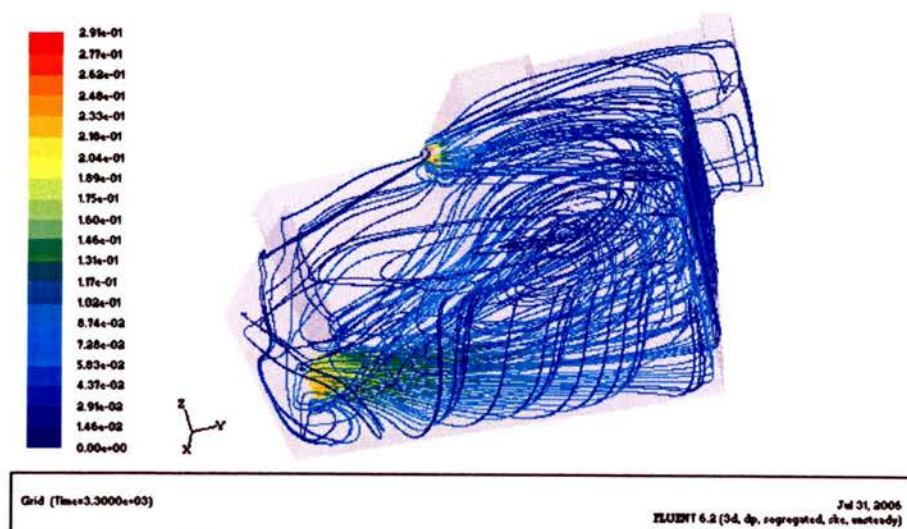


Figura 70.

Um facto comum a estas simulações é o número de renovações por hora (RPH) ou como aparece referenciado na literatura anglo-saxónica (ACH – Air Changes per Hour):

$$RPH = \frac{3600 \text{ s} \cdot 82 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s}}{97.85 \text{ m}^3} \cong 3$$

Este valor é concordante com o RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (regulamento transposto para a lei nacional no dia 4 de Abril de 2006), que define o valor de 0.6 RPH num edifício habitacional como condição para o que o ar seja respirável.

Conquanto a eficiência de uma ventilação que, neste caso, não implica a remoção de contaminantes deve ser avaliada com base na eficiência da renovação de ar, que por sua vez se define como a percentagem do ar insuflado que é efectivamente útil para a mesma. Ou seja, calcularam-se para estas três simulações o índice ADPI ("Air Diffusion Performance Index") bem como a idade média do ar, cujo compêndio se apresenta na tabela seguinte:

Tabela 2.

| Posição | ADPI (%) | Idade Média (s) |
|---------|----------|-----------------|
| 1b)     | 84.8     | 1591            |
| 1a)     | 83.8     | 1641            |
| 1c)     | 84.9     | 1473            |

O índice ADPI é o critério mais aceite para definir se a distribuição do ar é aceitável ou não, porém não é um índice de conforto porquer ele pode coexistir com condições termicamente desfavoráveis.

O valor deste índice é bastante semelhante ao valor da fracção de volume útil obtida para o caso da configuração 1b) (simulação 1) após simulação com uma perturbação em degrau na concentração de um traçador à entrada:

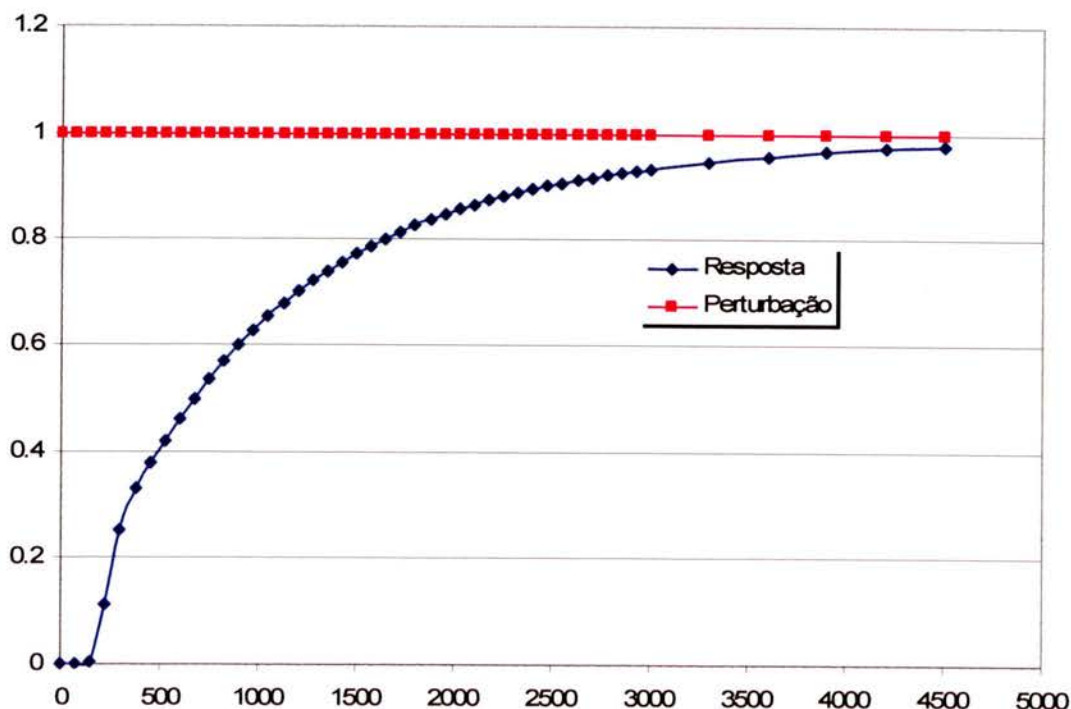


Figura 71. Gráfico em que se visualizar a curva F de Danckwerts a azul e o degrau unitário na concentração de um traçador (a cor-de-rosa)

$$F(t) = \frac{C(t)}{C_{\max}} \quad \text{e} \quad E(t) = \frac{dF}{dt}$$

### DTR

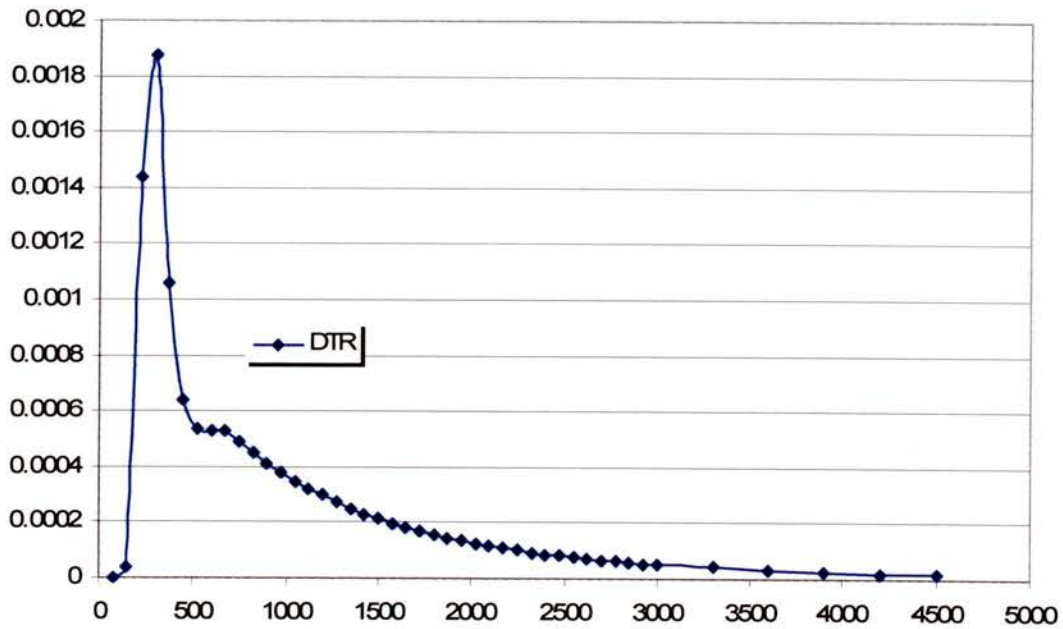


Figura 72. Curva de distribuição de tempos de residência (DTR)

O tempo de residência médio foi obtido por integração (referência bibliográfica [4]):

$$\bar{tr} = \int_0^{\infty} t \cdot E(t) dt = \int_0^{4500} t \cdot E(t) dt = 992.4 \text{ segundos}$$

O tempo de passagem por sua vez é dado por:

$$\tau = \frac{\text{Volume da sala}}{\text{caudal insuflado}} = \frac{97.85 \text{ m}^3}{82 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s}} \cong 1200 \text{ segundos}$$

O que corresponde a uma fracção de volume útil de:

$$\%V_{\text{útil}} = \frac{992.4}{1200} \cdot 100 = 82.8\%$$

Porém a análise destas três configurações não gera divergências suficientes para que se considere melhor qualquer uma das três. Como tal além de se introduzir progressivamente mais realismo ao modelo (ver simulação 4, por exemplo) tentou-se introduzir mais combinações entre insuflação e exaustão.

## Simulação 4 (alteração da simulação 1)

Nesta simulação introduziu-se uma perda de carga na exaustão da simulação 1, uma vez que na prática a área útil de sucção é inferior à área total do exaustor. Este facto gera uma perda de carga proporcional à carga cinética (pressão dinâmica). Por sua vez, essa constante de proporcionalidade adimensional é vulgarmente designada por coeficiente de perda de carga ( $k_L$ ).

$$\Delta p = k_L \frac{1}{2} \rho v^2$$

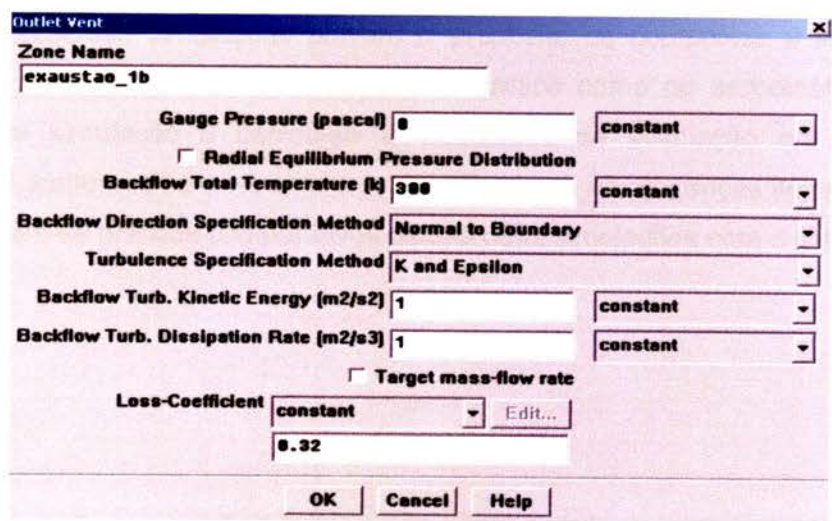


Figura 73. Ecrã Fluent da condição fronteira de *outlet vent*

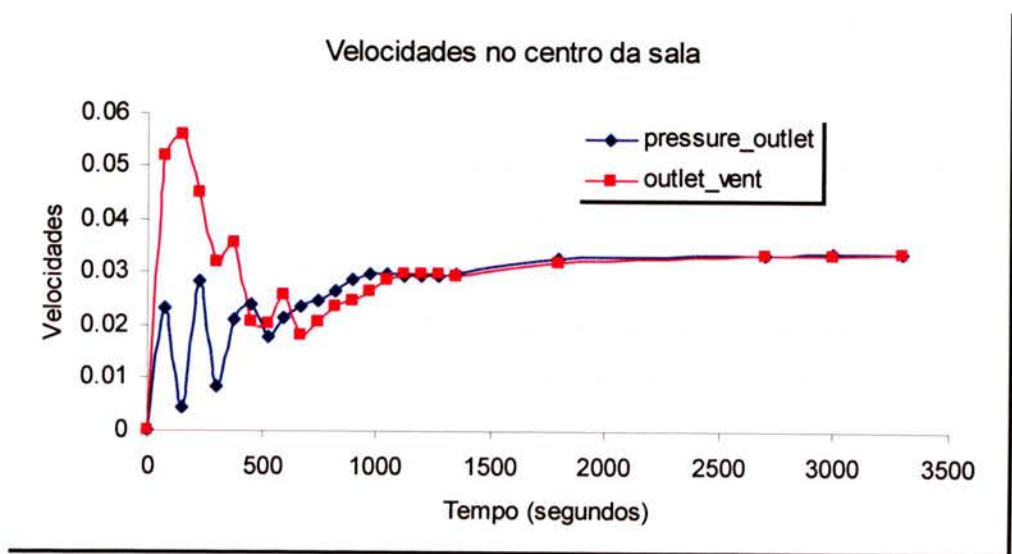


Figura 74. Gráfico comparativo da evolução das velocidades no centro da sala para duas condições fronteira diferentes

Qualitativamente pode-se constatar que em estado transiente, as velocidades no centro da sala são superiores se for introduzido um coeficiente de perda carga, sendo que a sua evolução é muito semelhante à situação em que se alterou a velocidade de insuflação para 0.23 m/s (10% acima da simulação 1 – ver gráfico da figura 76).

## Simulação 5 e 6 (alteração da simulação 1)

As presentes simulações servem o propósito de comprovar a influência da velocidade de insuflação tanto no equilíbrio térmico como no aerodinâmico. Neste contexto, na simulação 5 baixou-se a velocidade de insuflação em 10% e na simulação 6 aumentou-se a mesma em 10%. Para que as diferenças sejam evidentes estabeleceram-se gráficos comparativos destas duas simulações com a simulação 1.

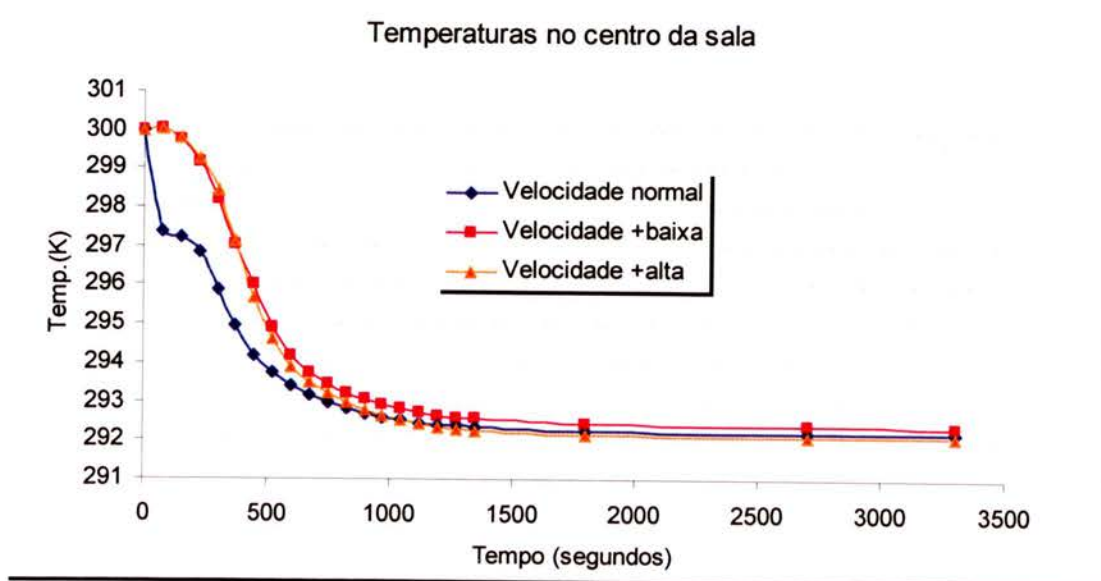


Figura 75. Evolução temporal das temperaturas no centro da sala para três velocidades distintas

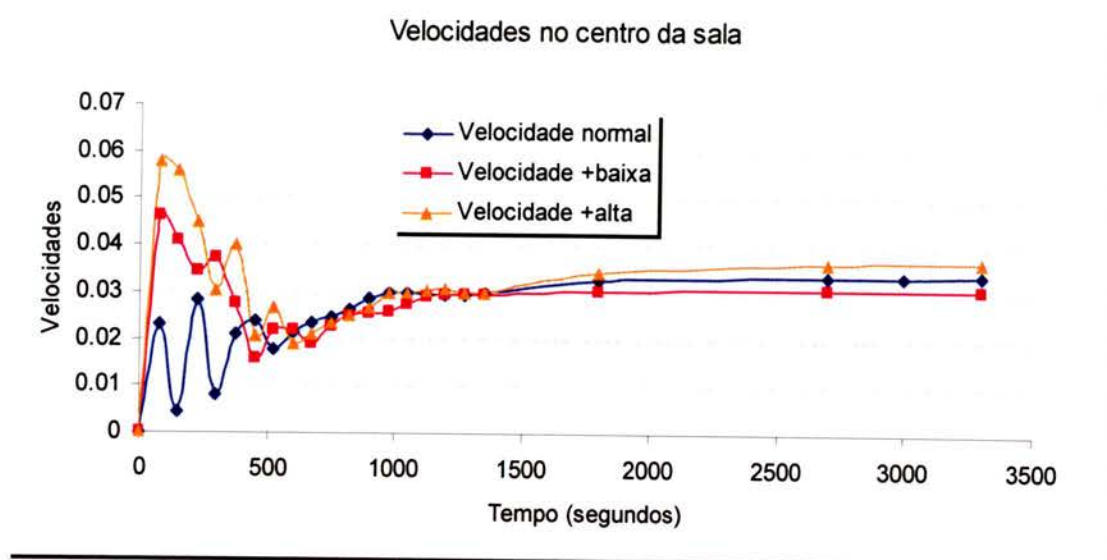


Figura 76. Gráfico comparativo velocidades num ponto central da sala para três velocidades de insuflação distintas

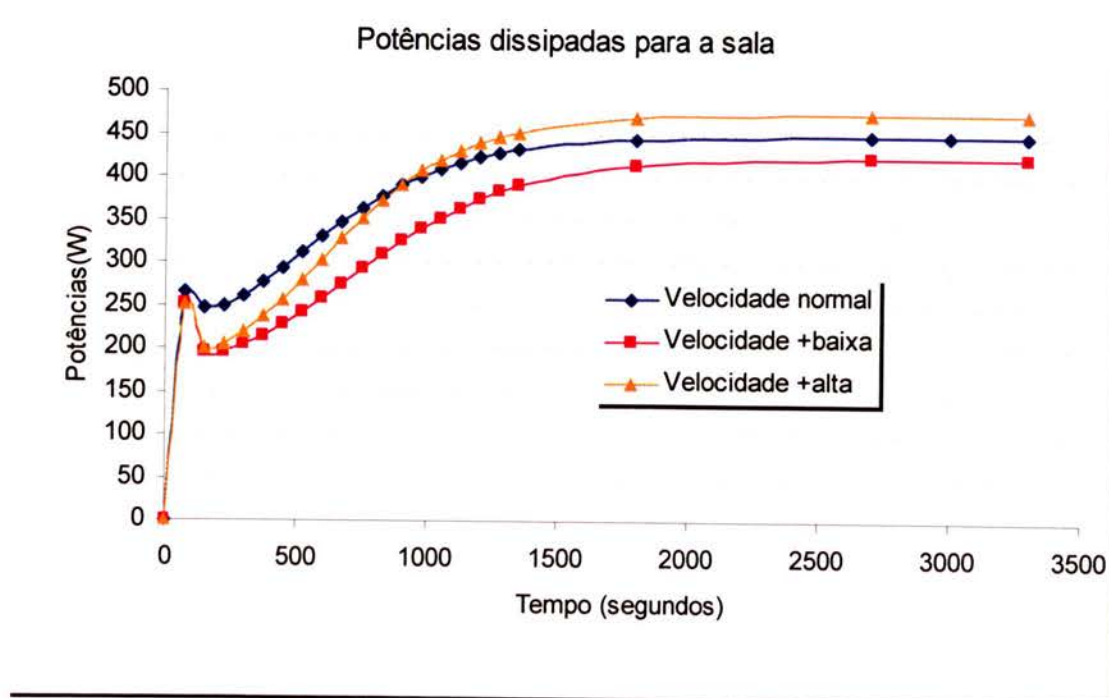


Figura 77. Gráfico comparativo das potências dissipadas para sala ao longo do tempo para três magnitudes de velocidade do ar distintas

Com o aumento das velocidades de insuflação, o coeficiente convectivo do ar junto às paredes aumenta pelo que as potências dissipadas para a sala são maiores

(diminuição da resistência à transferência de calor). Porém as velocidades no centro também são proporcionalmente maiores o que causa uma diminuição da temperatura no centro da sala.

Com efeito embora o arrefecimento seja efectivo o aumento das velocidades pode afectar os parâmetros de conforto, que não foram abordados nestas simulações.

Em seguida apresentam-se possíveis relações lineares que surgiram da comparação entre as três simulações (simulação 5, 6 e 1) – ver figuras 78 e 79.

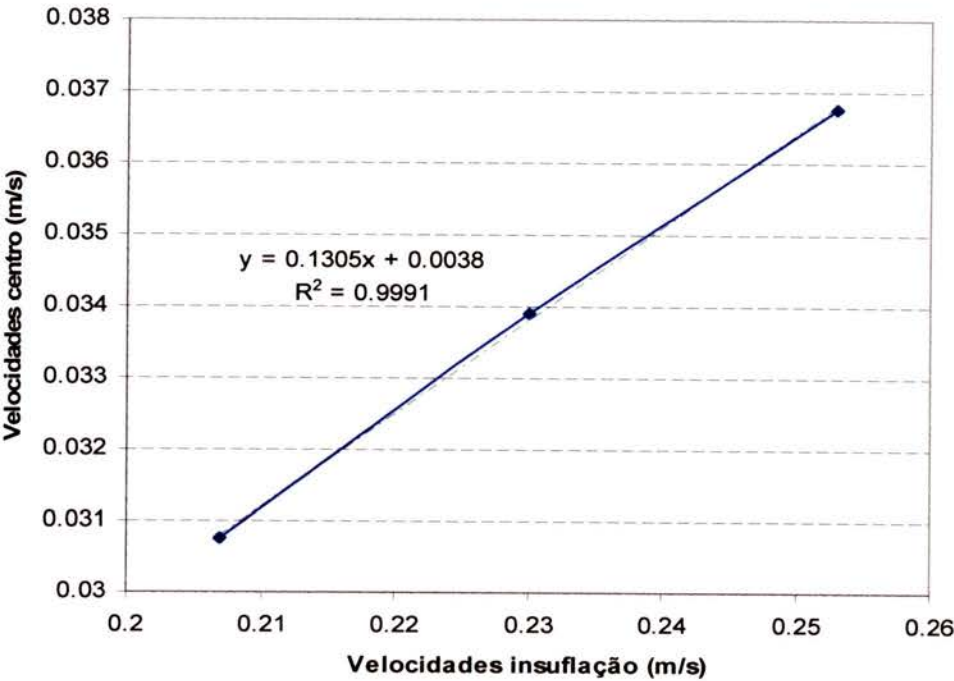


Figura 78. Gráfico que apresenta a variação das velocidades no centro da sala com as velocidades de insuflação

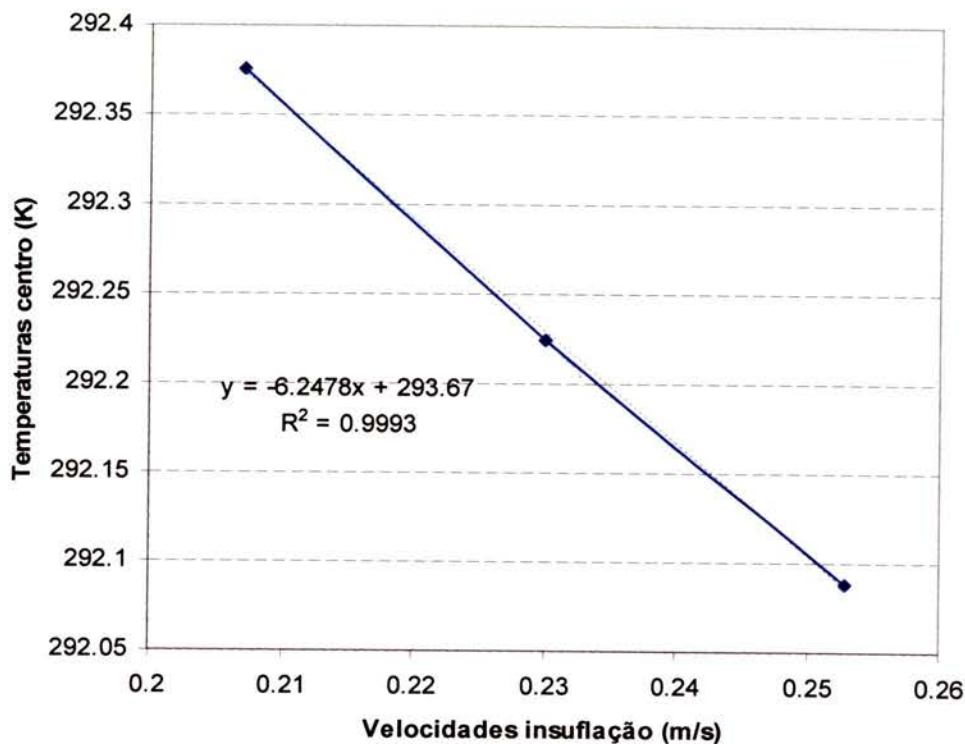
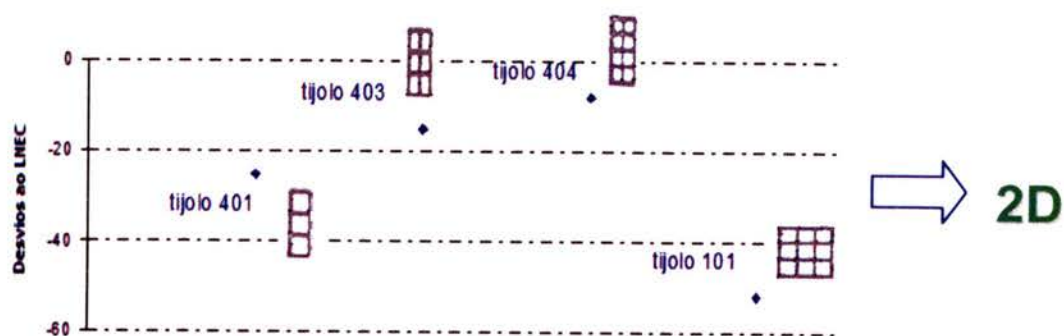


Figura 79. Gráfico que apresenta a variação das temperaturas no centro da sala com as velocidades de insuflação

## Resumo e conclusões

### 1ª parte

- As simulações tridimensionais apresentam resultados mais próximos dos publicados pelo LNEC (desvios inferiores a 10%, exceptuando o caso do tijolo 401) – ver figura 80.



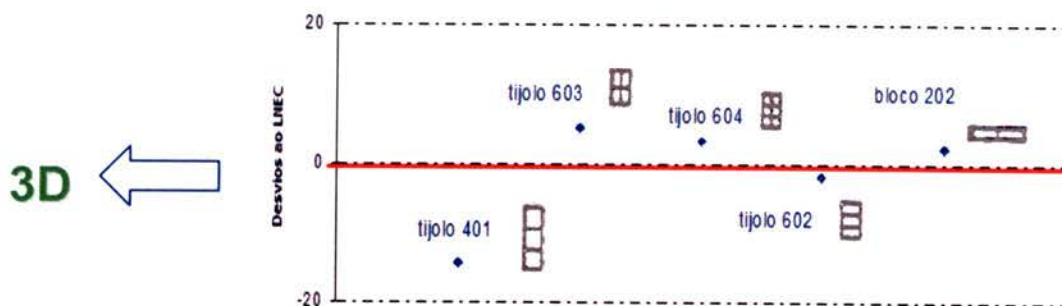


Figura 80. Variações dos resultados de todas as simulações patentes na primeira parte do presente relatório em relação aos valores tabelados pelo LNEC.

- É correcto estimar uma condutividade térmica com base no coeficiente global da parede.
- Aparentemente não existe nenhuma relação entre os desvios e a quantidade de ar em cada parede (geometria).
- Existe uma correlação entre o valor do coeficiente global e o gradiente térmico (sendo este omitido pelo LNEC – ver referências [1] e [2]).

## 2ª parte

- Não ficou estipulado no presente relatório uma forma correcta de estimar a capacidade calorífica de um material “pseudo-homogéneo”, mas sabe-se que a capacidade calorífica não é a única propriedade que afecta o atraso da parede.

## 3ª parte

- As primeiras três configurações validam-se pelo manual REHVA sobre “Ventilação por deslocamento” porque possuem valores típicos de potências, gradientes térmicos e velocidades. As simulações paramétricas realizadas posteriormente vieram trazer alguma consistência aos resultados obtidos.

## Recomendações futuras

### 1ª parte

- Investigar as considerações subjacentes aos cálculos do LNEC, pois não se revelam explícitas.

### 2ª parte

- Resolver analiticamente a 2ª Lei de Fourier para validar o tempo que o calor leva a estabilizar na parede isolada.

### 3ª parte

- Avaliar a eficácia na remoção de contaminantes do ar de um recinto fechado por parte de um sistema de ventilação por deslocamento.

## Bibliografia

1. "Caracterização Térmica de paredes de Alvenaria", LNEC, Lisboa (1986), Carlos A. Pina dos Santos e José A. Vasconcelos de Paiva
2. "Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios", C.A. Pina dos Santos e José A. Vasconcelos de Paiva, Lisboa (1990)
3. Manual REHVA "Ventilação por deslocamento em espaços não industriais", Elisabeth Mundt, Lisboa (2004)
4. *Chemical Reaction Engineering*, Levenspiel, Third Edition, Wiley



FACULDADE DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000105301