

ANÁLISE DE UM SISTEMA DE VEDAÇÃO TÉRMICA POR CORTINA DE AR

Luís P. C. Neto ⁽¹⁾

M. C. Gameiro da Silva ⁽²⁾



- * Departamento de Engenharia Industrial
Escola Superior de Tecnologia
Instituto Politécnico de Castelo Branco

luisneto@est.ipcb.pt



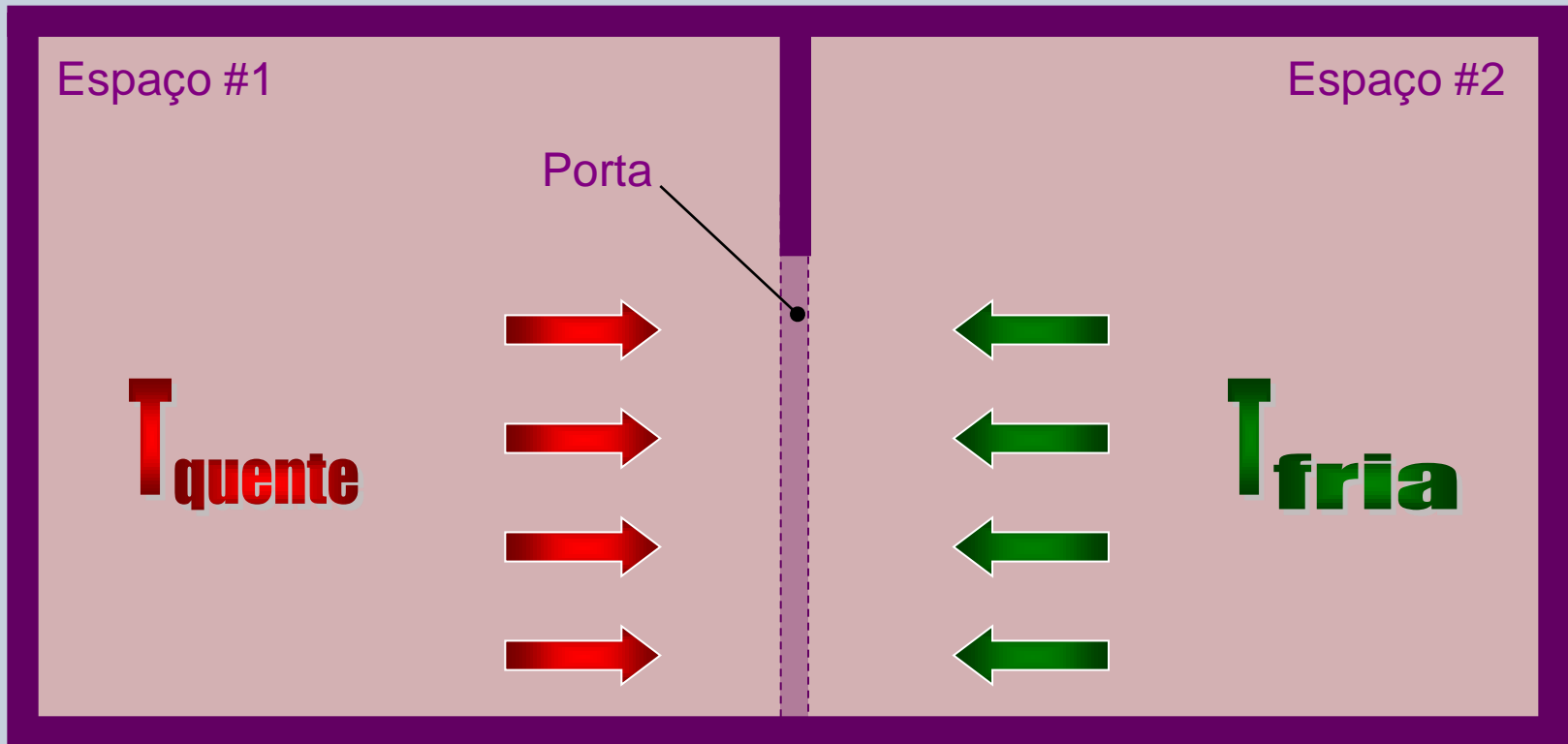
- ** Departamento de Engenharia Mecânica
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade de Coimbra

manuel.gameiro@dem.uc.pt

1.

INTRODUÇÃO

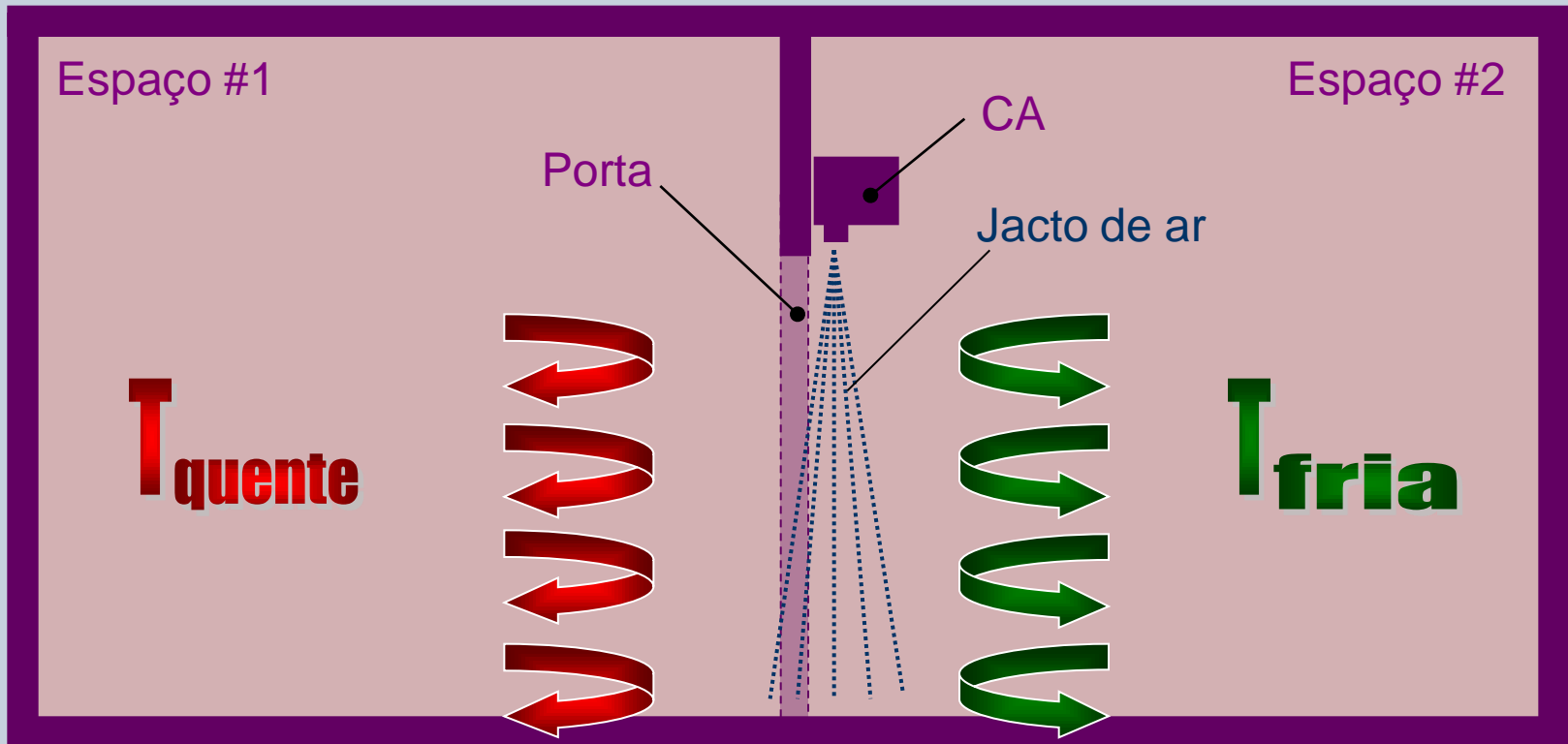
As "Cortinas de Ar" são aplicadas onde houver necessidade de reduzir a circulação de ar entre dois espaços que, por razões operacionais, não possam ser vedados por uma porta sólida.



1.

INTRODUÇÃO

As "Cortinas de Ar" são aplicadas onde houver necessidade de reduzir a circulação de ar entre dois espaços que, por razões operacionais, não possam ser vedados por uma porta sólida.



2.

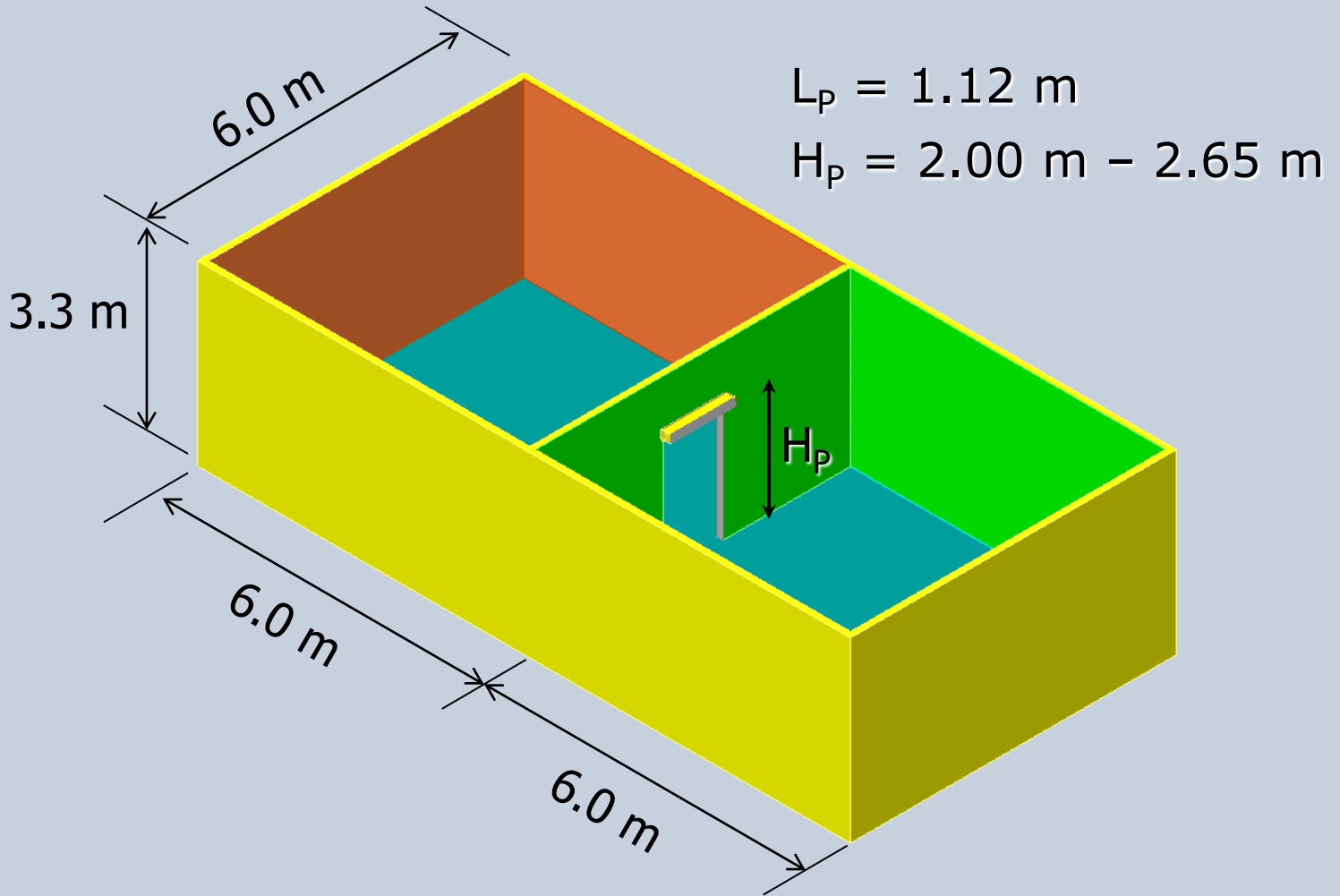
OBJECTIVOS & FASES

- **Estudo experimental** do escoamento originado por um aparelho de cortina de ar de **jacto plano descendente, não-recirculado**, como meio de **vedação térmica** entre dois espaços a diferentes temperaturas:
 - **Identificar os parâmetros** que afectam a eficiência das cortinas de ar;
 - **Analisar o seu funcionamento**, tanto em condições de regime permanente, como em regime transitório;
 - **Estabelecer procedimentos** de montagem e de operação dos aparelhos de cortina de ar;
- **Levantamento condições de instalação** e de operação dos aparelhos de cortina de ar como meio de vedação térmica de espaços comerciais.

3.

INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

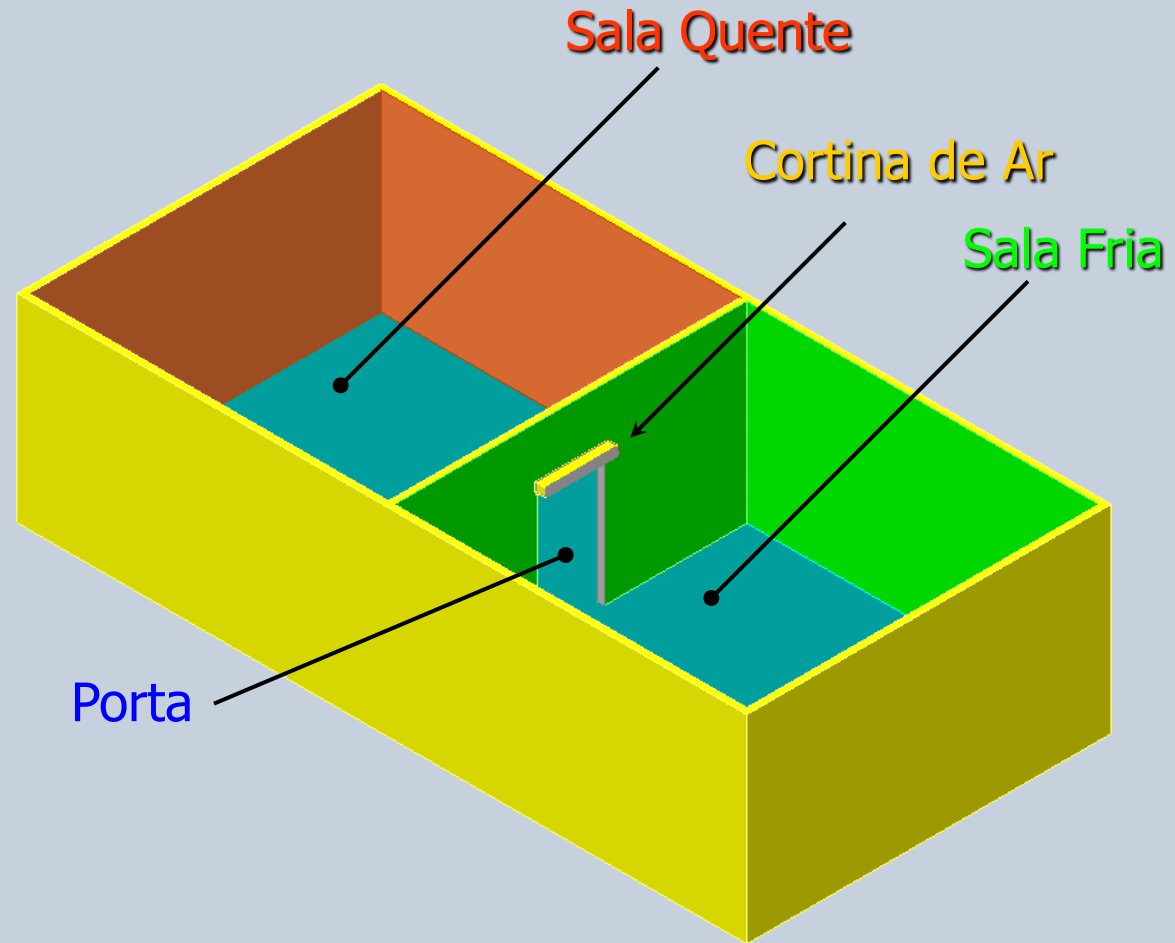
3.1 – Geometria das salas



3.

INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

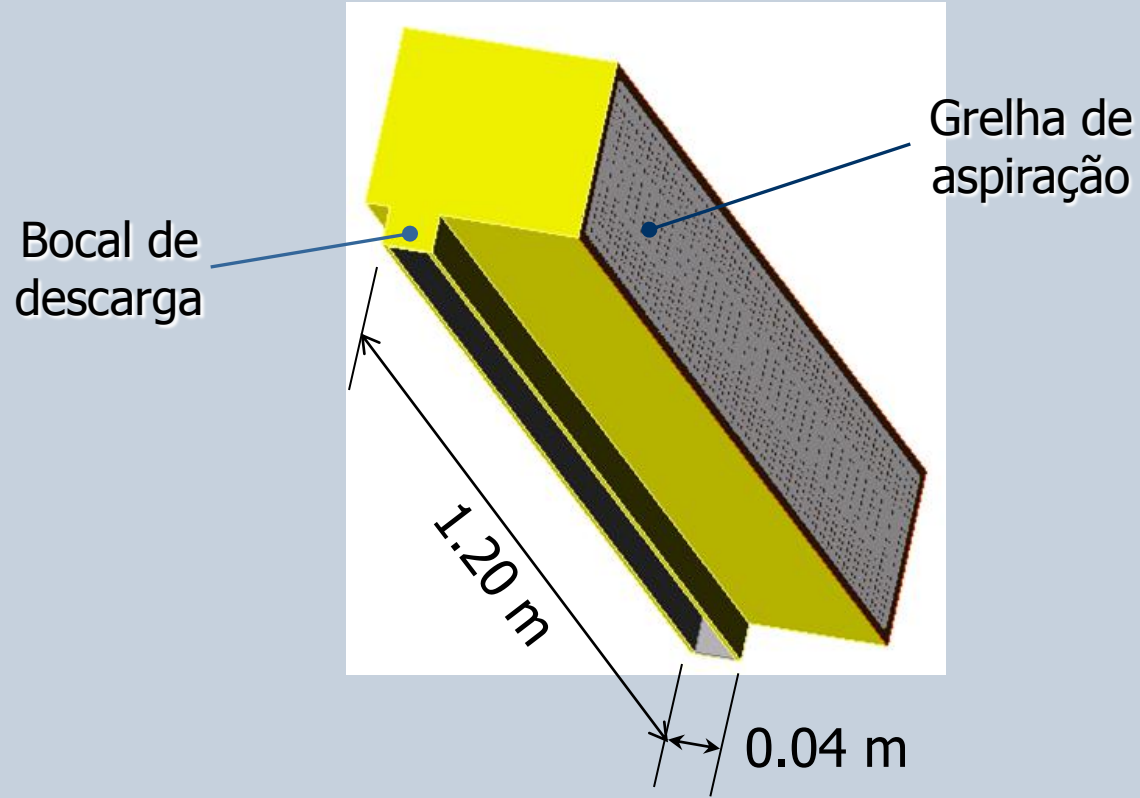
3.1 – Geometria das salas



3.

INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

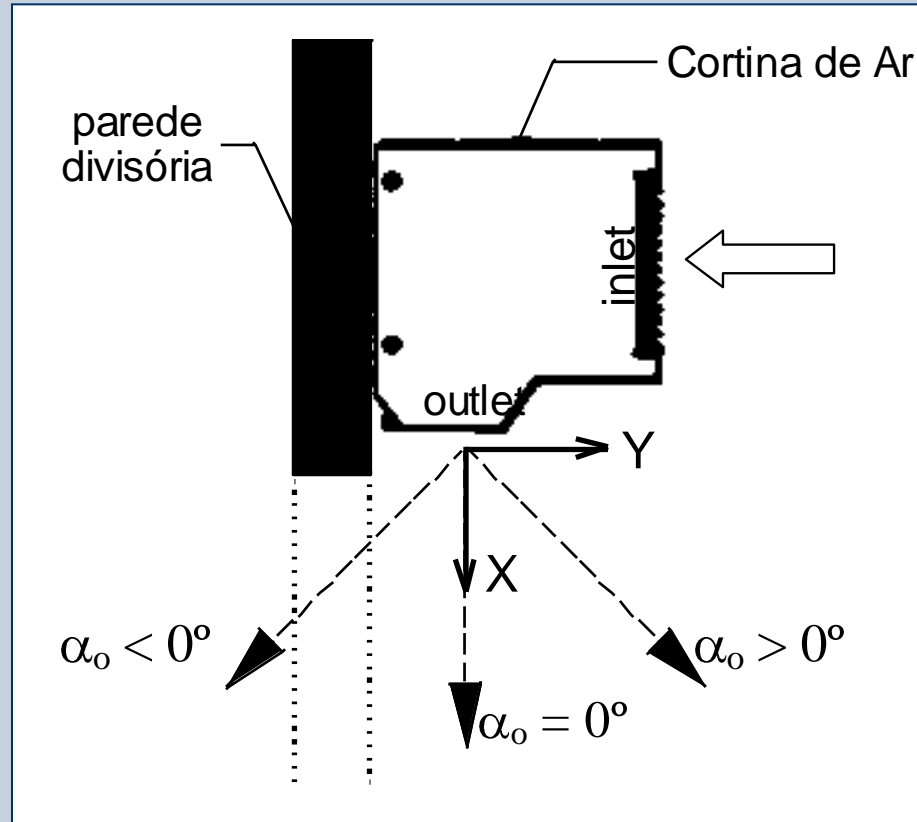
3.2 – Geometria da cortina de ar



3.

INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

3.3 – Convenção de eixos e ângulos



3.

INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

3.4 – Principais parâmetros

- ▶ U_o 0 m/s – 7.8 m/s N000 – N100
- ▶ H_{Porta} 2.10 m, 2.25 m, 2.40 m, 2.65 m
- ▶ $H_{Cortina}$ 2.10 m, 2.25 m, 2.40 m, 2.65 m
- ▶ α_o -20°, -10°, 0°, +10°, +15°, +20°
- ▶ ΔT -10 °C, 0 °C, +5 °C, +10 °C, +15 °C
- ▶ Conf AVAC (20/25, 20/30, 20/35)
ISOT (20/20)

Várias técnicas experimentais diferentes, mas complementares entre si, foram utilizadas neste trabalho:

- Termo-anemómetros de baixa velocidade
 - ▶ Levantamento dos campos de velocidade e de temperatura do ar na vizinhança da porta
 - ▶ Detecção dos pontos de impacto do jacto no solo
- Termografia por infravermelhos
 - ▶ Visualização da distribuição de temperaturas e movimento de massas de ar através da porta
- Gases traçadores
 - ▶ Obtenção de informação sobre a forma como se dão as trocas de ar entre os dois compartimentos

4.

METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS

4.1 – Técnica de “Point Measuring”



“Rack” de termocanómetros

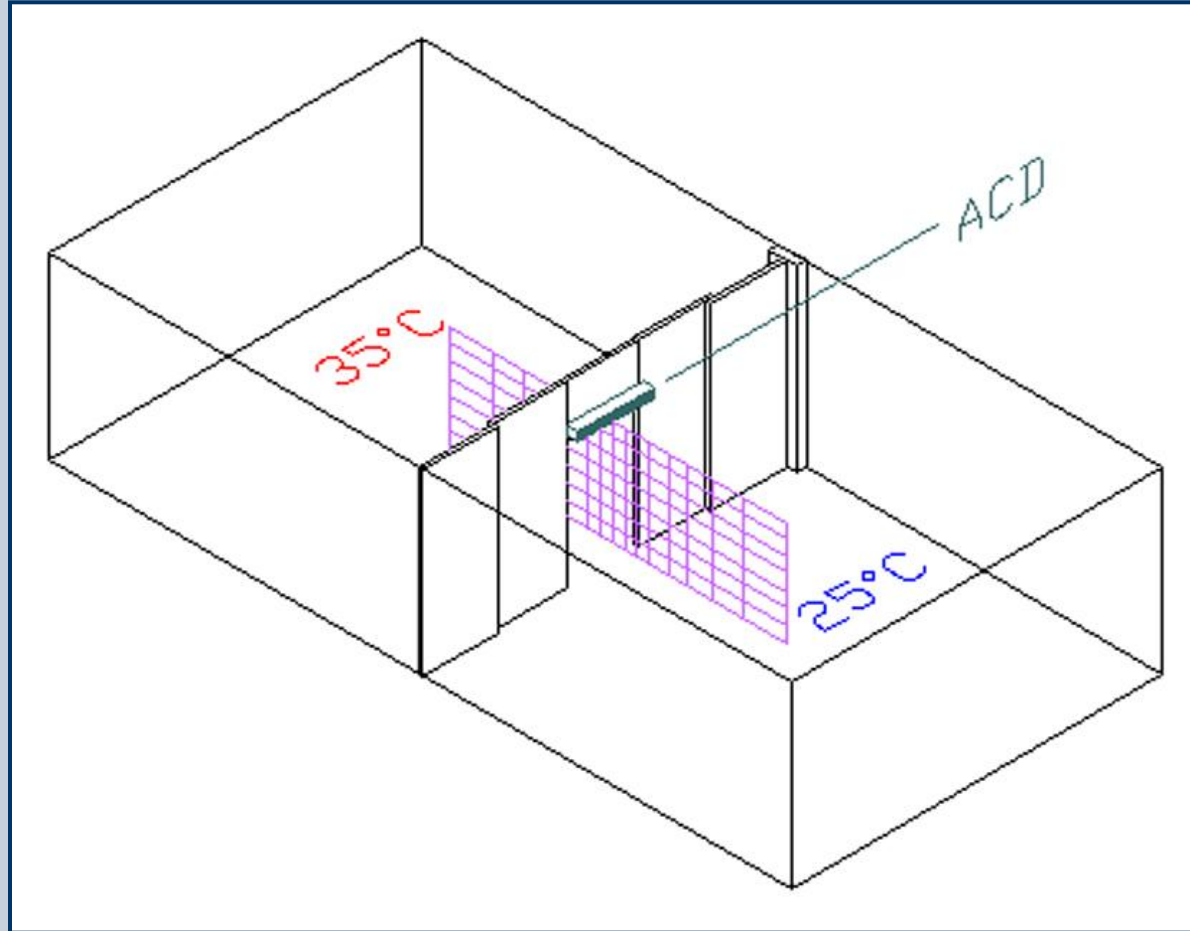
➡ **16** termocanómetros medindo simultaneamente velocidade e temperatura do ar:

- ⊕ 0.05 a 5.0 m/s
(0.0012 m/s)
- ⊕ 0 a 50 °C
(0.012 °C)

4.

METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS

4.1 – Técnica de “Point Measuring”

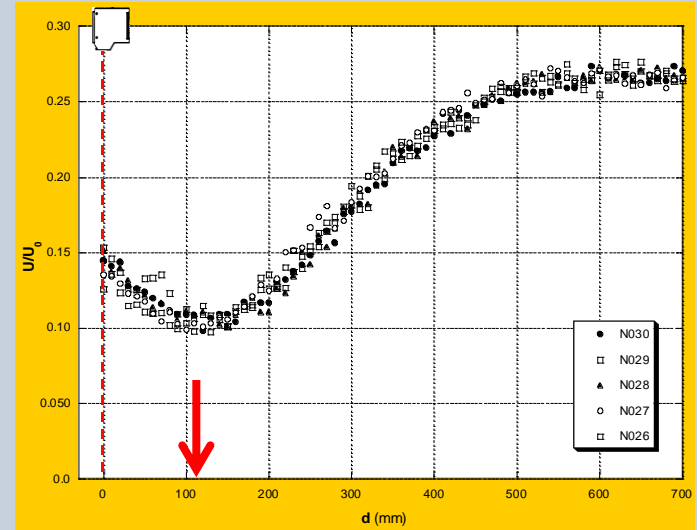
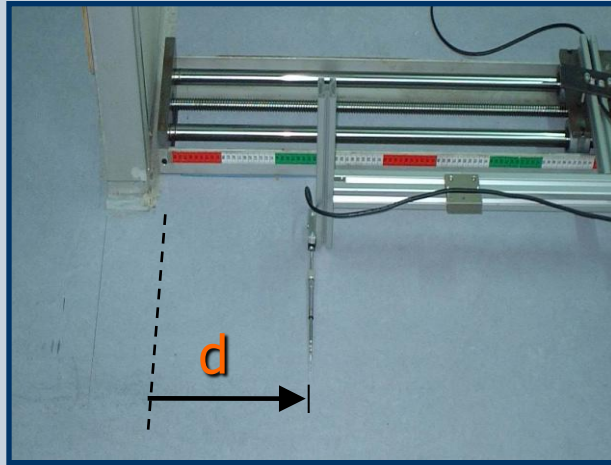


4.

METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS

4.2 – Detecção dos pontos de impacto no solo

10 mm

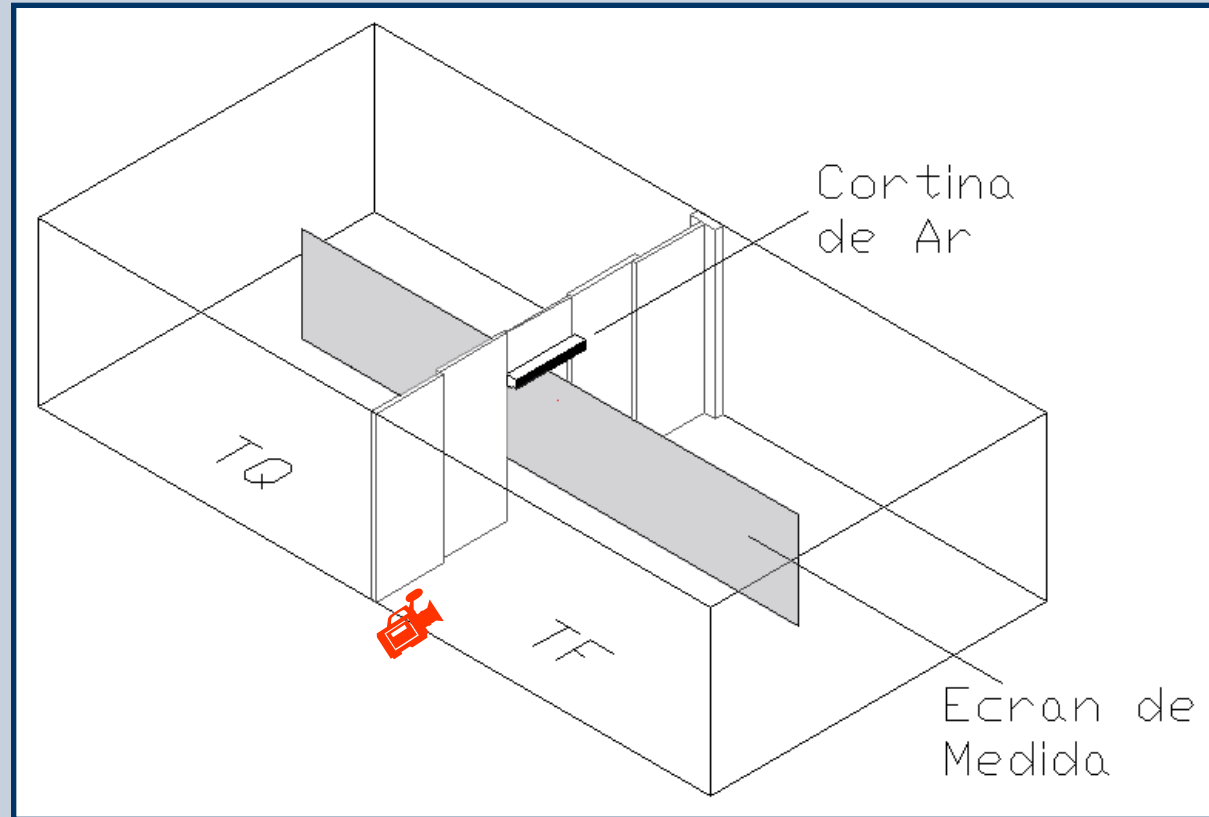


d

4.

METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS

4.3 – Técnica de “Whole Field”



- ▶ Câmara termográfica por infravermelhos
- ▶ Folha de papel cenário (baixa massa térmica)

4.

METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS

4.3 – Técnica de “Whole Field”

- Câmara de infravermelhos com 320×240 pixéis de resolução:
 - ⊕ $-20 - 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ($< 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$)
 - ⊕ Lente de 40° @ 4m:
 - FOV: $2.9 \text{ m} \times 2.2 \text{ m}$
 - I FOV: $9 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$
- Folha de papel de cenário com $3 \text{ m} \times 2 \text{ m}$
- “Marcadores” de posição



Imagem fotográfica

4.

METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS

4.3 – Técnica de “Whole Field”

- Câmara de infravermelhos com 320×240 pixéis de resolução:
 - ⊕ $-20 - 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ($< 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$)
 - ⊕ Lente de 40° @ 4m:
 - FOV: $2.9 \text{ m} \times 2.2 \text{ m}$
 - I FOV: $9 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$
- Folha de papel de cenário com $3 \text{ m} \times 2 \text{ m}$
- “Marcadores” de posição

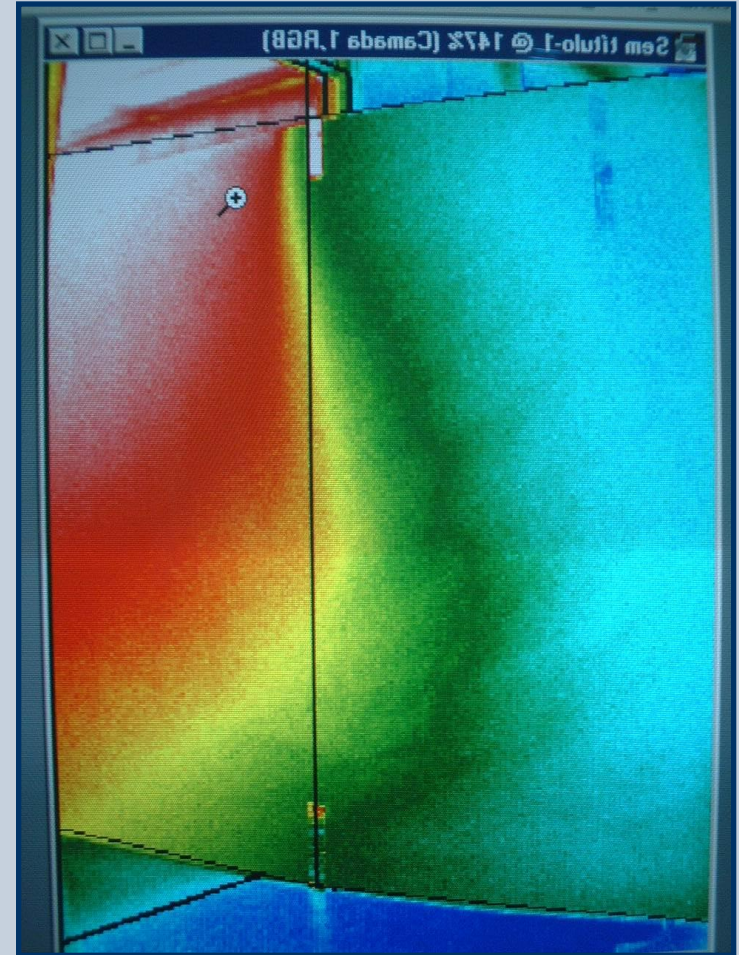
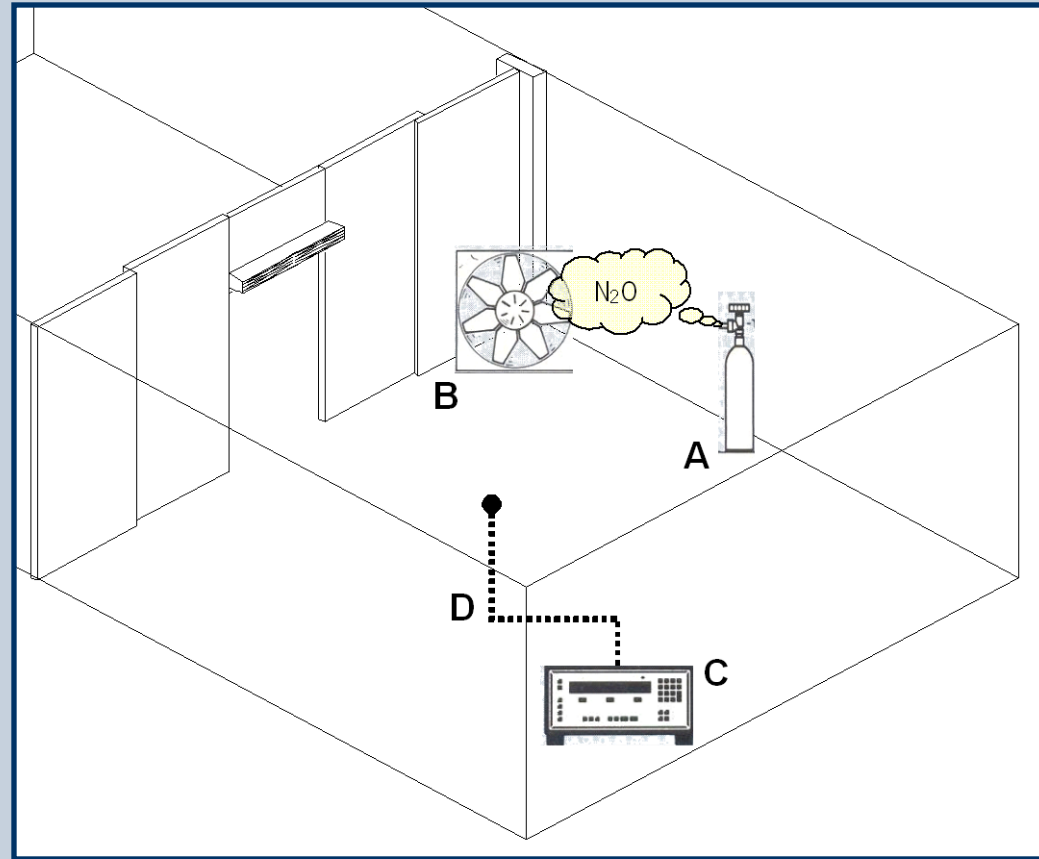


Imagem termográfica

4.

METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS

4.4 – Gases Traçadores

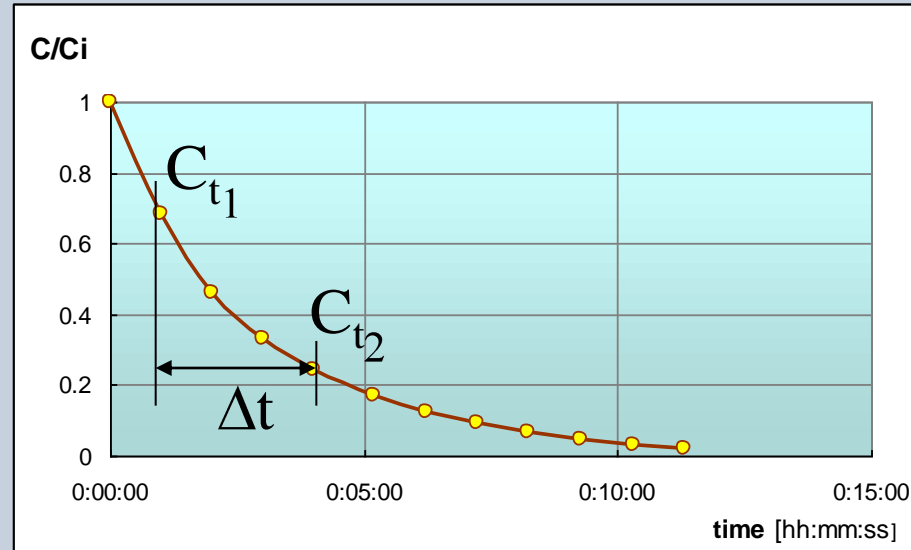


- Método da Concentração Decrescente
 - **Protóxido de Azoto** (N_2O) utilizado como gás traçador
 - **Aparelho analisador de gases** através de espectroscopia foto-acústica de radiação infra-vermelha

4.

METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS

4.4 – Gases Traçadores (método da concentração decrescente)



**Taxa de
renovação do ar
[h⁻¹]**

$$n = \frac{\ln C_{t+1}/C_i - \ln C_t/C_i}{\Delta t}$$

**Rendimento
da vedação
[-]**

$$\eta_v = \frac{n_0 - n_j}{n_0}$$

**Eficácia
da vedação
[-]**

$$E_v = \frac{1}{1 - \eta_v}$$

C – Concentração de gás traçador

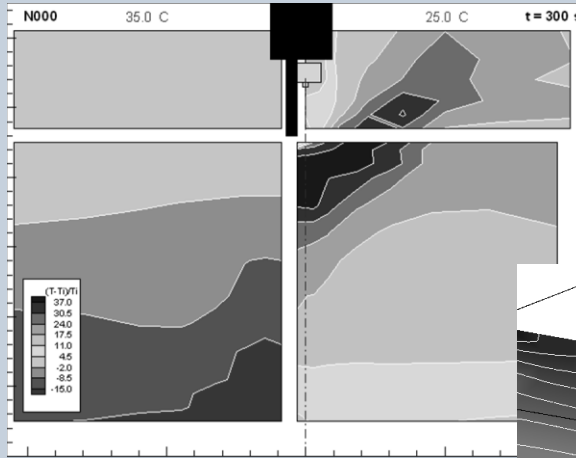
Subscrito 0 – caso de referência (cortina desligada)

5.

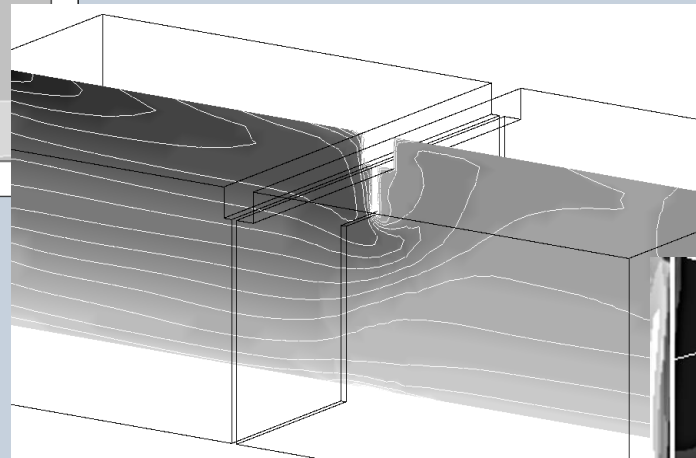
RESULTADOS OBTIDOS

5.1 – Caso de referência

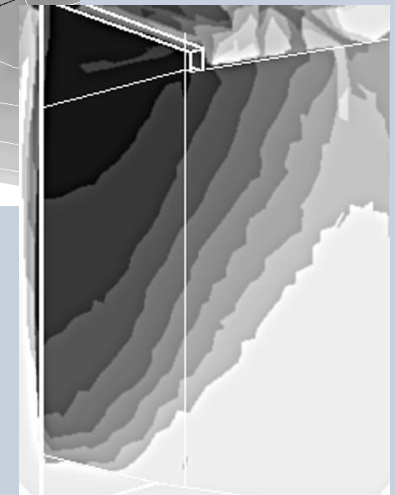
$$H_p = 2.25 \text{ m}, U_0 = 0.0 \text{ m/s}, \Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$$



Mapeamento com sondas



Simulação numérica 3D



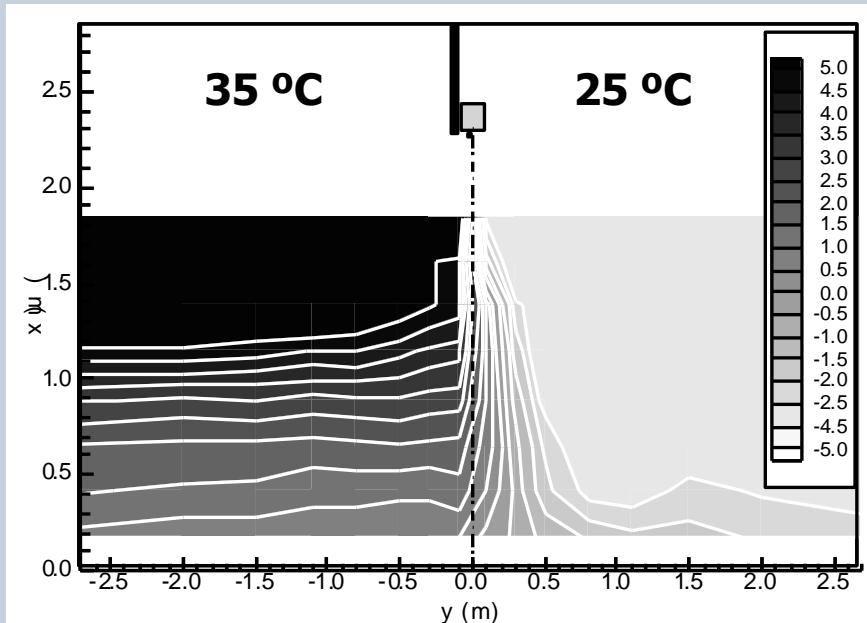
Mapeamento com infravermelhos

5.

RESULTADOS OBTIDOS

5.2 – Deflexão inicial do jacto

$H_p = 2.10 \text{ m}$, $U_0 \approx 5.0 \text{ m/s}$, $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$



Mapeamento com sondas

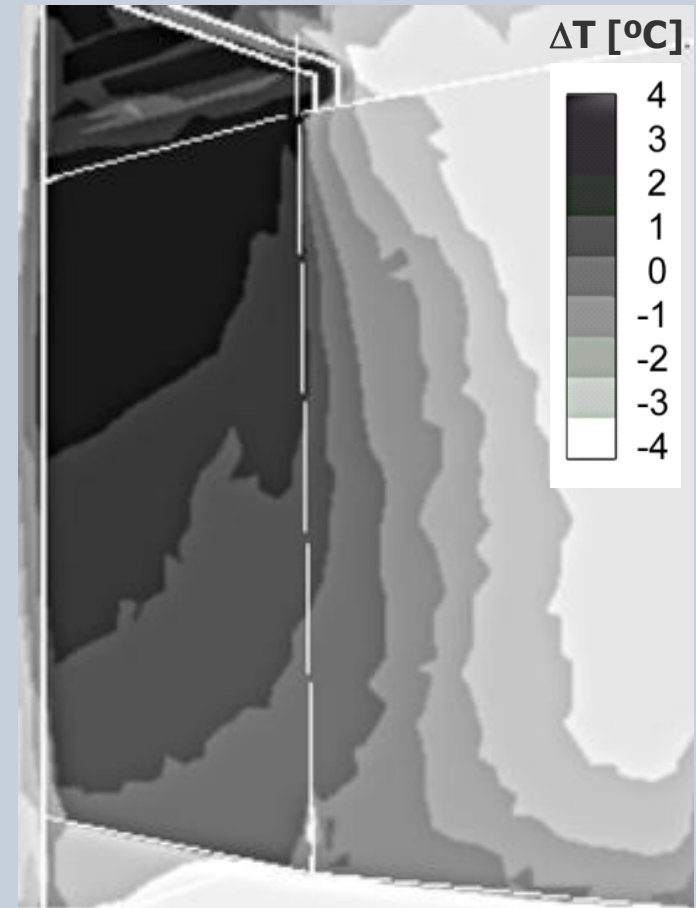
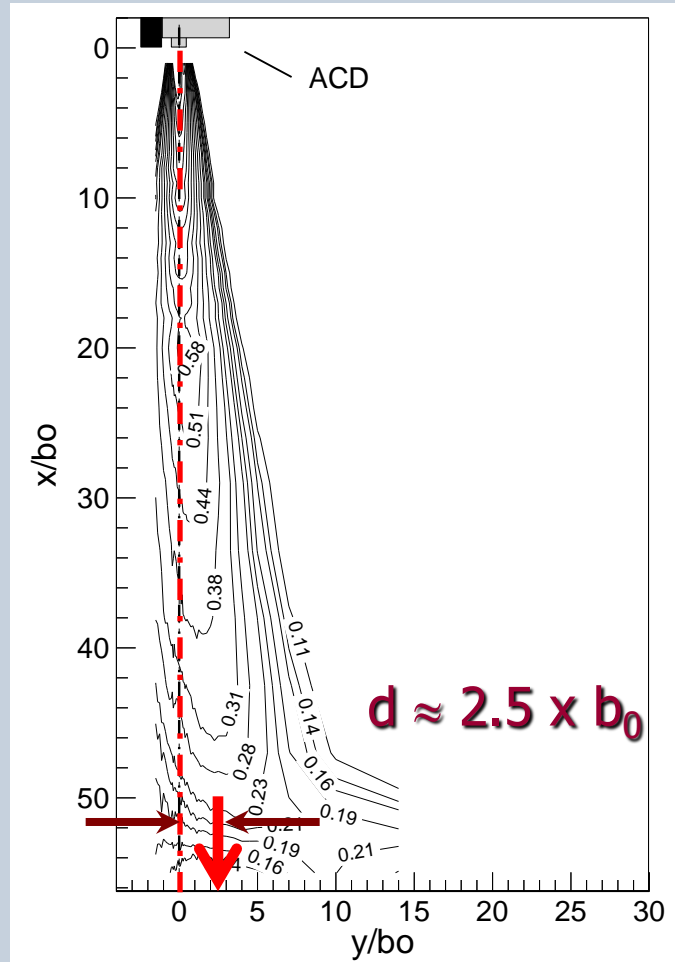


Imagem de infravermelhos

5.

RESULTADOS OBTIDOS

5.2 – Deflexão inicial do jacto $H_p = 2.10 \text{ m}$, $U_0 \approx 5.0 \text{ m/s}$, $\alpha_0 = 0^\circ$, $\Delta T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$



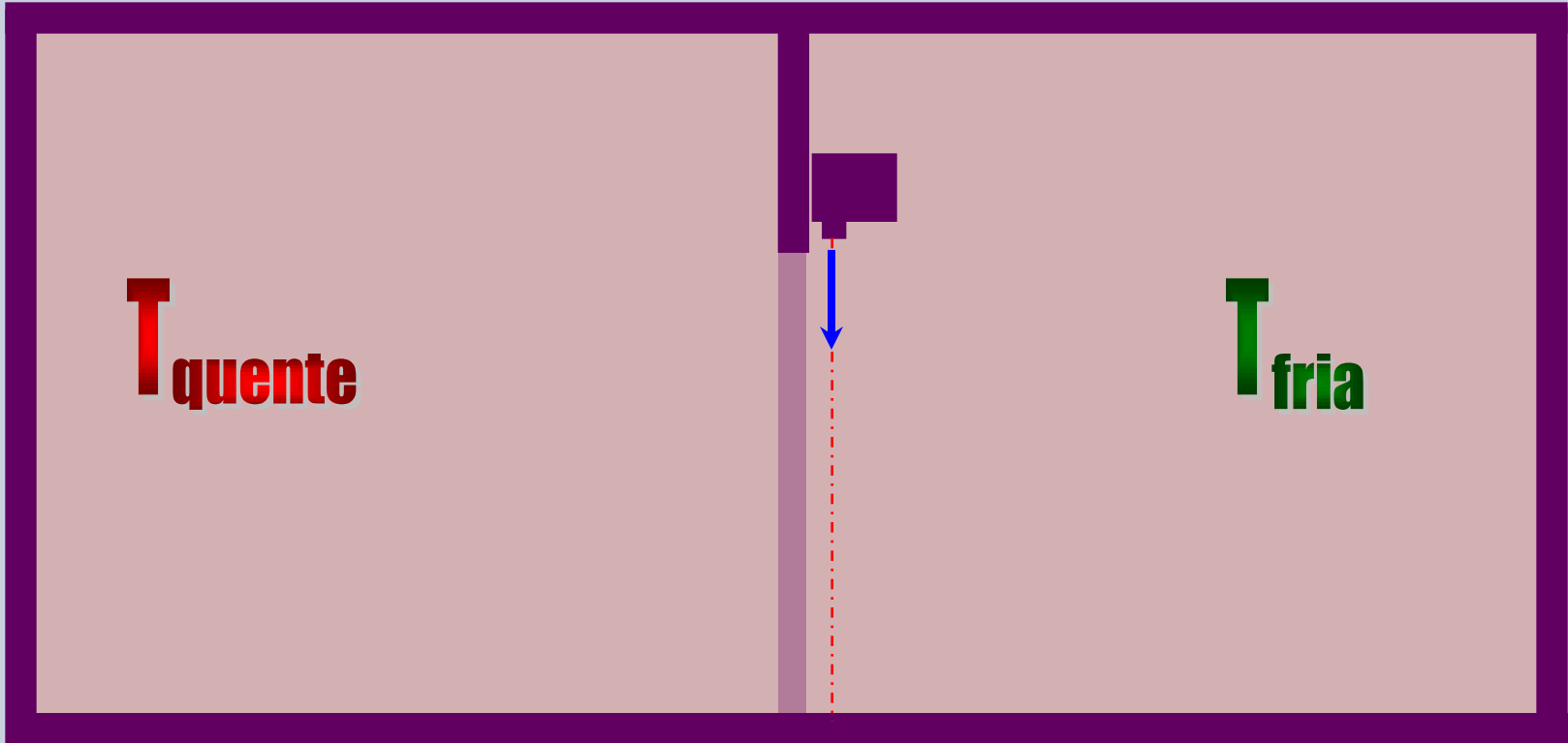
Iso-contornos de U/U_0 para um escoamento isotérmico

5.

RESULTADOS OBTIDOS

5.3 – Compensação da deflexão natural do jacto, α_0

$$\alpha_0 = 0^\circ$$

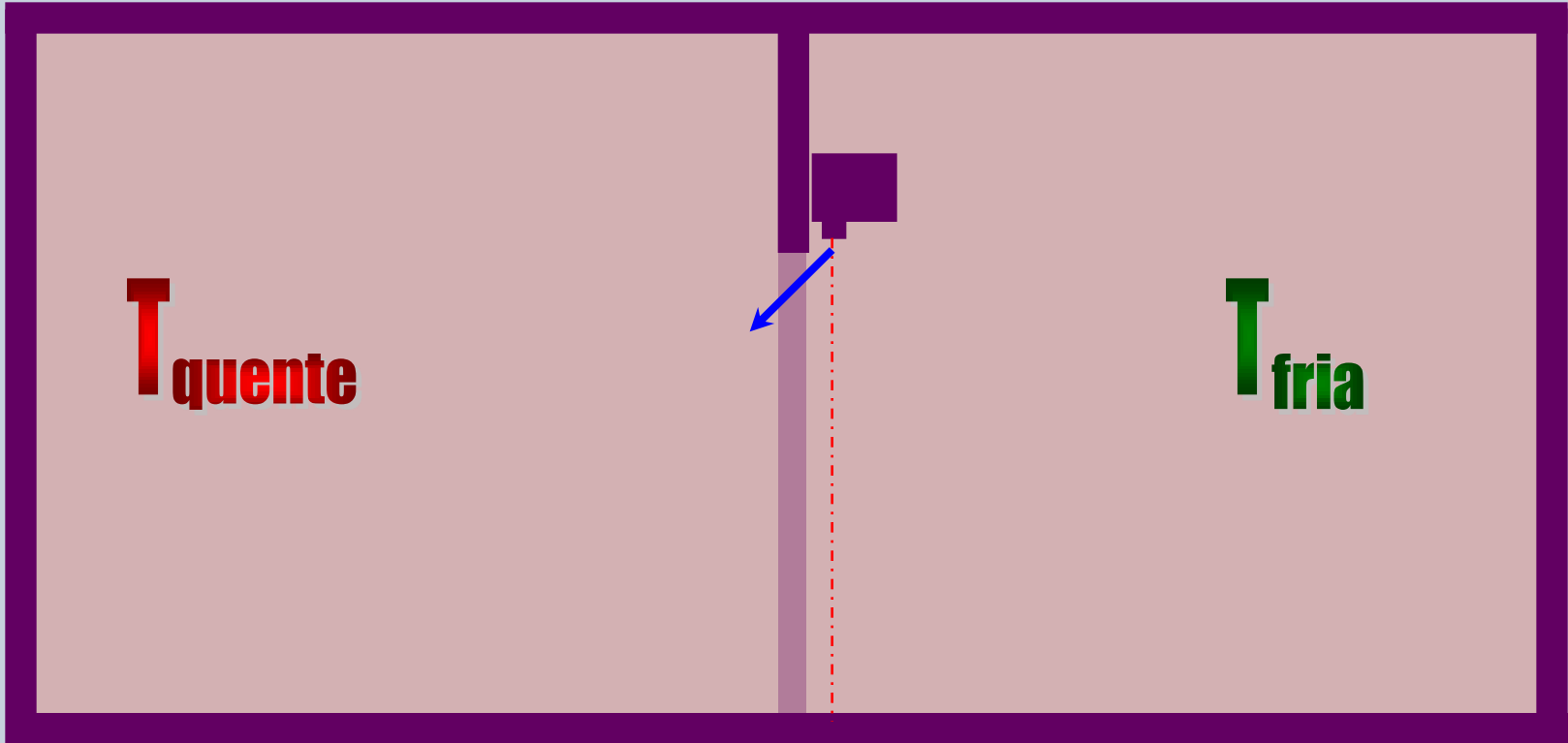


5.

RESULTADOS OBTIDOS

5.3 – Compensação da deflexão natural do jacto, α_0

$$\alpha_0 < 0^\circ$$

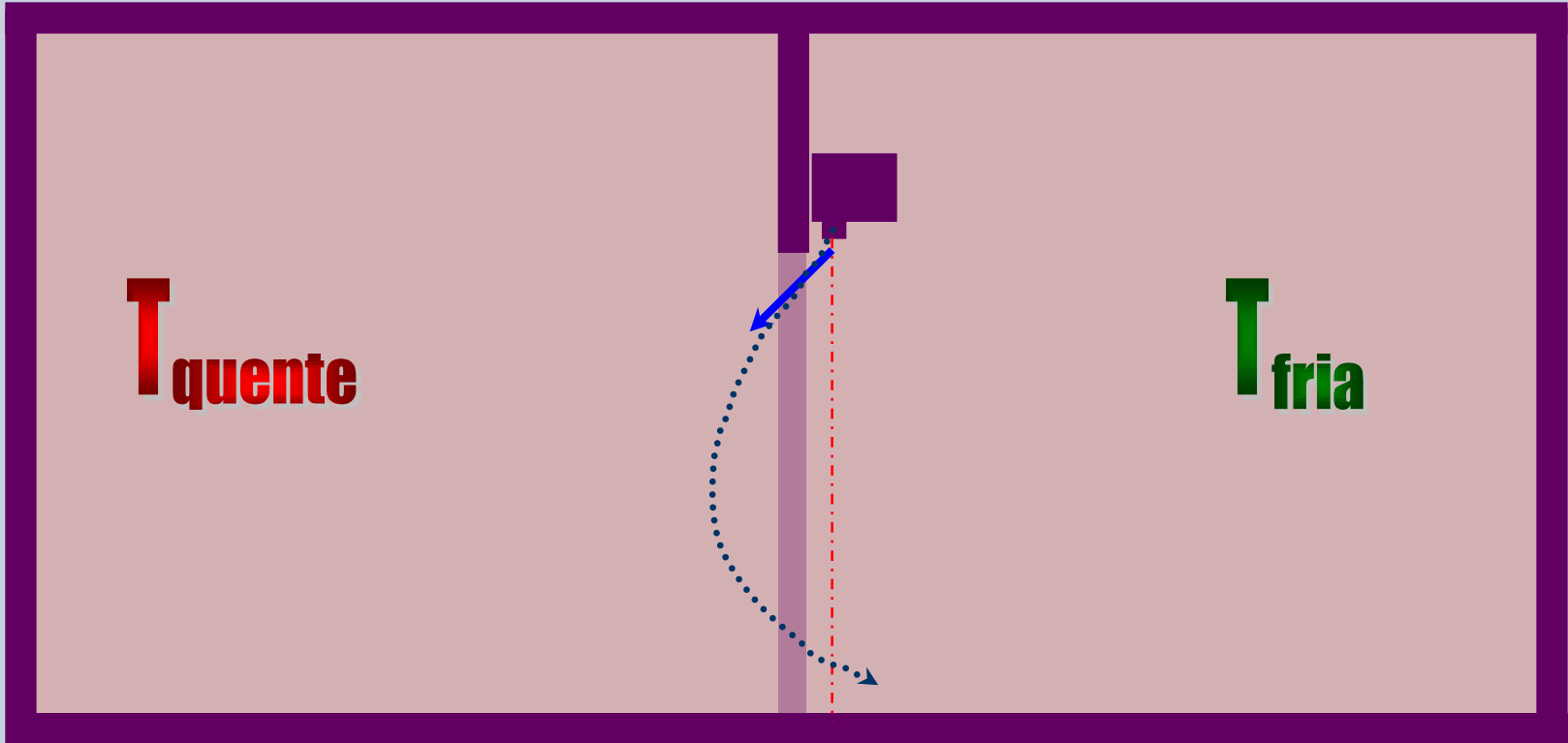


5.

RESULTADOS OBTIDOS

5.3 – Compensação da deflexão natural do jacto, α_0

$$\alpha_0 < 0^\circ$$



5.

RESULTADOS OBTIDOS

5.4 – Velocidade inicial do jacto, U_0

$H_p = 2.10 \text{ m}$, $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta t = 5 \text{ min.}$



3.4 m/s

Insuficiência de U_0 :

- ➔ “Quebra” do jacto
- ➔ Ausência de efeito de vedação
- ➔ Taxa de renovação do ar na sala “fria” 25% superior à verificada para a situação em que $U_0 = 0$!

5.

RESULTADOS OBTIDOS

5.4 – Velocidade inicial do jacto, U_0

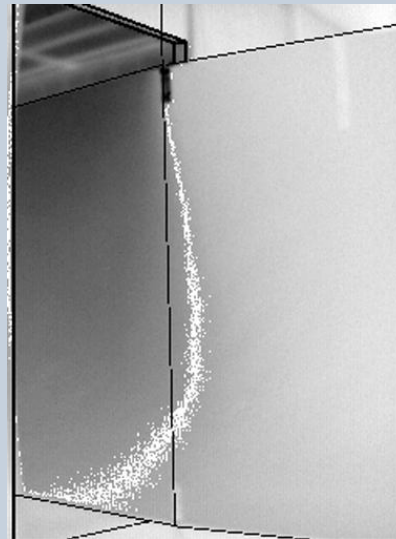
$H_p = 2.10 \text{ m}$, $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta t = 5 \text{ min.}$



3.4 m/s



5.1 m/s



6.5 m/s



8.0 m/s



Insuficiência de U_0



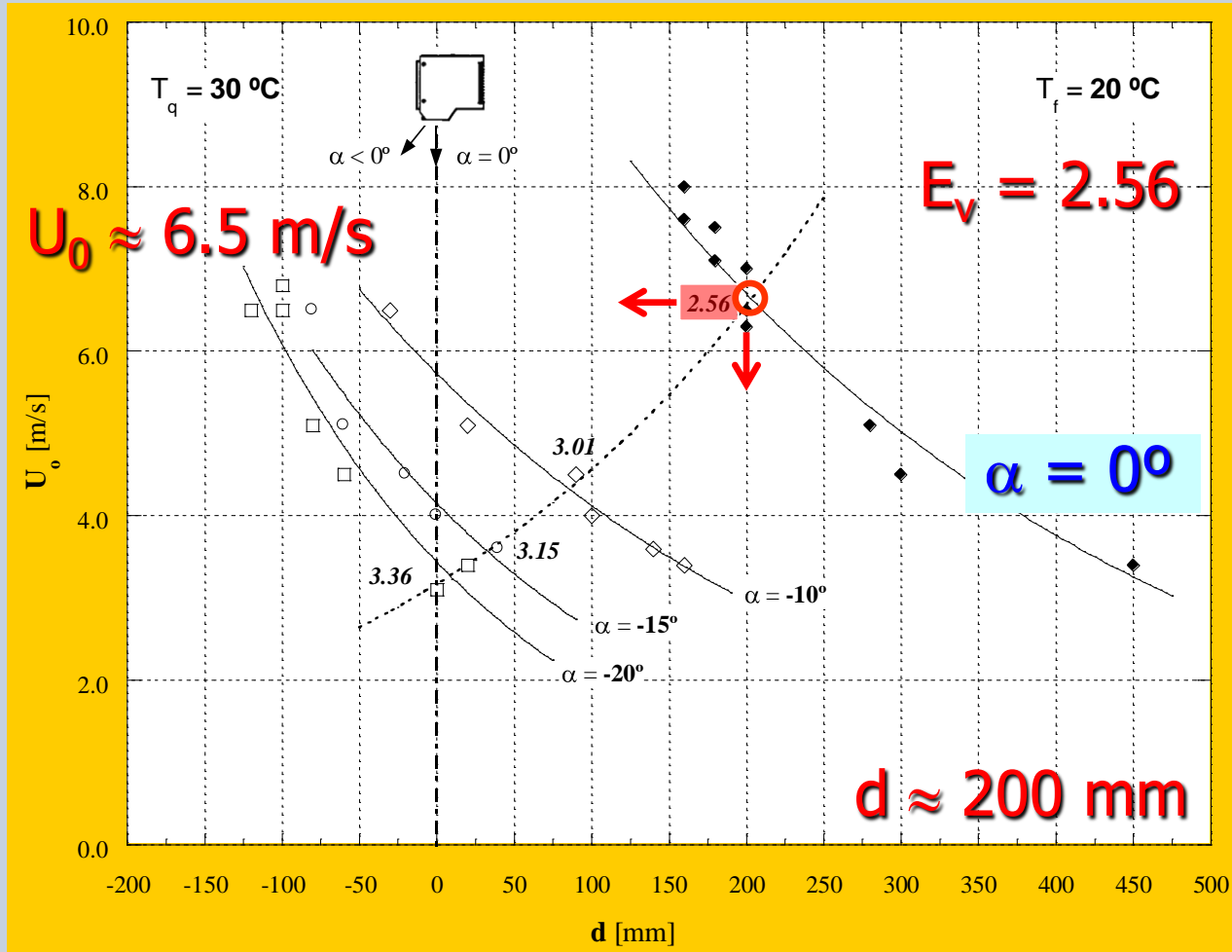
Excesso de U_0

5.

RESULTADOS OBTIDOS

5.5 – Ângulo inicial do jacto, α_0

$H_p = 2.25 \text{ m}$, $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$

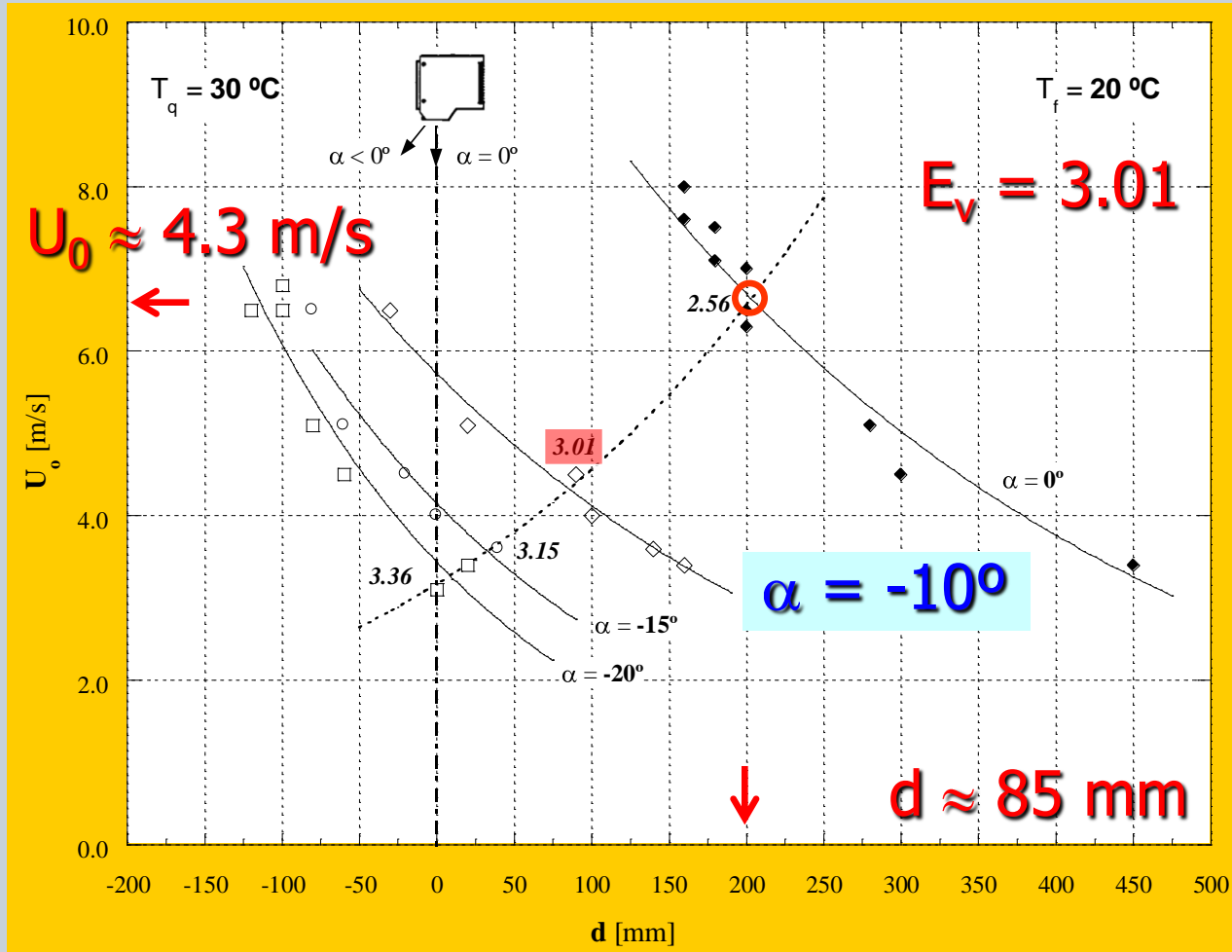


5.

RESULTADOS OBTIDOS

5.5 – Ângulo inicial do jacto, α_0

$H_p = 2.25 \text{ m}$, $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$

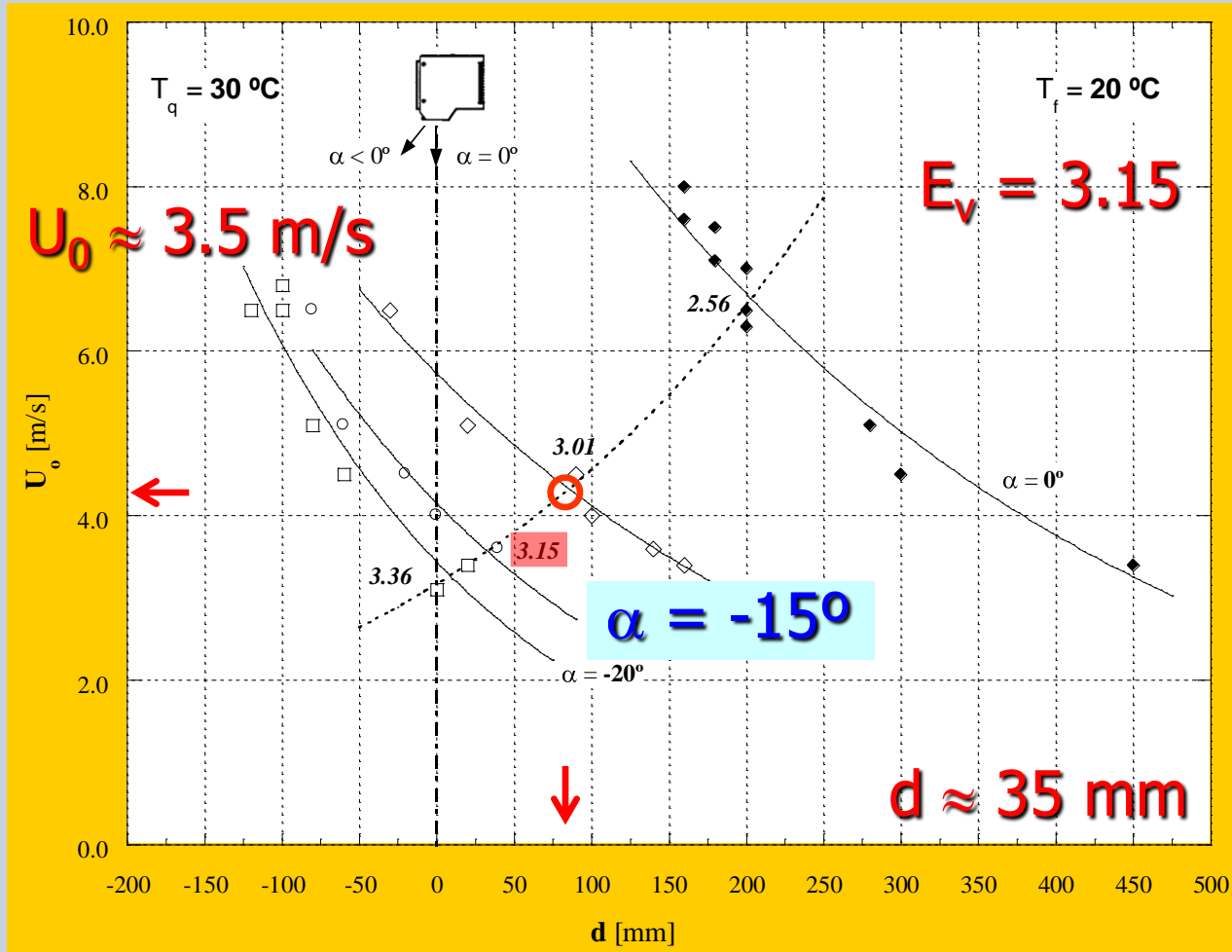


5.

RESULTADOS OBTIDOS

5.5 – Ângulo inicial do jacto, α_0

$H_p = 2.25 \text{ m}$, $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$

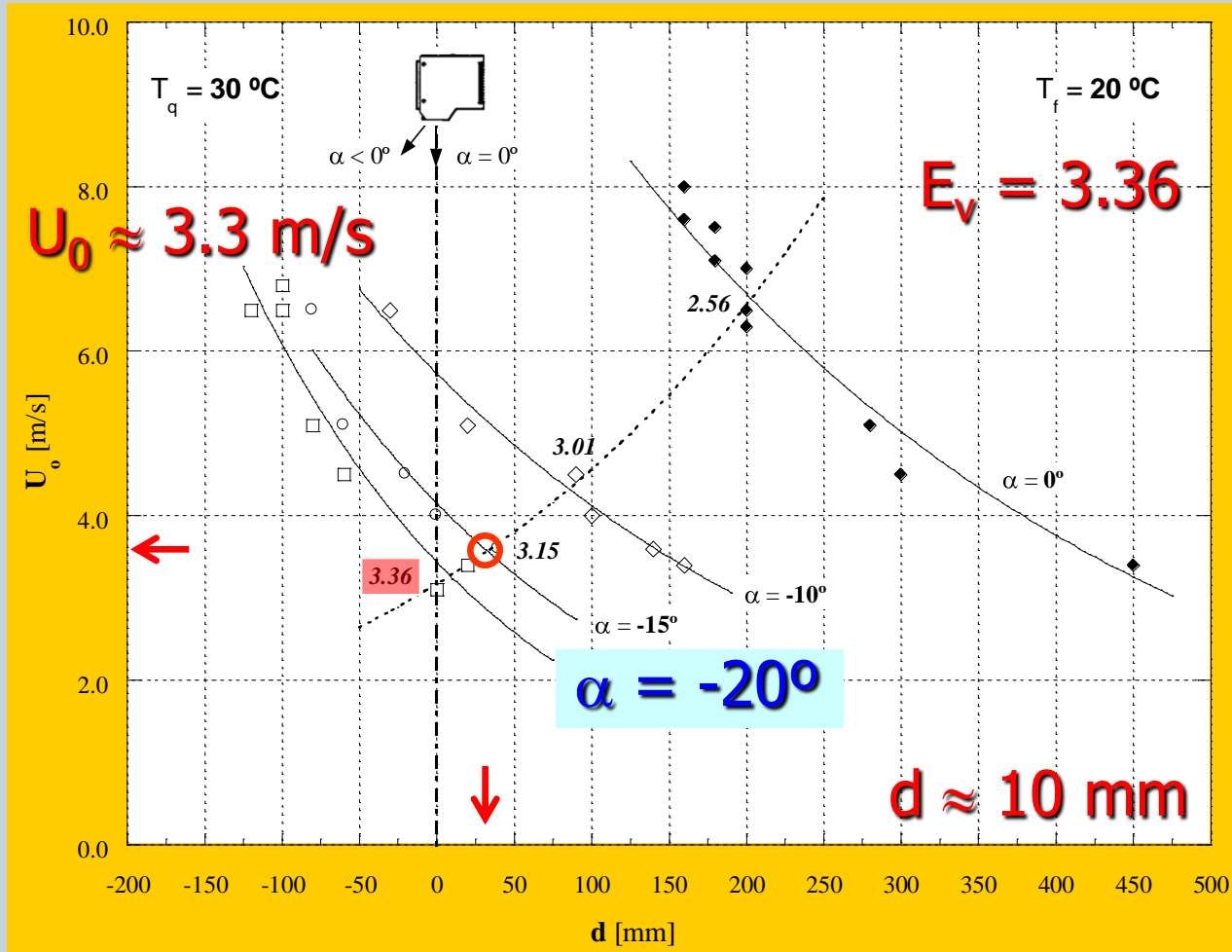


5.

RESULTADOS OBTIDOS

5.5 – Ângulo inicial do jacto, α_0

$H_p = 2.25 \text{ m}$, $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$



5.6 – Efeito do ângulo inicial do jacto, α_0

- Orientando o jacto para o lado da sala quente:
 - ▶ **Reduz-se** significativamente a distância **d** entre o ponto de impacto do jacto e a ombreira da porta;
 - ▶ A eficiência da vedação E_v atinge **valores mais elevados**;
 - ▶ A máxima eficiência de vedação E_v é obtida para uma menor velocidade inicial do jacto U_0 ;
- ➔ Existe uma **velocidade óptima** para o jacto, com a qual se obtém o **máximo efeito de vedação**, ou seja, que **minimiza a transferência de calor** entre as duas salas.

Calor sensível que se escapa através da porta [W]

$$\dot{Q} = \rho_i \cdot \left(\frac{n \cdot V_{\text{sala}}}{3600} \right) \cdot c_p \cdot T_Q - T_F$$

ρ_i massa específica do ar "frio" [kg/m³]

c_p calor específico do ar "frio" [J/kg.°C]

n número de renovações horárias de ar na sala "interior" [h⁻¹]

V_{sala} volume interno da sala "interior" [m³]

$T_Q - T_F$ diferença de temperatura entre as duas salas [°C]

Razão entre “custos energéticos” da situação em estudo e da situação de referência

$$\frac{\dot{Q}_j + \dot{Q}_{M\text{cortina}}}{\dot{Q}_0} \times 100$$

 \dot{Q}_0

potência de calor sensível que se escapa através da porta aberta e desprotegida (*situação de referência*) [W]

 \dot{Q}_j

potência de calor sensível que se escapa através da porta protegida pela cortina de ar (*situação em estudo*) [W]

 $\dot{Q}_{M\text{cortina}}$

potência eléctrica necessária ao funcionamento do aparelho de cortina de ar [W]

6.

CUSTOS ENERGÉTICOS

6.1 – Perdas de energia através da porta

$$H_{\text{porta}} = 2.65 \text{ m}, \Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

	U_0 [m/s]				
	<i>0.0</i>	3.4	4.5	5.1	6.5
Q [W]	<i>7 290</i>	4 860	2 083	2 337	2 438
Q_{cortina} [W]	–	120	120	120	120
Q_{total} [W]	<i>7 290</i>	4 980	2 203	2 457	2 558
[%]	<i>100%</i>	68%	30%	34%	35%

$$H_{\text{porta}} = 2.65 \text{ m}, \Delta T = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\frac{\dot{Q}_0 - \dot{Q}_j}{\text{COP}} \times \text{€/kWh}$$

$$\frac{7290 - 2083}{2.9} \times 0.1$$

- **1 hora** de funcionamento:
 - ▶ Poupança energética $\approx 0.180 \text{ €/hora}$
 - ▶ Consumo do motor $\approx 0.012 \text{ €/hora}$
 - ▶ Diminuição da factura $\approx 0.168 \text{ €/hora}$
- Custo inicial do aparelho $\approx 160 \text{ €}$
- **176 horas/mês** (8 horas/dia \times 22 dias/mês)

→ **Payback ≈ 5 meses !**

7.

CONDIÇÕES REAIS

- Levantamento das reais condições de instalação e de funcionamento dos aparelhos de cortina de ar:
 - ▶ Realização de vistorias técnicas a **36** estabelecimentos comerciais existentes em Castelo Branco:
 - Instalações sem deficiências = **4**
 - Instalações com deficiências = **32**:
 - ✗ Má selecção do aparelho de cortina de ar
 - ✗ Instalação incorrecta
 - ✗ Inadequada velocidade inicial do jacto
 - ✗ Ausência de ângulo inicial do jacto
 - ✗ Existência de obstáculos na trajectória do jacto
 - ✗ Deficiente manutenção dos aparelhos

7.

CONDIÇÕES REAIS

7.1 – Selecção do aparelho de cortina de ar

- ▶ Bocais de descarga de comprimento insuficiente e/ou excessivo face à porta que se pretende vedar.



7.

CONDIÇÕES REAIS

7.2 – Instalação do aparelho de cortina de ar

- ▶ Contingências de variada natureza (impedimentos físicos, razões estéticas, etc.) levam a uma incorrecta instalação do aparelho de cortina de ar.



7.

CONDIÇÕES REAIS

7.3 – Velocidade inicial do jacto de ar

- ▶ Insuficiências e/ou excessos face às especificações técnicas dos respectivos fabricantes e/ou por comparação com os resultados obtidos em laboratório.



7.

CONDIÇÕES REAIS

7.4 – Existência de obstáculos na trajetória do jacto de ar

- ▶ Presença de obstáculos físicos que impedem o normal desenvolvimento do jacto de ar.



7.

CONDIÇÕES REAIS

7.5 – Combinação de deficiências de natureza variada

- ▶ Presença de obstáculos físicos que impedem o normal desenvolvimento do jacto de ar;
- ▶ “Fugas” de massas de ar por detrás da cortina de ar.



7.

CONDIÇÕES REAIS

7.6 – Manutenção deficiente dos aparelhos

- ▶ Falta de limpeza periódica das grelhas e demais constituintes;
- ▶ Degradação das características do grupo motor-ventilador (velocidade inicial do jacto muito abaixo dos valores especificados pelo fabricante).



CONCLUSÕES

Neste estudo tentou demonstrar-se:

- ▶ A necessidade de haver uma selecção criteriosa da **velocidade de descarga** da cortina em função da **altura da porta** e da **diferença de temperatura** entre os compartimentos.
- ▶ A tendência natural do jacto para deflectir em direcção ao compartimento onde se encontra instalado o aparelho de cortina de ar:
 - ▶ Necessidade de orientar o **ângulo de descarga** do jacto de ar para o lado oposto ao da montagem do aparelho, com um ângulo de **15° - 20°**.

CONCLUSÕES

Da aplicação conjunta destas práticas resultou:

- ▶ Uma **melhoria** de cerca de **25 – 30%** na máxima eficácia de vedação conseguida na configuração em estudo;
- ▶ Uma **diminuição** significativa (**40% – 45%**) da velocidade de injeção de ar;
 - ▶ Uma **dupla poupança** energética:
 - ▶ **Menor** transferência de energia entre as salas devido à melhor eficácia da vedação
 - ▶ **Redução** dos custos inerentes ao funcionamento permanente do aparelho.

CONCLUSÕES

- ▶ O levantamento das verdadeiras condições de instalação e de operação dos aparelhos de cortina de ar em estabelecimentos comerciais climatizados revelou um **panorama “desanimador”**.
 - ▶ Embora nalgumas (poucas) situações, foram razões de ordem **estética** que imperaram, na esmagadora maioria das vezes não parece ter havido **rigor** na selecção e na instalação destes aparelhos.
 - ▶ Este estudo revelou que, salvo raras excepções, os donos e/ou funcionários dos estabelecimentos comerciais visitados não tinham uma noção clara acerca da funcionalidade dos aparelhos de cortina de ar, ficando ao critério de cada um a selecção do nível de velocidade do jacto.
 - ▶ Uma análise às respostas registadas nos inquéritos que foram realizados revelou um elevado **grau de insatisfação** dessas mesmas pessoas em relação ao desempenho das cortinas de ar como método de vedação térmica da porta...

AGRADECIMENTOS



O aparelho de cortina de ar utilizado no presente estudo foi gentilmente cedido pela empresa *Centauro Internacional* (Castelo Branco).

Os ensaios descritos foram realizados no *Laboratório de Aerodinâmica Industrial* (Coimbra)