

RELATÓRIO TÉCNICO  
125 011-205  
USP/COESF  
RELATÓRIO PARCIAL - GLEBA I  
28 de outubro de 2011

Detalhamento do sistema de ventilação do subsolo do edifício “Módulo Inicial”

**Cliente**  
Universidade de São Paulo USP/COESF

UNIDADES RESPONSÁVEIS  
Centro de Tecnologias Ambientais e Energéticas - CETAE  
Centro Tecnológico do Ambiente Construído - CETAC

## Resumo

Este relatório técnico apresenta uma proposta de sistema de proteção do Edifício Módulo Inicial do campus da EACH-USP contra a intrusão de gás inflamável eventualmente emanado do subsolo.

O sistema proposto incorpora os tapetes de brita nº 2 colocados sob as lajes de piso do edifício por ocasião de sua construção, cuja presença foi comprovada em relatório anterior através de fotografias de arquivo da Coesf, e tem como princípio básico a imposição de redes de fluxo de ar atmosférico nos tapetes, com o intuito de captar eventuais emanações de gás, impedindo sua intrusão no edifício a partir do subsolo. Como os tapetes de brita se encontram seccionados pelas vigas baldrame, a rede de fluxo de ar será instalada através de perfurações efetuadas na laje de piso, pela parte superior, que alcancem o tapete, numa extremidade da laje para extração de ar e na extremidade oposta para captação de ar atmosférico.

O fluxo de ar será imposto utilizando-se ventilação natural por meio do chamado “efeito chaminé”: chaminés metálicas, pintadas de preto, interna e externamente, conectadas aos furos de extração, funcionando por aquecimento solar, provocando fluxo por diferença de densidade entre a coluna de ar aquecido, interna à chaminé, e a coluna de ar externa, mais fria.

O topo das chaminés será provido de protetores, retiráveis, contra água de chuva, e ponteiros metálicas com queimadores, que serão acionados caso o monitoramento em cada chaminé indique coluna de gás em concentração inflamável.

Foram efetuados ensaios de permeabilidade ao ar da brita, em laboratório climatizado, ensaios em protótipo de grandes dimensões, simulando um “pano de tapete” típico, ensaios em dois tipos de chaminé, além de simulações por computador do fluxo gerado pelo aquecimento nas chaminés, da disponibilidade de sol no entorno do edifício Módulo Inicial e, finalmente, das redes de fluxo de ar atmosférico geradas em dez tipos diferentes de panos de tapete identificados, utilizando-se como dados de entrada os coeficientes de permeabilidade da brita ao ar e as pressões geradas pelas chaminés, medidos experimentalmente.

Os resultados obtidos mostram que o sistema proposto deve ser eficaz para ventilar todos os panos de tapete existentes sob as lajes do edifício Módulo Inicial.

Palavras Chaves: Ventilação Natural, Efeito Chaminé, Chaminé Solar, Intrusão de Vapor em Ambiente Fechado, Gás no Solo

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	A MOVIMENTAÇÃO DE AR DEVIDO AO EFEITO CHAMINÉ .....	2
3	MÉTODO DE TRABALHO .....	5
3.1	Medições feitas.....	6
3.1.1	Escoamento em Chaminé Solar.....	6
3.1.2	Permeabilidade da brita ao ar .....	8
3.1.3	Distribuição de pressões no interior de “tapete” de brita – ensaio em protótipo... 11	
3.2	Simulações do escoamento de ar no interior da chaminé .....	13
3.3	Simulações do escoamento de ar no interior dos tapetes de brita .....	13
3.3.1	Características Relevantes da Brita nº 2 (IPT, 2009) .....	15
3.3.2	Parâmetros para a simulação.....	15
3.4	Estudos acerca da disponibilidade de Radiação Solar.....	15
3.5	Cálculos de perda de carga.....	16
4	RESULTADOS OBTIDOS .....	17
4.1	Permeabilidade da brita ao ar.....	17
4.1.1	Ensaio por fluxo de ar sobre a brita 1 usada nos testes no IPT .....	17
4.1.2	Estimativa de $k_a$ da brita 1 pela expressão de Hazen .....	20
4.1.3	Cálculo de $k_a$ da brita 2 pela expressão de Hazen .....	21
4.2	Distribuição de pressões no “tapete” de brita – ensaio em protótipo.....	21
4.3	Escoamento de ar através das Chaminés.....	23
4.3.1	Temperaturas superficiais da chaminé.....	23
4.3.2	Parâmetros do escoamento através da chaminé .....	25
5	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE ESCOAMENTO DE AR NA CHAMINÉ.....	29
6	DISPONIBILIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR ENTRE OS PRÉDIOS .....	31
7	SIMULAÇÕES DO ESCOAMENTO DE AR NOS TAPETES DE BRITA.....	33
7.1	Simulações para o Tapete Tipo T1.....	35
7.2	Simulações para o Tapete Tipo T2.....	36
7.3	Simulações para o Tapete Tipo T3.....	37
7.4	Simulações para o Tapete Tipo T4.....	38
7.5	Simulações para o Tapete Tipo T5.....	40
7.6	Simulações para o Tapete Tipo T6.....	41
7.7	Simulações para o Tapete Tipo T7.....	42
7.8	Simulações para o Tapete Tipo T8.....	43
7.9	Simulações para o Tapete Tipo T9.....	44
7.10	Simulações para o Tapete Tipo T10.....	46
8	SISTEMA DE VENTILAÇÃO PROPOSTO.....	47
9	CONCLUSÕES .....	51
10	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....	53
	EQUIPE TÉCNICA.....	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56
	Anexo A - Sistema de ventilação proposto (10 páginas, incluindo folha de rosto)	
	Anexo B - Simulações do escoamento de ar no interior dos tapetes de brita (11 páginas, incluindo folha de rosto)	

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores médios dos parâmetros do escoamento da corrente de ar ascendente.....	28
Tabela 2 - Insolação das paredes das fachadas dos prédios da EACH-USP.....	32
Tabela 3 - Resultados obtidos por simulação para o tapete tipo T1 .....	36
Tabela 4: Resultados obtidos por simulação para o tapete tipo T2 .....	37
Tabela 5 - Resultados obtidos por simulação para o tapete tipo T3 .....	38
Tabela 6 - Resultados obtidos por simulação para o tapete tipo T4 .....	39
Tabela 7- Resultados obtidos por simulação para o tapete tipo T5 .....	41
Tabela 8- Resultados obtidos por simulação para o tapete tipo T6 .....	42
Tabela 9 - Resultados obtidos por simulação para o tapete tipo T7 .....	43
Tabela 10 - Resultados obtidos por simulação para o tapete tipo T8 .....	44
Tabela 11- Resultados obtidos por simulação para o tapete tipo T9 .....	45
Tabela 12 - Resultados obtidos por simulação para o tapete tipo T10 .....	47

## LISTA DE FOTOS

Foto 1 - Chaminés em PVC pintadas de preto e Metálica com sensores instalados.....	7
Foto 2 – Caixa preenchido com brita, bomba de vácuo, anemômetro e conectores plásticos para o sensor de pressão conectado ao <i>data logger</i> .....	10
Foto 3 – Vista do arranjo experimental para a verificação de gradientes de pressão em um “tapete” de brita, similar ao existente sob as lajes da EACH-USP .....	12

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema das forças atuantes em um volume de fluido de área “S” e altura “H” .....	3
Figura 2 - Distribuição granulométrica simplificada da brita 1 empregada nos ensaios em protótipo .....	8
Figura 3 – Esquema do arranjo experimental para a determinação da permeabilidade ao ar de um corpo de prova de brita .....	9
Figura 4 – Esquema do arranjo experimental para a verificação de gradientes de pressão em um “tapete” de brita, similar ao existente sob as lajes da EACH-USP .....	12
Figura 5 – Velocidade do ar na saída do corpo de prova e diferença de pressão entre entrada e saída, medidas em local não climatizado .....	18
Figura 6 – Temperatura do ar ambiente e diferença de pressão entre entrada e saída, medidas em local não climatizado .....	19
Figura 7 – Velocidade do ar na saída do caixote e diferença de pressão entre entrada e saída, medidas em local climatizado .....	19
Figura 8 – Temperatura do ar ambiente e diferença de pressão entre entrada e saída, medidas em local climatizado .....	20
Figura 9 – Temperatura do ar ambiente e diferença de pressão entre entrada e saída, medidas em local não climatizado e com uso do isolamento térmico sobre o tapete de brita .....	22

Figura 10 – Temperaturas superficiais das chaminés com acabamento galvanizado (esquerda) e com acabamento preto (direita) às 9h30min do dia 19/07/2011..	24
Figura 11 – Temperaturas superficiais das chaminés com acabamento galvanizado (esquerda) e com acabamento preto (direita) às 10h30min do dia 19/07/2011	24
Figura 12 – Temperaturas superficiais das chaminés com acabamento galvanizado (esquerda) e com acabamento preto (direita) às 11h30min do dia 19/07/2011	24
Figura 13 – Temperaturas superficiais das chaminés com acabamento galvanizado (esquerda) e com acabamento preto (direita) às 12h30min do dia 19/07/2011	24
Figura 14 – Temperaturas superficiais das chaminés com acabamento galvanizado (esquerda) e com acabamento preto (direita) às 13h30min do dia 19/07/2011	25
Figura 15 – Temperaturas superficiais das chaminés com acabamento galvanizado (esquerda) e com acabamento preto (direita) às 14h30min do dia 19/07/2011	25
Figura 16 – Temperaturas superficiais das chaminés com acabamento galvanizado (esquerda) e com acabamento preto (direita) às 15h do dia 19/07/2011.....	25
Figura 17 – Temperatura do ar na entrada (embaixo) e na saída (topo) das chaminés de PVC pintada de preto e em chapa metálica galvanizada.....	26
Figura 18 – Temperaturas medidas na base e no topo da chaminé, respectivas médias móveis de 10 leituras e diferença entre as médias, durante as medições no dia 20/07/2011 .....	27
Figura 19 – Velocidade do ar medida no topo da chaminé e diferenças de pressão entre a base e o topo da chaminé.....	27
Figura 20 – Radiação solar incidente em plano horizontal e vertical, durante as medições no dia 20/07/2011 .....	28
Figura 21 – Vetores de velocidade (m/s) no instante t=48s, ao longo do corpo da chaminé .....	29
Figura 22 – Vetor de velocidade (m/s) no instante t=82s, ao longo do corpo da chaminé.	29
Figura 23 – Detalhes dos vetores de velocidade (m/s) no instante t=48s, na saída da chaminé .....	30
Figura 24 – Detalhes dos vetores de velocidade (m/s) no instante t=82s, na saída da chaminé .....	30
Figura 25 – Temperatura (°C) da corrente de ar ascendente instante t=48s, ao longo do corpo da chaminé .....	30
Figura 26 – Temperatura (°C) da corrente de ar ascendente instante t=48s, ao longo do corpo da chaminé .....	30
Figura 27 – Representação da trajetória aparente do sol e sombras projetadas nas fachadas dos edifícios da EACH-USP. ....	31
Figura 28 – Nomenclatura dada às fachadas dos edifícios da EACH-USP para efeitos do estudo de disponibilidade de radiação solar. ....	33
Figura 29: Esquema ilustrativo de posicionamento do sistema para situação em que a chaminé se inicia na proximidade do piso.....	49
Figura 30: Esquema ilustrativo de posicionamento do sistema para situação em que a chaminé se inicia na proximidade do forro.....	50

## **RELATÓRIO TÉCNICO Nº 125 011-205**

### **DETALHAMENTO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO DO SUBSOLO DO EDIFÍCIO “MÓDULO INICIAL” DA EACH-USP, GLEBA I**

#### **1 INTRODUÇÃO**

Este relatório apresenta detalhamento do sistema de ventilação do subsolo do edifício “Módulo Inicial” da EACH-USP, Gleba I, para proteção contra a intrusão de gases ou vapores provenientes do subsolo, cujo projeto conceitual foi apresentado anteriormente no Relatório Técnico do IPT Nº 112 640-205, de junho de 2009 (IPT, 2009).

O serviço foi executado em atendimento ao contrato Nº 22/2010, de 04 de agosto de 2010, celebrado entre a Universidade de São Paulo – USP, por meio da Coordenadoria do Espaço Físico, COESF, e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A - IPT, de acordo com a Proposta de Trabalho IPT No 294 900/10, de 03/05/2010.

Na Gleba I da EACH-USP foi verificada a ocorrência generalizada de gases e vapores inflamáveis, constituídos provavelmente por gás metano, em amostragens efetuadas a 0,5 m e 1,0 m de profundidade, em trabalhos anteriores efetuados pelo IPT e por outras empresas.

Foi proposto, no relatório citado, um sistema de proteção contra intrusão de gases e vapores por ventilação do tapete de brita sob a laje de piso do edifício, através de perfurações na laje, funcionando, algumas, como drenos de extração ativa e outras, como canais de captação de ar atmosférico. A necessária pressão de sucção para funcionamento do sistema deverá ser providenciada por um conjunto de chaminés instalado no entorno do edifício, em locais que maximizem sua exposição à radiação solar durante o ano.

Ainda no relatório citado Nº 112 640-205 do IPT, foram apresentados alguns cálculos indicativos de viabilidade do sistema proposto, a partir do que, foram propostos, preliminarmente, número e localização de chaminés, além de estudada, exemplificadamente, sua insolação para alguns dias do ano.

Não fazia parte do escopo do referido relatório, a modelagem aprofundada ou mesmo uma verificação experimental de funcionamento do sistema proposto, o que possibilitaria seu detalhamento e otimização, que é o que se efetuou no âmbito do presente trabalho.

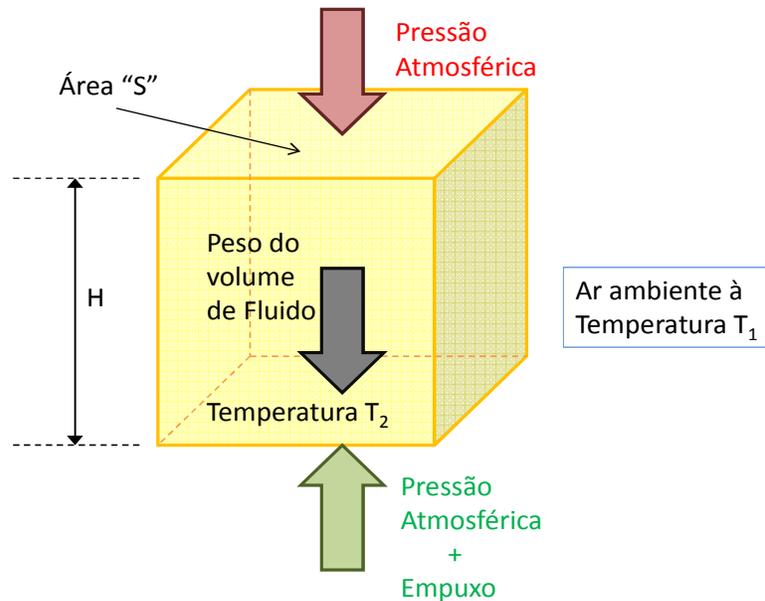
Para a definição desse sistema, foram realizadas várias medições em laboratório, além de cálculos e simulações em computador, que geraram dados para o seu dimensionamento. Os resultados dessas atividades, bem como sua análise, são apresentados no presente relatório.

Adicionalmente, são apresentadas recomendações sobre os cuidados necessários para o bom funcionamento do sistema e limites para a sua operação.

## **2 A MOVIMENTAÇÃO DE AR DEVIDO AO EFEITO CHAMINÉ**

O aquecimento de uma massa de ar, em uma região do espaço, causa a redução de sua massa específica e, conseqüentemente, gera uma diferença de pressão entre essa região aquecida e seu entorno mais frio. Esse efeito, já plenamente conhecido, é denominado “efeito termossifão” ou “efeito chaminé” e de há muito é utilizado para ventilar ambientes.

O movimento da massa de ar, aquecida a uma temperatura  $T_2$ , maior que a do restante do meio em que está inserida,  $T_1$ , é, normalmente, equacionado a partir de uma situação física, simples, conforme esquematizado na Figura 1, onde atuam: a pressão atmosférica, o peso da massa de fluido e o empuxo atuante nessa massa.



**Figura 1** – Esquema das forças atuantes em um volume de fluido de área “S” e altura “H”

Através de um cálculo de equilíbrio de forças na massa de fluido, conclui-se que a força resultante que provoca o movimento dessa massa é dada pela diferença: Peso - Empuxo.

O peso da massa de fluido é dado por:

$$S.H.g.\rho_2, \quad (\text{Equação 1}),$$

onde:

- S é a área da seção transversal do elemento de fluido ( $m^2$ );
- H é a altura do elemento de fluido (m);
- g é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ); e
- $\rho_2$  é a massa específica do ar ( $kg/m^3$ ), que está à temperatura  $T_2$  (K).

O empuxo é igual ao peso da massa de ar frio deslocada, dado por:

$$S.H.g.\rho_1, \quad (\text{Equação 2}), \text{ onde:}$$

- $\rho_1$  é a massa específica do ar, que está à temperatura  $T_1$ . Os demais termos já foram definidos anteriormente.

A diferença de pressão resultante,  $\Delta p$ , em Pa, é obtida dividindo-se a força resultante pela área “S”, do volume de fluido, resultando em:

$$\Delta p = H \cdot g \cdot (\rho_1 - \rho_2) \quad (\text{Equação 3})$$

Como esse valor de  $\Delta p$  é pequeno frente à pressão absoluta total, pode-se aplicar a equação dos gases perfeitos e escreverem-se as seguintes relações entre massa específica e temperatura absoluta:

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{T_0}{T_1} \quad \text{e} \quad \frac{\rho_2}{\rho_0} = \frac{T_0}{T_2},$$

onde o índice “0”, indica um estado de referência, normalmente adotado como  $T_0 = 273\text{K}$  e  $\rho_0 = 1,293 \text{ kg/m}^3$  (massa específica do ar na temperatura de referência). Com essas relações, a equação 3 pode ser escrita como:

$$\Delta p = H \cdot g \cdot \rho_0 \cdot \left( \frac{T_0}{T_1} - \frac{T_0}{T_2} \right) = H \cdot g \cdot \rho_0 \cdot T_0 \cdot \left( \frac{T_2 - T_1}{T_2 \cdot T_1} \right) = H \cdot g \cdot 353 \cdot \left( \frac{T_2 - T_1}{T_2 \cdot T_1} \right) \quad (\text{Equação 4})$$

Os resultados obtidos com a Equação 4 representam o máximo de diferença de pressão que se pode obter, sem considerar as perdas ( $P_v$ ) devido à dissipação viscosa que ocorre pelo atrito com a lateral da chaminé e pela passagem do ar pelas aberturas de entrada e saída existentes na chaminé. Essas perdas são proporcionais à velocidade do escoamento ( $v$ ) elevada ao quadrado, que tanto pode ser tomada na entrada ou na saída da chaminé, conforme a Equação 5.

$$P_v = \frac{v_2^2}{2} \cdot \rho_2 \cdot \tau = \frac{v_2^2}{2} \cdot \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_2} \cdot \tau \quad (\text{Equação 5}), \text{ onde}$$

- $\tau$  representa a somatória de todos os coeficientes de atrito atuantes.

Igualando-se, as equações 4 e 5 obtém-se a Equação 6, que é encontrada nos textos de ventilação natural, que expressa a velocidade média do escoamento de ar na saída da chaminé.

$$H \cdot g \cdot \rho_0 \cdot T_0 \cdot \left( \frac{T_2 - T_1}{T_2 \cdot T_1} \right) = \frac{v_2^2}{2} \cdot \rho_0 \cdot \tau \Rightarrow v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot H \cdot g \cdot (T_2 - T_1)}{\tau \cdot T_1}} \quad (\text{Equação 6})$$

Esse equacionamento apresenta as seguintes hipóteses simplificadoras:

- escoamento em regime permanente, quase estático;
- temperatura constante ao longo da altura da massa de fluido, no nosso caso a chaminé;
- efeitos viscosos agrupados todos em um único parâmetro; e
- efeitos de compressibilidade desprezíveis.

O efeito de compressibilidade é realmente pequeno, pois as diferenças de pressão presentes são baixas e as diferenças de temperatura envolvidas são pequenas. As demais simplificações são válidas para grandes ambientes onde o atrito com as paredes é desprezível e a inércia térmica da edificação reduz as flutuações de temperatura à ordem de apenas alguns graus célsius por hora, podendo-se considerar homogêneo o ar atmosférico ambiente.

Entretanto, no caso da chaminé solar, os efeitos viscosos são relevantes e a temperatura do escoamento varia ao longo da altura e do tempo devido à incidência da radiação solar. Vários autores têm realizado estudos para melhor equacionar esses efeitos, alguns recorrendo, inclusive, a simulações computacionais de dinâmica dos fluidos.

### **3 MÉTODO DE TRABALHO**

Para se quantificar os efeitos viscosos, bem como obter temperaturas típicas do escoamento, para materiais que podem ser usados em campo, seguiu-se o seguinte procedimento:

- i. Montagem, nos laboratórios no IPT, de 2 chaminés que foram instrumentadas para se medir temperaturas, diferenças de pressão e velocidades de ar; e
- ii. Realização de simulações em computador para se “visualizar” o escoamento.

Além disso, para se estudar o escoamento de ar no leito de brita existente sob as lajes de piso dos edifícios seguiu-se a seguinte série de atividades:

- a) Realização de ensaio específico para determinação do coeficiente de permeabilidade do leito de brita ao ar, nos laboratórios do IPT;
- b) Realização de cálculos e desenhos utilizando-se o programa de computador *Visual ModFlow*, para definição da rede de fluxo de ar gerada no tapete devido às pressões aplicadas pela chaminé.
- c) Medições de gradientes de pressão ao longo de um “tapete” de brita, montado nos laboratórios do IPT, visando identificar possíveis desvios entre os valores simulados e a condição real.

Finalmente, foram realizadas as seguintes atividades, visando definir a condição final de implantação das chaminés solares no campus da EACH-USP: estudo de disponibilidade de radiação solar entre os prédios, utilizando-se o programa de computador livre *SketchUp*, e dimensionamento do sistema de condução de ar, levando-se em conta as perdas de carga por efeitos viscosos nesse sistema.

### **3.1 Medições feitas**

São apresentados, a seguir, detalhes dos arranjos experimentais utilizados.

#### **3.1.1 Escoamento em Chaminé Solar**

Para se determinar, ainda que de forma simplificada, o efeito da dissipação viscosa de energia, bem como o potencial de aquecimento que se conseguirá em condições reais, foram construídas e instrumentadas 2 chaminés solares de 2 m de altura e 10 cm de diâmetro, uma em PVC, que foi pintada de preto fosco, e outra em chapa metálica galvanizada. Os acabamentos superficiais escolhidos representam, respectivamente, a condição de máxima absorção de radiação solar e máxima reflexão de radiação solar.

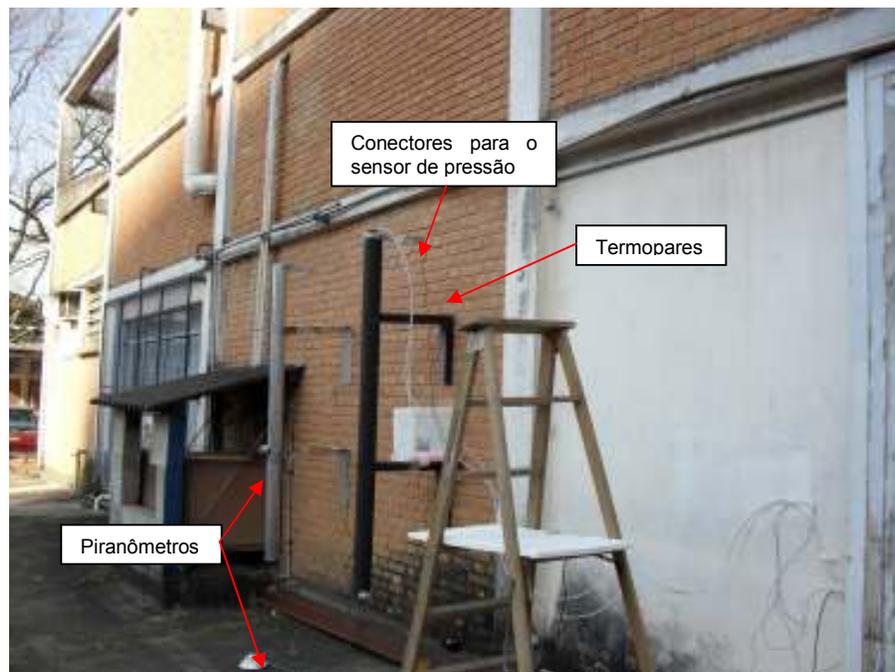
Essas chaminés foram montadas na lateral de um dos laboratórios do IPT, com boa incidência de sol e relativamente abrigadas da incidência de ventos fortes.

Nessas chaminés, foram medidas as seguintes grandezas:

- Temperatura do ar na entrada (base) e na saída (topo) das chaminés, com termopares tipo T, bitola 24 AWG;

- Diferença de pressão do ar na entrada (base) e na saída (topo) das chaminés, utilizando-se um sensor de pressão diferencial piezo-resistivo, com resolução de 0,1 Pa;
- Radiação solar incidente tanto na superfície horizontal como na superfície vertical, empregando-se piranômetros, com resolução de 1 W/m<sup>2</sup>;
- Velocidade média da corrente de ar ascendente, com o anemômetro de hélice, com resolução de 0,1 m/s e valor mínimo de medição de 0,4 m/s; e
- Temperatura superficial externa, utilizando-se um termógrafo infravermelho;

Com exceção das temperaturas superficiais que foram registradas de hora em hora, todos os demais parâmetros foram registrados em intervalos de 30 segundos em um *data logger*. As temperaturas, a diferença de pressão e a velocidade do escoamento foram medidas, aproximadamente, no centro da seção transversal das chaminés. Na **Foto 1**, é apresentada uma vista da montagem experimental construída.



**Foto 1** - Chaminés em PVC pintadas de preto e Metálica com sensores instalados  
As medições foram realizadas de forma ininterrupta por vários dias consecutivos.

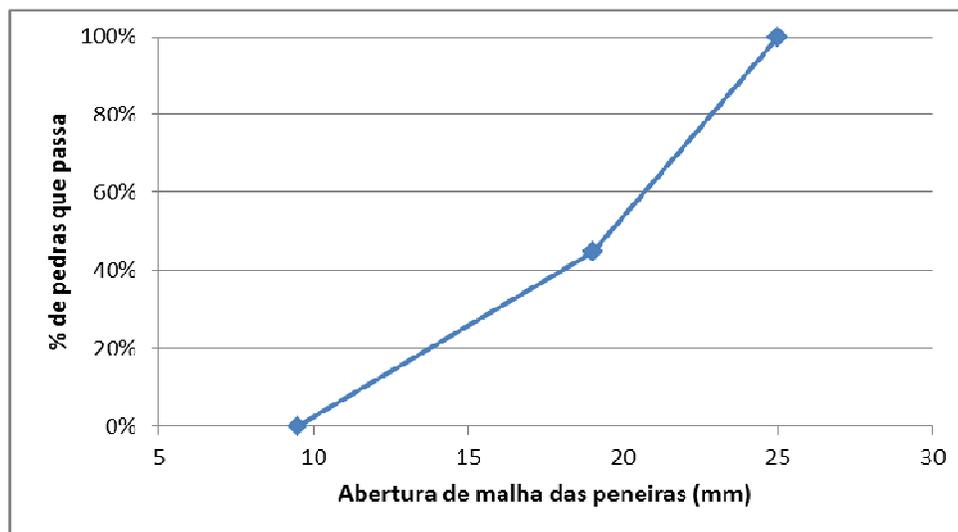
### 3.1.2 Permeabilidade da brita ao ar

A brita utilizada na confecção dos “tapetes” drenantes sob as lajes de piso do edifício Módulo Inicial da EACH-USP foi a brita nº 2, que tem diâmetros de partículas entre 1,9 e 3,8 cm (IPT, 2009).

Infelizmente, por uma questão de disponibilidade momentânea, a brita utilizada nos ensaios no IPT não foi a brita nº 2, mas outra, cujas dimensões se aproximam das da brita nº 1, com pedras menores que a nº 2, como mostrado na curva granulométrica simplificada da **Figura 2**.

Esse fato não influenciou os resultados, como se mostrará a seguir, pois a estimativa do coeficiente de permeabilidade ao ar,  $k_a$ , a partir da permeabilidade à água,  $k_w$ , através da conhecida expressão de Hazen (ver por ex. Pinto, 2006, p. 117), foi testada e confirmada para a brita 1, podendo ser aplicada para a brita 2, o que foi feito.

O teste e os cálculos efetuados estão descritos no item 4.1 deste texto.



**Figura 2** - Distribuição granulométrica simplificada da brita 1 empregada nos ensaios em protótipo

#### 3.1.2.1 Permeabilidade da brita 1 (utilizada nos ensaios no IPT) ao ar

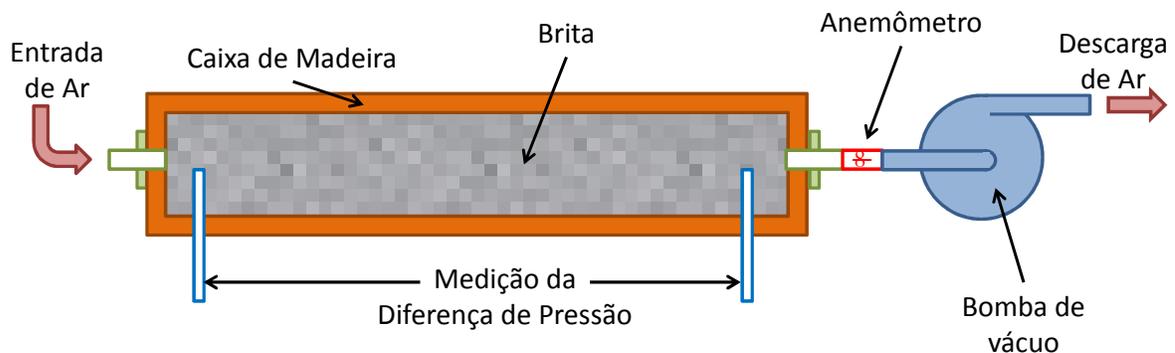
A brita 1, empregada nos ensaios em protótipo no IPT, foi ensaiada diretamente por fluxo de ar, para medida do coeficiente de permeabilidade intrínseco,  $K$  ( $m^2$ ), que, a

seguir, foi comparado com o mesmo  $K$  obtido a partir de estimativa de  $k_w$  (para água), feita através da expressão de Hazen para solos granulares. Esse procedimento foi empregado para validar, para este caso, o cálculo do coeficiente de permeabilidade de Darcy ao ar,  $k_a$  (m/s), para a brita 2, existente nos tapetes sob as lajes do edifício Módulo Inicial, a partir de  $k_w$  estimado pela expressão de Hazen. O valor de  $k_a$  é necessário como parâmetro de entrada para as simulações do fluxo de ar nos tapetes do edifício Módulo Inicial com o programa de computador utilizado (*Visual modflow*).

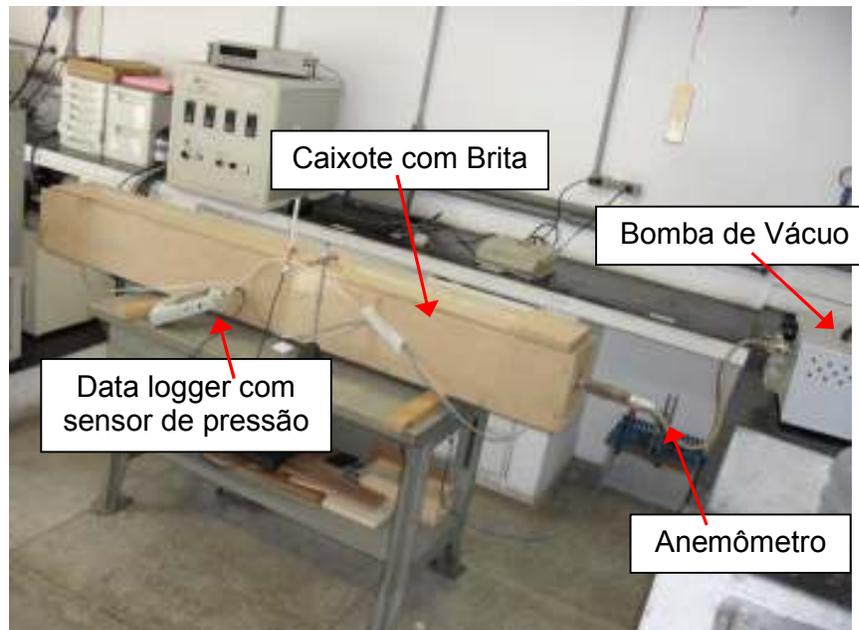
Para o ensaio da brita 1 ao ar, foi construído um caixote de madeira, com 2 m de comprimento e seção transversal quadrada, com dimensões internas de 0,2 m x 0,2 m, no qual foi colocada a brita no estado solto, após o que, foi selado com cola de silicone. O arranjo foi instalado em uma sala climatizada no laboratório, com temperatura mantida aproximadamente constante.

A esse caixote foi acoplada uma bomba de vácuo, que gerou um escoamento permanente. Com esse escoamento estabelecido, foi medida a vazão volumétrica de ar que atravessa o corpo de prova de brita e a diferença de pressão entre dois pontos, um próximo à entrada e outro próximo à saída de ar, distantes 1,8 m entre si. Nas medições foram utilizados os mesmos equipamentos apresentados anteriormente.

Um esquema da montagem é apresentado na **Figura 3**. Na **Foto 2**, tem-se uma vista desse arranjo.



**Figura 3** – Esquema do arranjo experimental para a determinação da permeabilidade ao ar de um corpo de prova de brita



**Foto 2** – Caixote preenchido com brita, bomba de vácuo, anemômetro e conectores plásticos para o sensor de pressão conectado ao *data logger*

### 3.1.2.2 Permeabilidade da brita 2 (existente nos “tapetes” sob as lajes do Edifício Módulo Inicial) ao ar

O cálculo do coeficiente de permeabilidade ao ar,  $k_a$ , da brita 2, necessário como parâmetro de entrada para o programa de computador utilizado nas simulações (*Visual Modflow*) foi feito como segue:

- a. estimativa do coeficiente de permeabilidade à água,  $k_w$ , através da expressão de Hazen,

$$k_w = 100(d_{10})^2,$$

com  $d_{10}$  (diâmetro efetivo) da brita em cm e  $k_w$  em cm/s;

- b. cálculo do coeficiente de permeabilidade do ar,  $k_a$ , considerando-se o fluxo de ar como incompressível (a justificativa para essa consideração encontra-se no item 4.1.1), através da expressão:

$$k_a = \frac{\rho_a \mu_w}{\rho_w \mu_a} k_w,$$

ou,

$$k_a = 0,1. k_w$$

onde

$\rho_a$ : massa específica do ar (1,196 kg/m<sup>3</sup>) (101 kPa e 20 °C)

$\rho_w$ : massa específica da água (998,903 kg/m<sup>3</sup>) (20 °C)

$\mu_a$ : viscosidade do ar (1,785x10<sup>-5</sup> Pa.s) (20 °C)

$\mu_w$ : viscosidade da água (1,009x10<sup>-3</sup> Pa.s) (20 °C)

A expressão para  $k_a$  acima é deduzida diretamente da expressão para o coeficiente de permeabilidade intrínseco (ver por ex. Lambe e Whitman, 1969, pg. 305):

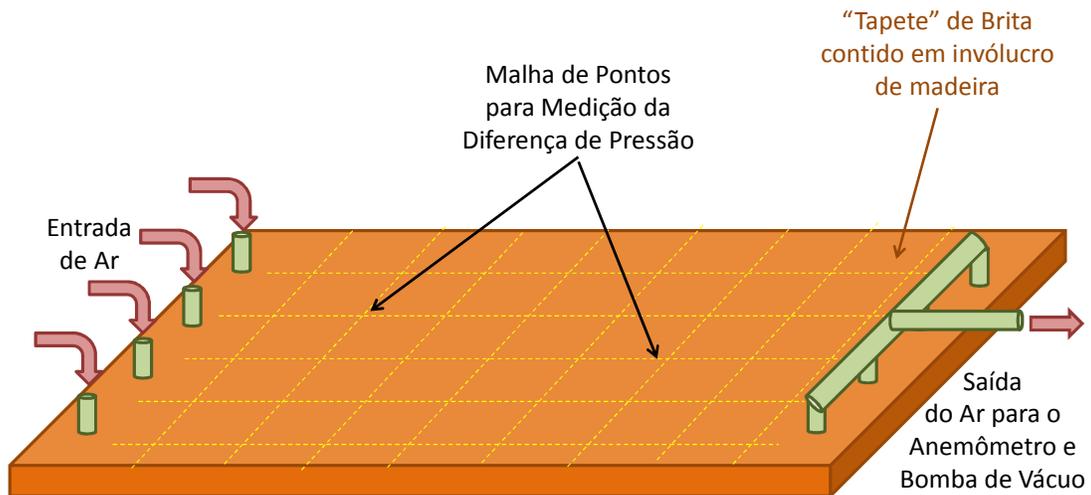
$$K = \frac{\mu_w}{\rho_w g} k_w = \frac{\mu_a}{\rho_a g} k_a$$

### 3.1.3 Distribuição de pressões no interior de “tapete” de brita – ensaio em protótipo

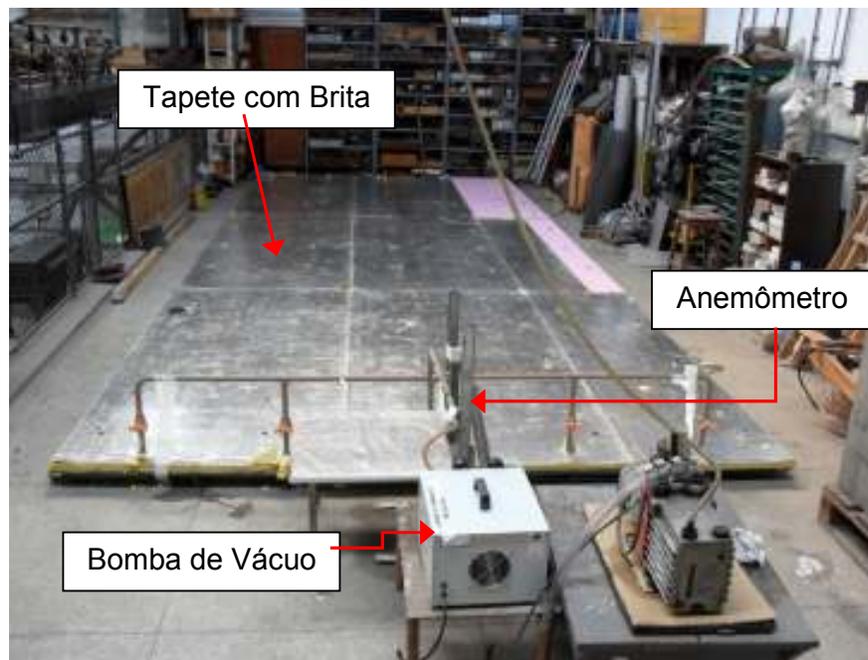
Para se estimar o efeito de heterogeneidades nos gradientes de pressão decorrentes de eventuais irregularidades no tapete de brita existente sob as lajes de piso do Edifício Módulo Inicial, foi construído um tapete de brita, com 3 m de largura, 8 m de comprimento e 5 cm de altura, dimensões aproximadas do Tapete Tipo 1 (IPT, 2009. Ver item 3.3 a seguir). Por um conjunto de perfurações efetuadas numa das extremidades do tapete era feita a extração de ar, cuja entrada se dava através de um conjunto simétrico de perfurações na outra extremidade desse tapete.

O tapete de brita foi envolvido com manta plástica impermeável, em seguida madeira estanque, com juntas coladas com cola flexível, e coberto com material isolante térmico. A esse conjunto foi acoplada a mesma bomba de vácuo citada no item anterior, que gerou um escoamento permanente. Com esse escoamento estabelecido, foi medida a vazão volumétrica de ar que atravessava a massa de brita e a diferença de pressão entre vários pontos dispostos sobre uma malha regular, desde a entrada de ar até a saída. Os furos de saída de ar foram interconectados por uma pequena tubulação de PVC e esta unida ao anemômetro e à bomba de vácuo.

Um esquema da montagem é apresentado na **Figura 4**. Na **Foto 3**, tem-se uma vista desse arranjo.



**Figura 4** – Esquema do arranjo experimental para a verificação de gradientes de pressão em um “tapete” de brita, similar ao existente sob as lajes da EACH-USP



**Foto 3** – Vista do arranjo experimental para a verificação de gradientes de pressão em um “tapete” de brita, similar ao existente sob as lajes da EACH-USP

### 3.2 Simulações do escoamento de ar no interior da chaminé

A fim de determinar perfis de velocidade e de temperatura variando com o tempo, ao longo da altura da chaminé, foram realizadas simulações do escoamento do fluido no interior de uma chaminé de 2 m de altura e 10 cm de diâmetro, similar à que foi ensaiada.

Para se realizar essa simulação, foi utilizado o software FDS, desenvolvido pelo NIST-EUA para modelar escoamentos turbulentos, em regime transitório, causados por efeitos térmicos, como, por exemplo, o caso em questão.

O modelo criado foi uma malha bidimensional, onde uma face foi mantida à temperatura constante de 55°C (representando a face exposta ao sol) e, a outra, adiabática. Todo o sistema estava inicialmente a 20°C.

Foi usada uma malha bidimensional de 5 mm na direção horizontal x 20 mm na direção vertical e as equações de Navier-Stokes foram resolvidas usando-se a técnica denominada *Direct Numerical Simulation*, para modelagem dos fenômenos de turbulência.

### 3.3 Simulações do escoamento de ar no interior dos tapetes de brita

Os tapetes de brita existentes sob as lajes de piso no edifício Módulo Inicial foram classificados em dez tipos característicos, para os quais foram determinadas, através de simulação por programa de computador, (*Visual Modflow*), as direções e magnitudes das velocidades do ar, além da vazão total no tapete (ver **Desenhos B1 a B10, Anexo B**), quando submetidos às pressões de sucção provocadas pelas chaminés solares propostas (**Desenhos A1 a A9, Anexo A**):

- Tapete Tipo T1 (Blocos Padrões) – tapetes L3 a L8 e L25 a L30. Dimensões em planta: aproximadamente 3,40 m x 9,00 m;
- Tapete Tipo T2 (Auditório) – tapetes L5, L7, L29, L31, L45 E L47. Dimensões em planta: ver **Desenho A4, Desenho A5 e Desenho A6, Anexo A**.

- Tapete Tipo T3 (Corredor de Serviço – Adicional, Módulo 1 e Terraço) – tapetes L23, L24, L47 a L50. Dimensões em planta: aproximadamente 5,70 m x 6,30 m;
- Tapete Tipo T4 (Auditório) – tapetes L6, L30 e L46. Dimensões em planta: ver **Desenho A4, Desenho A5 e Desenho A6, Anexo A.**
- Tapete Tipo T5 (Auditório) – tapetes L1, L25 e L41. Dimensões em planta: ver **Desenho A4, Desenho A5 e Desenho A6, Anexo A.**
- Tapete Tipo T6 (Blocos Padrões) – tapetes de acesso às salas dos blocos padrões. Dimensões em planta: aproximadamente 2,50x21,60 m.
- Tapete Tipo T7 (Corredor de Serviço – Adicional e Módulos 1 e 2) – tapetes L1, L21 e L22. Dimensões em planta: aproximadamente 4,40x12,00 m.
- Tapete Tipo T8 (Corredor de Serviço – Adicional e Módulos 1 e 2) – tapetes L8 e L31. Dimensões em planta: ver **Desenho A8 e Desenho A9, Anexo A.**
- Tapete Tipo T9 (Corredor de Serviço – Adicional, Módulo 1 e Terraço) – tapetes L32 e L56. Dimensões em planta: ver **Desenho A7 e Desenho A8, Anexo A.**
- Tapete Tipo T10 (Auditório) – tapetes L49. Dimensões em planta: ver **Desenho A6, Anexo A.**

As outras dimensões de tapete existentes sob as lajes do edifício Módulo Inicial estão representadas pelos Tapetes Tipo acima, não tendo sido efetuadas simulações da rede de fluxo de ar específicas para eles.

As soluções de ventilação dos tapetes, estão indicadas nos **Desenhos A1 a A9, Anexo A.**

As simulações foram efetuadas utilizando-se o programa de computador *Visual ModFlow*, dedicado a cálculos de fluxo de água, com as modificações recomendadas em ASTM (2006).

### 3.3.1 Características Relevantes da Brita nº 2 (IPT, 2009)

A brita utilizada nos tapetes sob as lajes de piso no Edifício Módulo Inicial foi a brita nº 2, como se mostrou no relatório técnico IPT (2009).

Esse material apresenta as seguintes características:

- Diâmetro mínimo de partículas  $d_{\min} = 1,9$  cm
- Diâmetro máximo de partículas  $d_{\max} = 3,8$  cm
- Da curva granulométrica estimada:  $d_{10} = 2,0$  cm e  $d_{60} = 2,9$  cm.

O coeficiente de não uniformidade  $CNU = d_{60}/d_{10} = 2,9/2,0 = 1,45 < 2$ , o que caracteriza a brita 2 como material uniforme (Lambe e Whitman, 1969, pg. 44), podendo-se então empregar a equação de Hazen para estimativa do coeficiente de permeabilidade à água,  $k_w$  para esse material, e a seguir, o coeficiente de permeabilidade ao ar,  $k_a = 0,1.k_w$  (item 3.1.2.2).

### 3.3.2 Parâmetros para a simulação

Os parâmetros da Brita nº 2, adotados para a simulação, foram os seguintes:

- Coeficiente de permeabilidade ao ar:  $k_a = 0,1.k_w = 0,4$  m/s (ver itens 3.1.2.2 e 4.1.3 neste texto)
- Porosidade adotada:  $n = 0,5$  (Lambe e Whitman, 1969, pg. 43)
- Pressão disponível para cada tapete: ver Itens 7.1 a 7.10 deste texto
- Diâmetro dos furos para ventilação nas lajes: 10 cm

## 3.4 Estudos acerca da disponibilidade de Radiação Solar

Em relatório técnico emitido anteriormente pelo IPT (2009), foram apresentados os locais ao redor dos prédios do Edifício Módulo Inicial, da EACH-USP, com maior potencial de incidência de radiação solar, praticamente livre da incidência da sombra desse e dos prédios vizinhos.

Na continuidade dos trabalhos, notou-se que as distâncias entre as salas a serem ventiladas e os locais pré-selecionados eram grandes e, sabendo-se que sistemas de ventilação por diferença de temperaturas geram diferenciais de pressão baixos, estudou-se a possibilidade de aproximar as chaminés solares das fachadas do edifício.

Assim, no presente relatório, foram feitos estudos para determinar o número de horas em que ocorre incidência de radiação solar sobre as fachadas dos prédios onde poderão ser instaladas chaminés solares. Para isso, maquetes digitais foram construídas utilizando-se softwares de CAD e a trajetória aparente do sol e a projeção das sombras das edificações foram calculadas, para os solstícios de verão e de inverno e para um equinócio.

### **3.5 Cálculos de perda de carga**

A preocupação citada anteriormente com as baixas pressões geradas pelos dispositivos de ventilação natural por efeito chaminé fez com que fossem projetados sistemas de condução de ar com pequenas distâncias a percorrer, poucas peças de transição e grandes seções transversais, visando minimizar as perdas de pressão estática e dinâmicas no sistema.

Os cálculos foram feitos empregando-se equações clássicas de mecânica dos fluidos, que podem ser encontradas em livros texto do assunto. Foram adotadas as seguintes premissas e equações:

- A rugosidade dos trechos retos do sistema foi adotada como sendo de 0,0015 mm, típico de elementos em aço galvanizado;
- O ar escoava como fluido incompressível, na faixa de pressões em questão;
- Escoamento plenamente desenvolvido em todas as seções;
- A velocidade do ar na chaminé foi a máxima obtida nas medições, que representa a maior vazão de renovação, mas que gera, também, a maior perda de carga.

## 4 RESULTADOS OBTIDOS

### 4.1 Permeabilidade da brita ao ar

#### 4.1.1 Ensaio por fluxo de ar sobre a brita 1 usada nos testes no IPT

Em ensaios preliminares efetuados em ambiente não climatizado, verificou-se que, mesmo mantendo-se constante a velocidade de escoamento do ar, a diferença de pressão varia significativamente, acompanhando a variação de temperatura do ar ambiente, como se pode ver na **Figura 5** e **Figura 6**.

Quando as mesmas medições foram repetidas em um laboratório climatizado, mantendo-se a temperatura praticamente constante, a diferença de pressão registrada permaneceu também praticamente constante, para velocidade de ar mantida também constante, como pode ser visto na **Figura 7** e na **Figura 8**. A flutuação nos valores medidos do diferencial de pressão, de  $\pm 0,1$  Pa, é devida à resolução do sensor.

Os seguintes valores médios foram obtidos nas medições:

- Velocidade média do ar:  $v = 0,68$  m/s;
- Diâmetro do anemômetro:  $d = 15$  mm;
- Diferença de pressão entre os pontos de medida distantes entre si de 1,8 m (ver **Figura 3**):  $\Delta p = 0,6$  Pa.

O fluxo de ar pode ser considerado incompressível, nesse caso, pois a razão entre a diferença de pressões e a média das pressões absolutas aplicadas vale:

$$\frac{\Delta P}{P_m} = \frac{0,6}{101325 + (101325 - 0,6)/2} = 6 \cdot 10^{-6} \ll 0,1$$

Valores de  $\Delta P/P_m$  menores que 0,1, para fluxo de ar em meio poroso, garantem que, para os propósitos do presente trabalho, o fluxo pode ser considerado como incompressível (Ignatius, 1999, p. 23)

A vazão de ar ( $Q_a$ ) que atravessou o sensor e, portanto, também o leito de brita:

$$Q_a = v \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

A velocidade de Darcy,  $q_a$ , do ar, na saída do corpo de prova de brita, é dada pelo quociente da vazão acima pela área da seção transversal do caixote (0,2 m x 0,2 m):

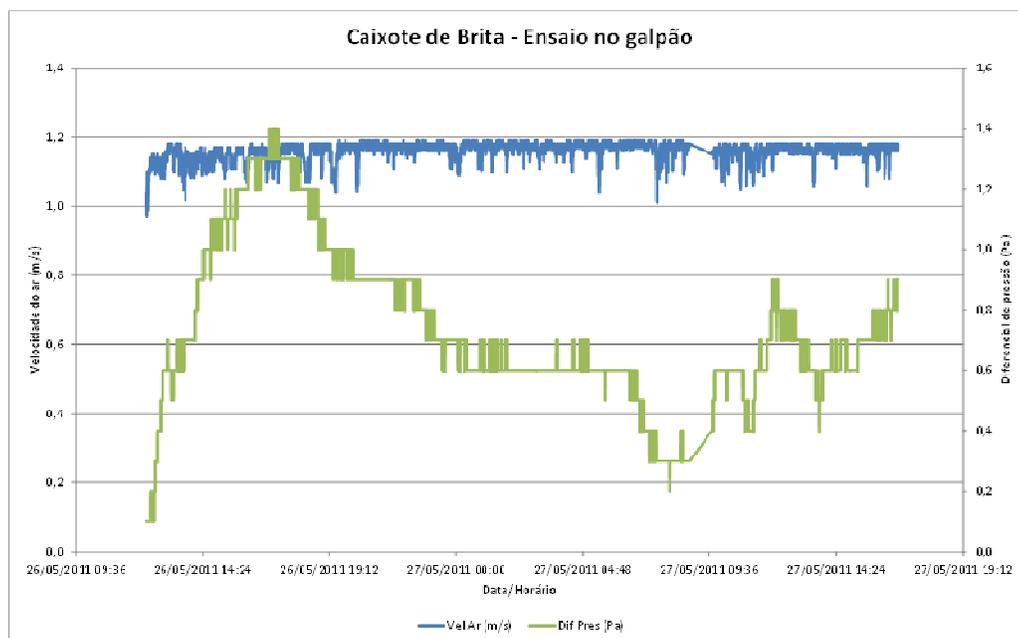
$$q_a = \frac{Q_a}{0,2^2} = 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

Com esse valor, com a diferença de pressão medida, sabendo que a distância entre os pontos de medição de pressão,  $L$ , é de 1,8 m, e adotando-se a viscosidade dinâmica do ar,  $\mu_a$ , igual a  $1,785 \times 10^{-5}$  Pa.s (pressão de 101 kPa e temperatura de 20°C), calcula-se o coeficiente de permeabilidade intrínseco da brita 1, nas condições ensaiadas,  $K$ , como sendo:

$$K = \frac{q \cdot \mu_a \cdot L}{\Delta P}$$

OU,

$$K = 1,6 \times 10^{-7} \text{ m}^2$$



**Figura 5** – Velocidade do ar na saída do corpo de prova e diferença de pressão entre entrada e saída, medidas em local não climatizado

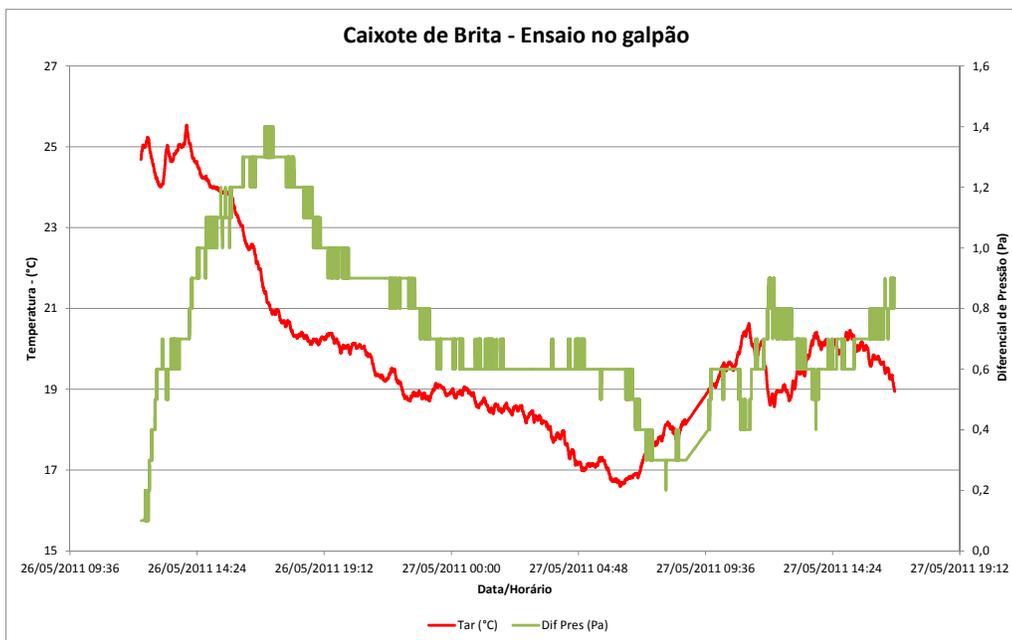


Figura 6 – Temperatura do ar ambiente e diferença de pressão entre entrada e saída, medidas em local não climatizado

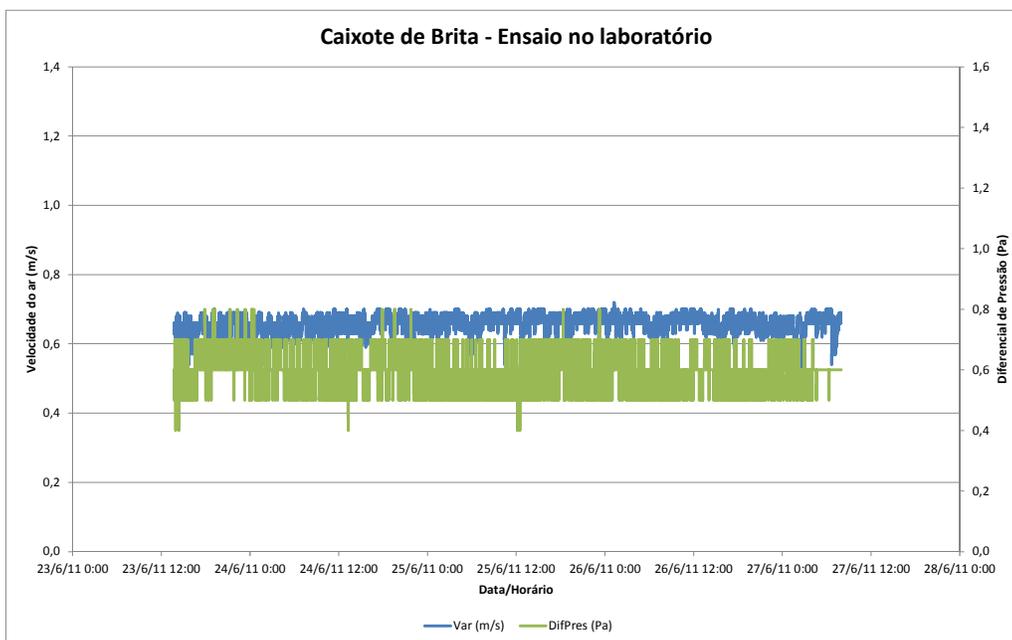
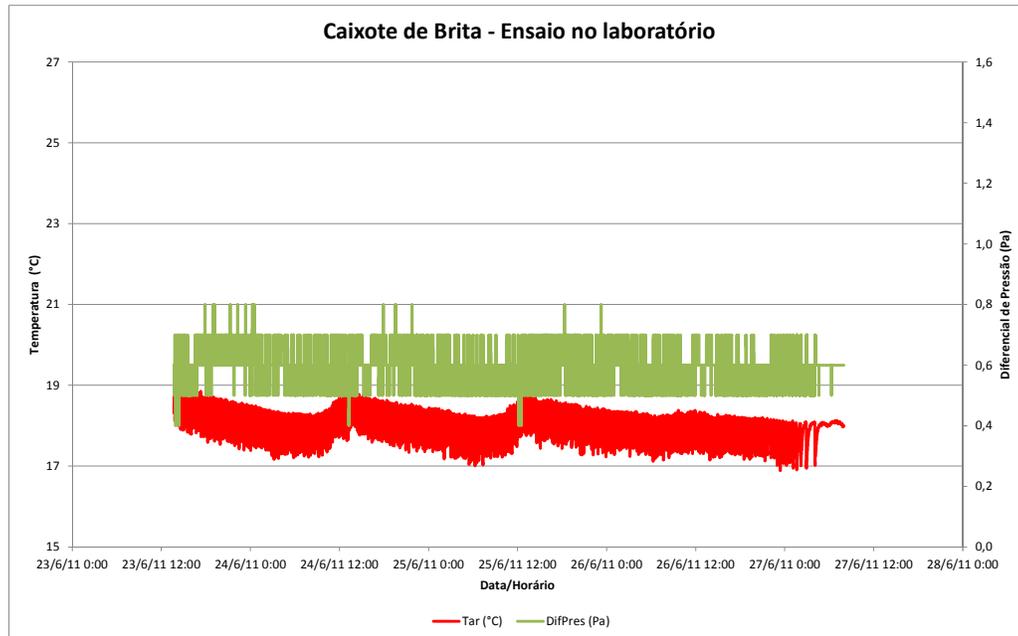


Figura 7 – Velocidade do ar na saída do caixote e diferença de pressão entre entrada e saída, medidas em local climatizado



**Figura 8** – Temperatura do ar ambiente e diferença de pressão entre entrada e saída, medidas em local climatizado

#### 4.1.2 Estimativa de $k_a$ da brita 1 pela expressão de Hazen

A conhecida expressão de Hazen,  $k_w = 100(d_{10})^2$ , com  $d_{10}$  em cm e  $k_w$  em cm/s, permite a estimativa do coeficiente de permeabilidade à água,  $k_w$ , para materiais granulares uniformes (coeficiente de não uniformidade  $CNU < 2$ , e  $CNU = d_{60}/d_{10}$ . Lambe e Whitman, 1969, pg. 44).

Para a brita 1, utilizada nos ensaios (**Figura 2**:  $CNU = 2,1/1,2 = 1,75$ ), a expressão de Hazen fornece:

$$k_w = 100(1,2)^2 = 144 \text{ cm/s} = 1,44 \text{ m/s}$$

A partir do coeficiente de permeabilidade à água,  $k_w$ , considerando-se incompressível o fluxo de ar, e adotando-se a aceleração da gravidade  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ , pode-se obter o coeficiente de permeabilidade intrínseco,  $K$  pela equação:

$$K = \frac{\mu_w}{\rho_w \cdot g} k_w$$

ou,

$$K = \frac{1,009 \cdot 10^{-3}}{998,903 * 9,81} 1,44 = 1,5 \times 10^{-7} m^2$$

Esse valor, como se pode ver, é praticamente igual ao determinado diretamente em ensaio por fluxo de ar,  $K = 1,6 \times 10^{-7} m^2$  (item 4.1.1).

Essa constatação confirma a validade de utilização da expressão de Hazen para estimar a permeabilidade ao ar da brita 2, que é a brita que foi utilizada nos tapetes sob as lajes de piso do edifício Módulo Inicial (IPT, 2009).

#### 4.1.3 Cálculo de $k_a$ da brita 2 pela expressão de Hazen

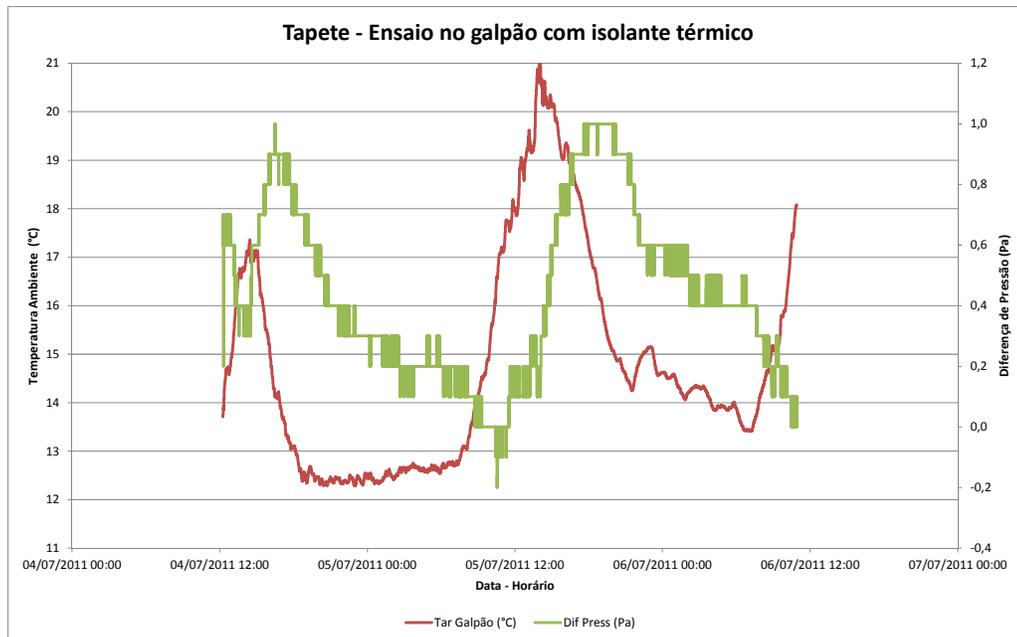
$$k_w = 100(2)^2 = 400 \text{ cm/s} = 4 \text{ m/s}$$

A partir do coeficiente de permeabilidade à água,  $k_w$ , considerando-se incompressível o fluxo de ar, pode-se obter o coeficiente de permeabilidade ao ar,  $k_a$ , pela equação (item 3.1.2.2 acima):

$$k_a = 0,1 \cdot k_w = 0,1 \times 4 = 0,4 \text{ m/s}$$

## 4.2 Distribuição de pressões no “tapete” de brita – ensaio em protótipo

De forma similar ao verificado nas medições realizadas em caixote de dimensões reduzidas para se determinar a permeabilidade ao ar do leito de brita, as medições de gradiente de pressão foram fortemente afetadas pela temperatura ambiente, como pode ser visto na **Figura 9**, onde são apresentadas a diferença máxima de pressão e a variação de temperatura ambiente, o que ocorreu mesmo após o revestimento do tapete com material isolante térmico.



**Figura 9** – Temperatura do ar ambiente e diferença de pressão entre entrada e saída, medidas em local não climatizado e com uso do isolamento térmico sobre o tapete de brita

Independentemente disso, foram feitas medições em intervalos de tempo curtos, onde o efeito da variação de temperatura pôde ser desprezado. Ainda assim, os resultados obtidos não foram consistentes, uma vez que o gradiente total de pressão medido, entre o final e o início da linha de eixo central do tapete, não foi a soma dos gradientes medidos ao longo de pontos equiespaçados ao longo dessa linha.

Como a vazão é sempre constante, concluiu-se que esses resultados se devem a deformações no caixote de madeira, a problemas localizados de estanqueidade, que se revelaram impossíveis de serem localizados, em suas superfícies devido a falhas de selagem; e ao fato de que as extremidades dos tubos de medição de pressão ficaram muito próximas à superfície da brita, criando elevadas perdas de pressão localizadas.

Durante as medições, a velocidade do ar e, portanto, também a vazão volumétrica, na saída do tapete, foi mantida constante pela bomba de sucção. Essa velocidade foi de, aproximadamente, 1,2 m/s na entrada da bomba.

Devido aos problemas relatados, o experimento em protótipo construído em laboratório não climatizado no IPT, não pôde ser considerado válido.

### **4.3 Escoamento de ar através das Chaminés**

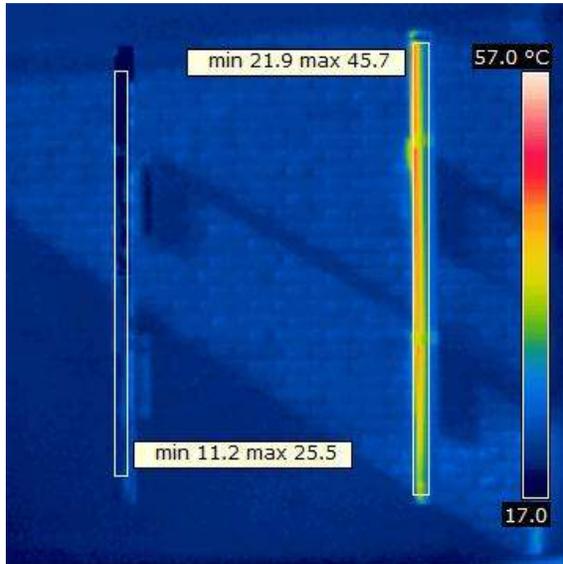
Os resultados apresentados a seguir são representativos de uma série maior obtida nas mesmas condições, mas que não serão todos apresentados por não agregarem informações adicionais.

#### **4.3.1 Temperaturas superficiais da chaminé**

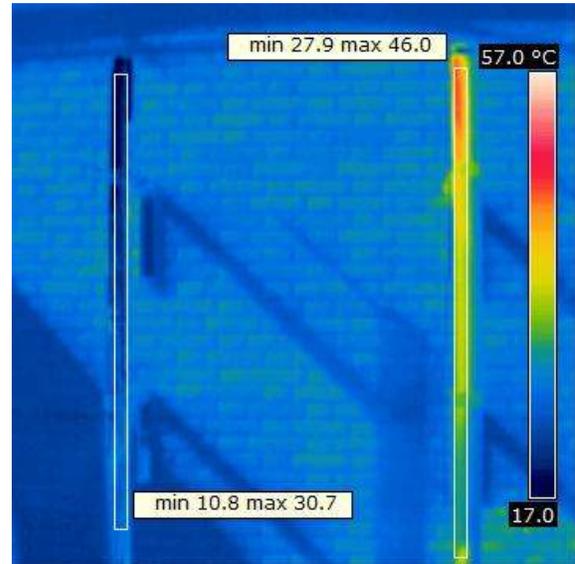
Da **Figura 10** à **Figura 15** são apresentadas, em destaque, as temperaturas superficiais máximas e mínimas da chaminé com acabamento em aço galvanizado (à direita) e em PVC pintado de preto (à esquerda), além da distribuição espacial dessas temperaturas no corpo das citadas chaminés, ao longo do dia 19/07/2011, nos horários em que havia incidência de radiação solar direta sobre elas. Verifica-se que, já nas primeiras horas do dia (9h 30 min), a chaminé pintada de preto atinge temperaturas superficiais elevadas, da ordem 46°C, enquanto que a chaminé galvanizada só atinge esse patamar de temperatura por volta das 14h 30min, ou seja, após, aproximadamente, 6h de exposição ao sol. Isso demonstra que, caso se tenha alta absorção de radiação solar, como na situação da chaminé pintada de preto, rapidamente, em dias de sol, as temperaturas superficiais da chaminé atingem valores elevados, que são favoráveis ao escoamento de ar.

Nessas mesmas figuras, notam-se gradientes de temperatura superficiais elevados no corpo da chaminé pintada de preto, o que obriga o uso de coeficientes de correção empíricos no dimensionamento do sistema proposto.

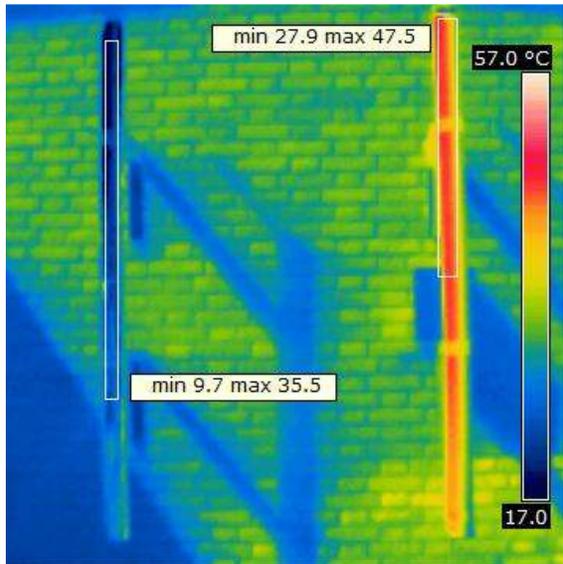
Observa-se, na **Figura 16**, representativa da condição às 15h, momento em que houve o sombreamento das chaminés pelos prédios existentes em frente a elas, que as suas temperaturas superficiais caem rapidamente de patamares da ordem de 56,5°C (valor máximo registrado às 14h30min) para, aproximadamente, 31°C, demonstrando que a baixa inércia térmica do sistema o torna bastante dependente de incidência de radiação solar direta.



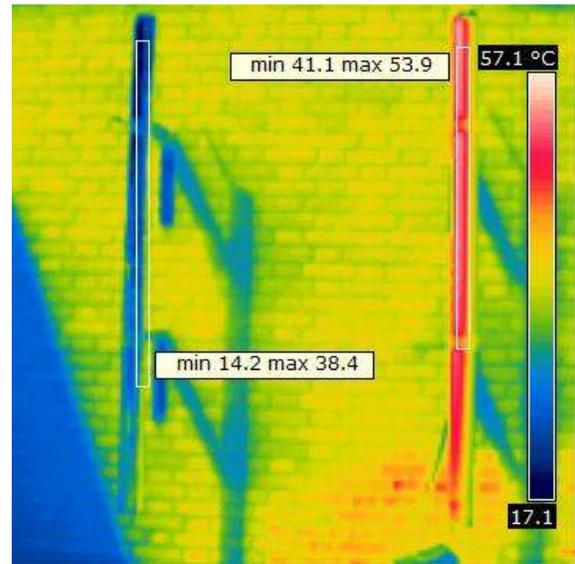
**Figura 10** – Temperaturas superficiais das chaminés com acabamento galvanizado (esquerda) e com acabamento preto (direita) às 9h30min do dia 19/07/2011



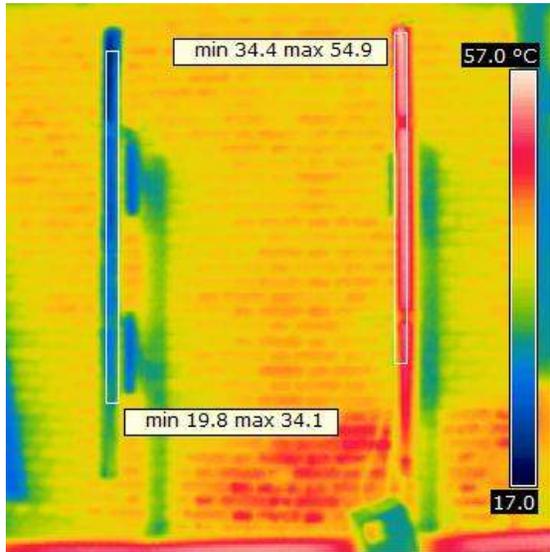
**Figura 11** – Temperaturas superficiais das chaminés com acabamento galvanizado (esquerda) e com acabamento preto (direita) às 10h30min do dia 19/07/2011



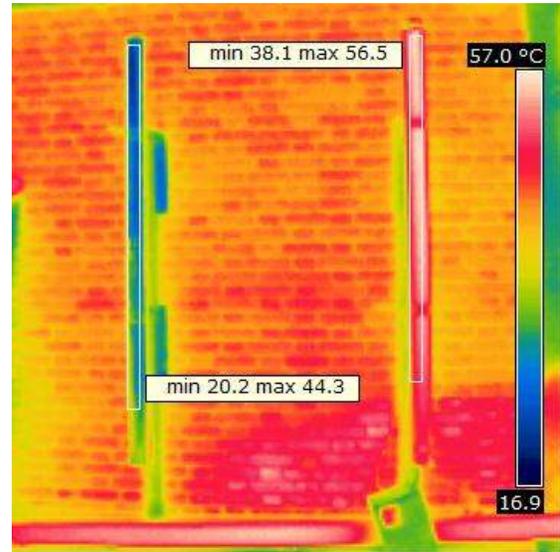
**Figura 12** – Temperaturas superficiais das chaminés com acabamento galvanizado (esquerda) e com acabamento preto (direita) às 11h30min do dia 19/07/2011



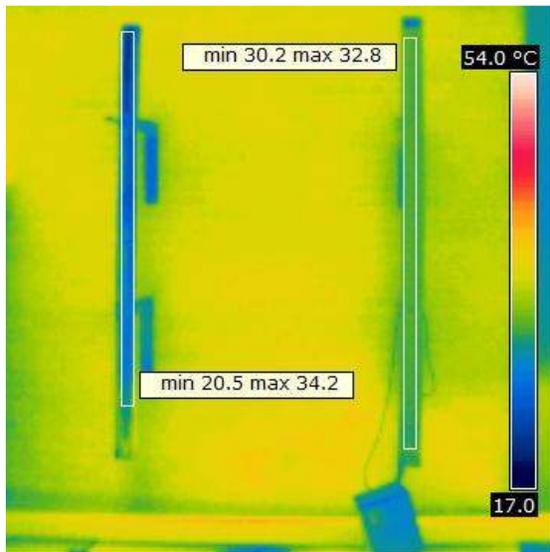
**Figura 13** – Temperaturas superficiais das chaminés com acabamento galvanizado (esquerda) e com acabamento preto (direita) às 12h30min do dia 19/07/2011



**Figura 14** – Temperaturas superficiais das chaminés com acabamento galvanizado (esquerda) e com acabamento preto (direita) às 13h30min do dia 19/07/2011



**Figura 15** – Temperaturas superficiais das chaminés com acabamento galvanizado (esquerda) e com acabamento preto (direita) às 14h30min do dia 19/07/2011

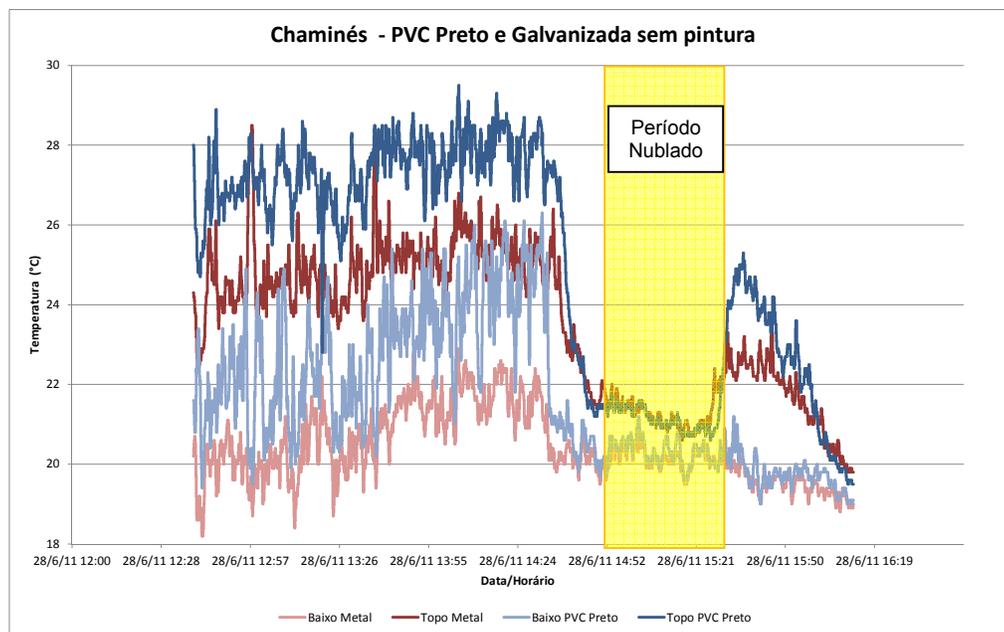


**Figura 16** – Temperaturas superficiais das chaminés com acabamento galvanizado (esquerda) e com acabamento preto (direita) às 15h do dia 19/07/2011

#### 4.3.2 Parâmetros do escoamento através da chaminé

Na **Figura 17** verifica-se que o acabamento superficial na cor preta fosca gerou temperaturas do ar, tanto na saída, como pouco após a entrada do ar no conduto, de

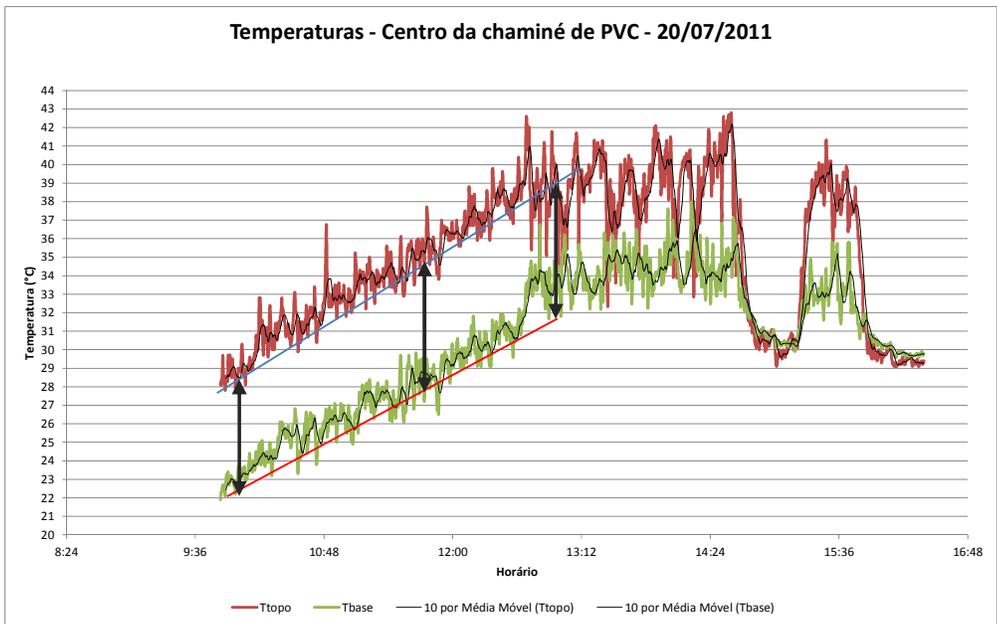
2°C e 3°C, em média, mais elevadas do que as obtidas na chaminé com acabamento galvanizado, durante o período diurno – em que há incidência de radiação solar. As elevações de temperatura, na chaminé com acabamento em preto são da ordem de 5°C, no período de incidência de radiação solar direta. Durante o período em que o céu ficou nublado, o efeito da diferença de acabamentos superficiais praticamente desapareceu, e o aquecimento da corrente de ar foi da ordem de 1°C.



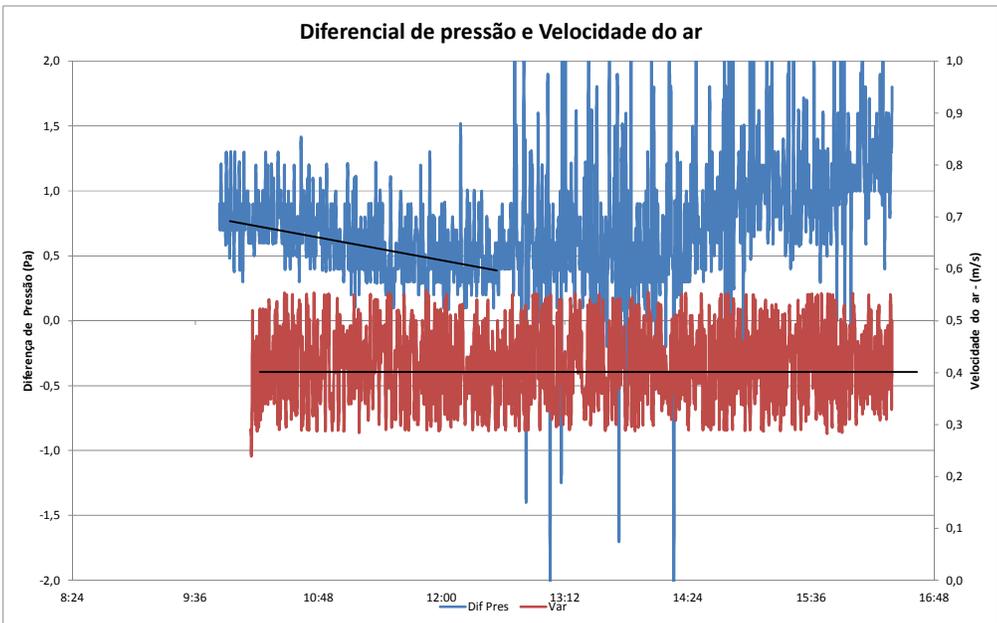
**Figura 17** – Temperatura do ar na entrada (embaixo) e na saída (topo) das chaminés de PVC pintada de preto e em chapa metálica galvanizada

Na **Figura 18** e na **Figura 19** verifica-se que os valores medidos de temperatura, velocidade do ar e diferença de pressão oscilam muito rapidamente. Os valores médios desses parâmetros, usados para determinar os coeficientes de ajuste necessários para o dimensionamento do sistema de exaustão estão apresentados na **Tabela 1**.

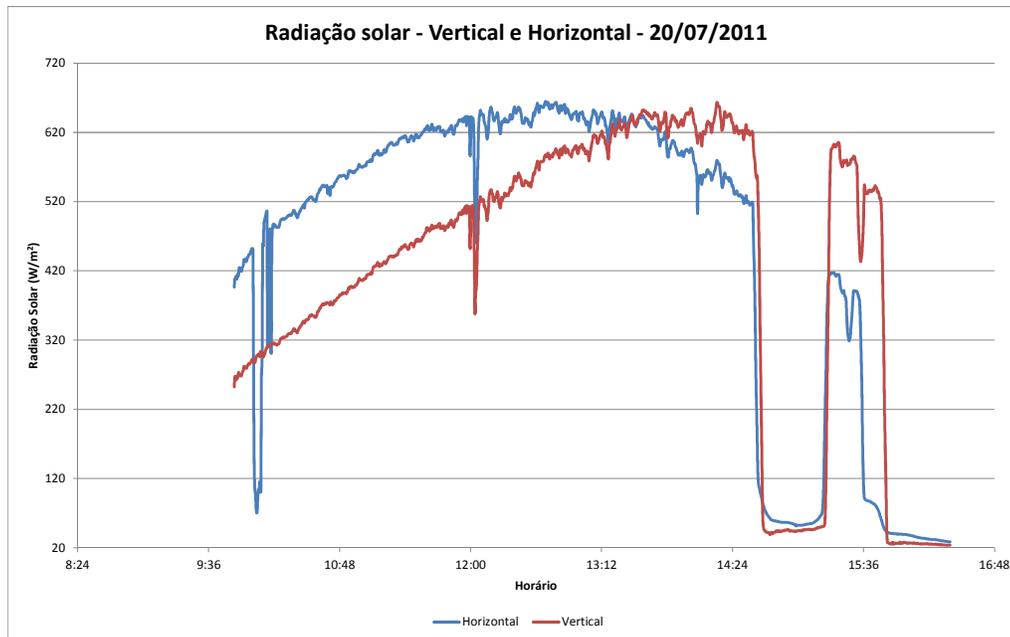
A flutuação é explicada pela variação na radiação solar em plano horizontal e sua correspondente em plano vertical (**Figura 20**) e pelos efeitos de turbilhonamento gerado naturalmente pelo escoamento, conforme discutido no item 5 do presente relatório. Ressalta-se que os valores de radiação solar medidos são típicos de um dia de inverno ensolarado.



**Figura 18** – Temperaturas medidas na base e no topo da chaminé, respectivas médias móveis de 10 leituras e diferença entre as médias, durante as medições no dia 20/07/2011



**Figura 19** – Velocidade do ar medida no topo da chaminé e diferenças de pressão entre a base e o topo da chaminé



**Figura 20** – Radiação solar incidente em plano horizontal e vertical, durante as medições no dia 20/07/2011

**Tabela 1** – Valores médios dos parâmetros do escoamento da corrente de ar ascendente

Grandeza	Valor Médio Obtido
Diferença de Temperatura	6 °C
Diferença de Pressão	0,6 Pa
Velocidade do Ar	0,43 m/s

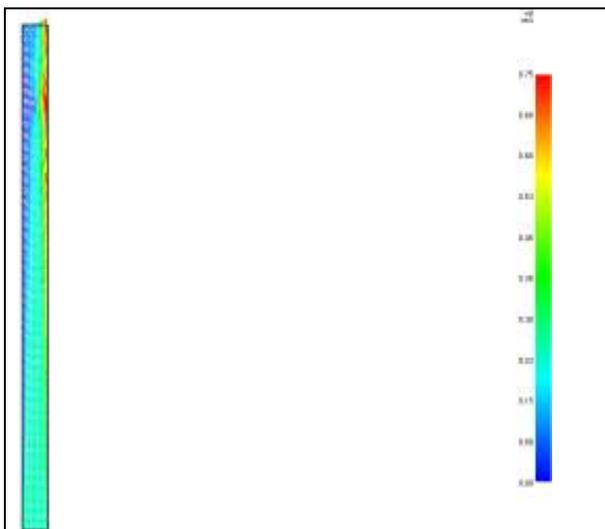
Substituindo, na equação 6 (item 2 acima), os valores apresentados na **Tabela 1**, obtém-se o valor  $\tau = 0,5$  para o coeficiente de perda de carga. Observa-se, ainda, que a diferença de pressão média medida foi aproximadamente 50% maior do que a obtida empregando-se a equação 4. Isso pode ser explicado pelo fato da abordagem tradicional, também adotada aqui, utilizar um valor médio de diferença de temperatura, tanto no tempo, como ao longo da seção transversal da tubulação, fato que não ocorre na prática, conforme ilustrado pelos resultados apresentados na próxima seção do presente relatório. Assim, um fator de correção de 1,5 será adotado para os valores de pressão obtidos com a equação 4.

## 5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE ESCOAMENTO DE AR NA CHAMINÉ

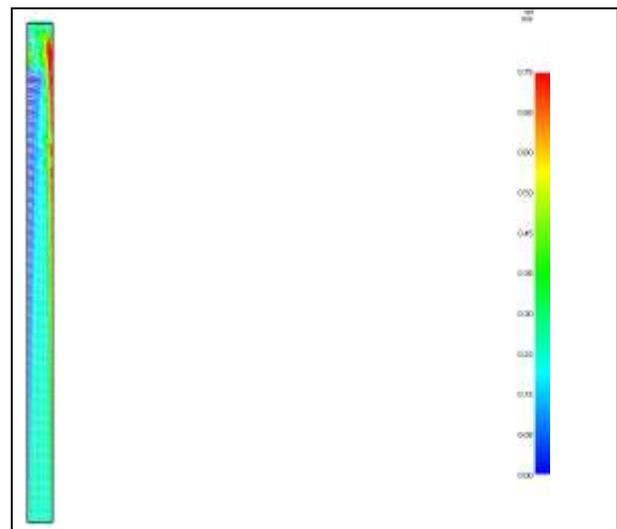
Verificou-se que, devido à incidência de radiação solar em apenas uma das faces da chaminé, o escoamento de ar é fortemente assimétrico em seu interior. No topo da chaminé, ocorrem velocidades do ar mais elevadas junto à essa face aquecida, da ordem de 0,8 m/s, e velocidades muito mais baixas na face oposta, como pode ser visto na **Figura 21**. Já, na base da chaminé, o escoamento é bem mais homogêneo em toda a seção. Verifica-se, na **Figura 22**, que, devido aos efeitos de atrito viscoso na face aquecida da chaminé ocorrem descolamentos do escoamento, recirculações e turbilhonamentos ao longo da altura da chaminé, que causam gradientes de pressão ao longo da sua altura. Detalhes desses fenômenos podem ser vistos na **Figura 23** e na **Figura 24**.

Esse processo de descolamento é, aproximadamente, periódico, ocorrendo, aproximadamente, a cada 30 segundos. Esse comportamento explica as flutuações de velocidade e pressão medidas, apresentadas na **Figura 19**.

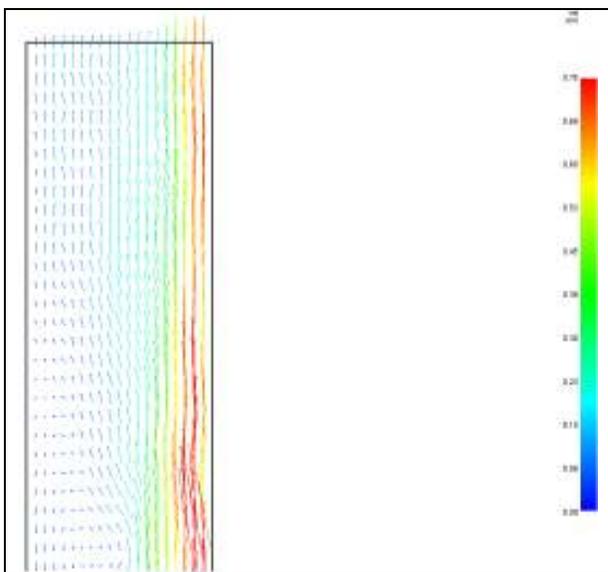
Esse processo de descolamento causa, também, flutuações na temperatura do ar no topo da chaminé, que acompanham os vetores de velocidade, que, juntamente com flutuações na radiação solar, explicam as flutuações registradas na **Figura 18**.



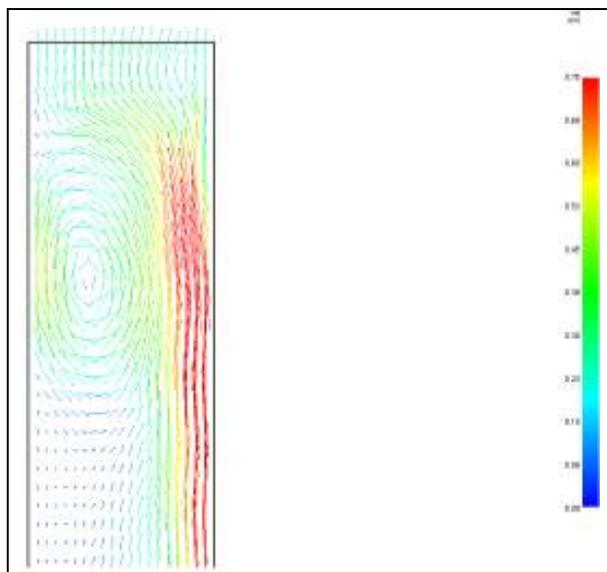
**Figura 21** – Vetores de velocidade (m/s), no instante  $t=48s$ , ao longo do corpo da chaminé



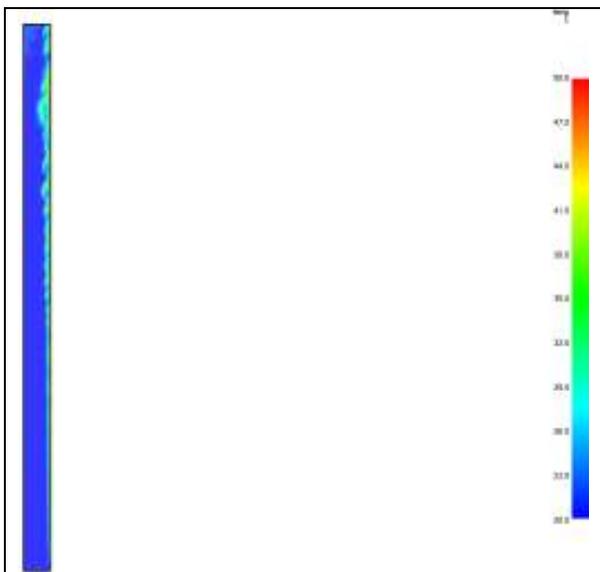
**Figura 22** – Vetor de velocidade (m/s), no instante  $t=82s$ , ao longo do corpo da chaminé



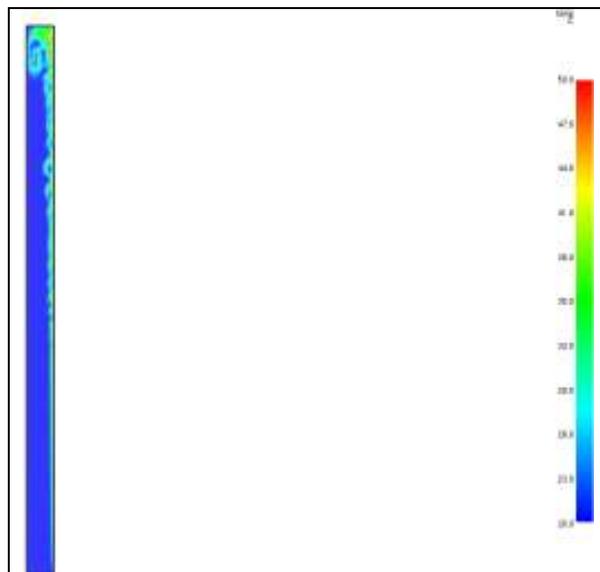
**Figura 23** – Detalhes dos vetores de velocidade (m/s), no instante t=48s, na saída da chaminé



**Figura 24** – Detalhes dos vetores de velocidade (m/s), no instante t=82s, na saída da chaminé



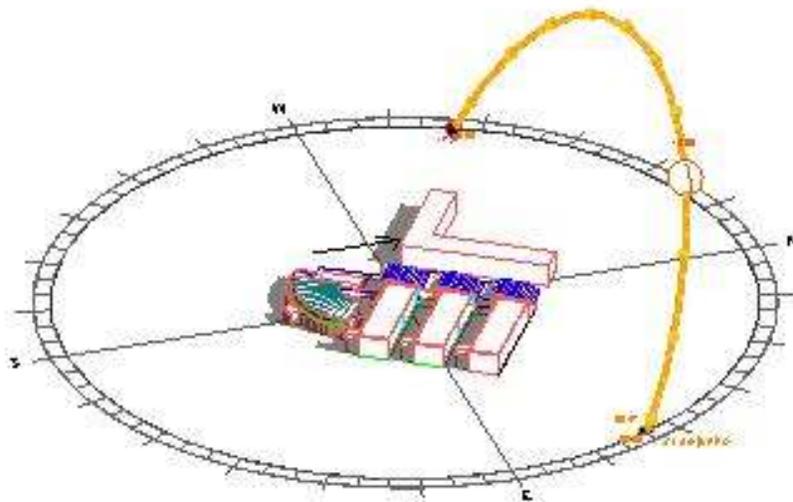
**Figura 25** – Temperatura (°C) da corrente de ar ascendente, instante t=48s, ao longo do corpo da chaminé



**Figura 26** – Temperatura (°C) da corrente de ar ascendente, instante t=48s, ao longo do corpo da chaminé

## 6 DISPONIBILIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR ENTRE OS PRÉDIOS

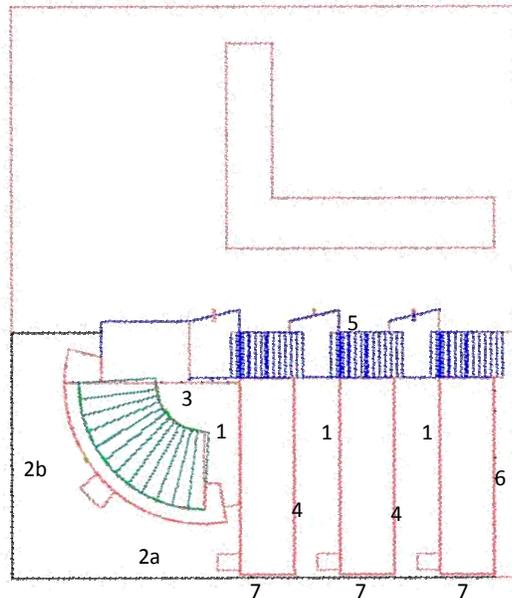
A disponibilidade de radiação solar direta é função do número de horas de sol a que as fachadas estão expostas. Na **Figura 27**, é apresentada, a título ilustrativo, a projeção de sombras que irá ocorrer nas fachadas dos edifícios Módulo Inicial e seu vizinho imediato, na EACH-USP. Figuras como essas foram construídas para todas as horas do dia, para os solstícios de verão, de inverno e para os equinócios. O número de horas de plena incidência de sol nas fachadas é apresentado na **Tabela 2**. Na **Figura 28**, é apresentada a nomenclatura dada às fachadas. Verifica-se que, em, praticamente todas as fachadas, há boa incidência de radiação solar durante várias horas do dia e do ano, com exceção da fachada 2a, sobre a qual não há incidência de radiação solar no solstício de inverno, e de menos de uma hora, no período entre os equinócios. As chaminés instaladas nessa fachada 2a serão efetivas durante o período de verão.



**Figura 27** – Representação da trajetória aparente do sol e sombras projetadas nas fachadas dos edifícios da EACH-USP.

**Tabela 2** - Insolação das paredes das fachadas dos prédios da EACH-USP

Parede	Data	Fração onde bate sol	Data	Fração onde bate sol	Data	Fração onde bate sol
	21/mar		21/dez		21/jun	
1	14 às 16	toda a parede	13 às 15	toda a parede	14 às 16	2/3 (horizontais) em direção à parede 7
	16 às 17	1/3 superior	16 às 17	1/3 superior		
2a	--	não bate sol	6 às 9	2/3 (horizontais) em relação à protuberância	--	não bate sol
			9 às 11	toda a parede		
2b	14 às 15	2/3 (horizontais) da parede prox. bloco serviços	13 às 18	toda a parede	15 às 16	1/3 (horizontal) prox. bloco serviços
	15 às 18	toda a parede			17 às 18	2/3 (horizontal) prox. bloco serviços
3	9 às 10	2/3 (horizontais) da parede prox. auditório	8 às 9	1/3 (horizontal) da parede prox. auditório	--	não bate sol
			9 às 12	2/3 (horizontais) da parede prox. auditório		
4	8 às 9	1/3 da superior	9 às 12	toda a parede	9 às 10	1/3 superior
	9 às 13	toda a parede			10 às 13	2/3 (horizontais) em direção à parede 7
5	11 às 14	toda a parede	13 às 15	toda a parede	8 às 10	1/3 (horizontal) em relação à parede 6
					13 às 14	parede toda
6	8 às 13	toda a parede, exceto parte do bloco de serviços	8 às 12	toda a parede, exceto parte do bloco de serviços	6 às 11	toda a parede
--	--	--	--	--	11 às 13	toda a parede, exceto parte do bloco de serviços
7	7 às 10	toda a parede	7 às 12	toda a parede	6 às 7	toda a parede



**Figura 28** – Nomenclatura dada às fachadas dos edifícios da EACH-USP para efeito do estudo de disponibilidade de radiação solar.

## 7 SIMULAÇÕES DO ESCOAMENTO DE AR NOS TAPETES DE BRITA

As soluções propostas de ventilação de cada tapete de brita existente sob as lajes de piso do Edifício Módulo Inicial, indicadas no Relatório Técnico do IPT Nº 112 640-205, de junho de 2009 (IPT, 2009), compreendem perfurações de exaustão de ar, de um lado do tapete, juntamente com perfurações de captação de ar atmosférico, do lado oposto do tapete.

No presente trabalho, foram efetuadas simulações por software (Visual ModFlow), com o intuito de verificar qual seria o menor número e as melhores posições das perfurações que atenderiam ao objetivo de ventilação adequada dos tapetes.

As simulações foram efetuadas para traçar as redes de fluxo e determinar as direções e magnitudes das velocidades do ar no interior dos tapetes.

As simulações foram efetuadas para os dez tipos de tapete identificados no item 3.3 do presente relatório, e para várias configurações de furos nas lajes, estando as escolhidas apresentadas nos itens 7.1 a 7.10, a seguir, e nos **Desenhos B1 a B10, Anexo B**.

Os parâmetros de entrada para as simulações foram (item 3.3.2 acima):

- Coeficiente de permeabilidade ao ar da brita 2:  $k_a = 0,4$  m/s
- Porosidade da brita 2: 0,5
- Pressão disponível para cada tapete, para o acréscimo de temperatura típico de 6 °C observado nos ensaios (depende da altura da respectiva chaminé e da perda de carga entre o tapete e a chaminé): ver itens 7.1 a 7.10 abaixo
- Vazão máxima de cada chaminé de 9 m de altura, para o acréscimo de temperatura típico de 6 °C observado nos ensaios (indicadas em amarelo nos Desenhos A1 a A9): 26,7 m<sup>3</sup>/h
- Vazão máxima de cada chaminé de 6 m de altura, para o acréscimo de temperatura típico de 6 °C observado nos ensaios (indicadas em roxo nos Desenhos A1 a A9): 21,8 m<sup>3</sup>/h
- Diâmetro dos furos para ventilação nas lajes: 10 cm
- Diâmetro dos tubos de conexão entre os furos nas lajes e as chaminés: 10 cm
- Diâmetro das chaminés: 10 cm

A pressão manométrica de sucção,  $\Delta P$ , fornecida pela chaminé a cada tapete, depende, além da temperatura, da altura da chaminé e das perdas de carga ao longo das tubulações de exaustão e de captação que compõem o sistema de cada tapete de brita.

Obviamente, a vazão realmente atingida na chaminé deve ser igual à que atravessa o tapete de brita, desde que o fluxo seja incompressível, e menor que a máxima possível, já que está limitada pela própria resistência do tapete ao fluxo. As vazões e os tempos de renovação do ar dos poros de cada tapete estão apresentados nos itens 7.1 a 7.10, a seguir, e nos **Desenhos B1 a B10, Anexo B**.

Os cálculos foram feitos com base na elevação de temperatura de maior ocorrência (situação mais desfavorável) nos ensaios em chaminés efetuados no IPT (6 °C), para a situação em que todo o comprimento da chaminé está ao sol. Deve-se

lembrar que, no caso em que a chaminé encontre-se apenas parcialmente ensolarada, o sistema também funcionará, com pressão de sucção menor.

## 7.1 Simulações para o Tapete Tipo T1

O Tapete tipo T1 corresponde aos tapetes L3 a L8 e L25 a L30 dos Blocos Padrões (ver item 3.3 deste texto), apresentando as dimensões 3,40x9,00 m, em planta.

A chaminé de 9 m de altura fornece a pressão manométrica de sucção, descontadas as perdas de carga nas tubulações,  $\Delta P = 1,7$  Pa, que, expressa em altura de coluna de ar,  $\Delta H_a$ , disponível para os tapetes tipo T1, vale:

$$\Delta H_a = \frac{\Delta P}{\rho_a \cdot g} = \frac{1,7}{1,196 \times 9,81} \cong 0,17 \text{ m}$$

onde:

$\rho_a$ : densidade do ar (1,196 kg/m<sup>3</sup>) (101 kPa e 20 °C)

$g$ : aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>)

O volume de ar no tapete de brita Tipo T1 (porosidade 0,5) é  $0,5(3,40 \times 9,00 \times 0,05) = 0,77 \text{ m}^3$ .

Como a vazão de ar na saída do tapete, indicada pela simulação, é de 2,9 m<sup>3</sup>/h, o tempo para renovação total do ar nos poros do Tapete Tipo T1 vale  $0,77/2,9 = 0,27 \text{ h} \cong 16$  minutos.

O **Desenho B1, Anexo B**, apresenta a rede de fluxo de ar gerada, para a melhor distribuição de perfurações de exaustão e captação de ar atmosférico, juntamente com os valores de velocidade mínima e máxima, vazão de ar, volume de poros, e tempo de renovação total do ar no interior dos tapetes de brita tipo T1, obtidos nas simulações.

A **Tabela 3** apresenta os valores de velocidade mínima e máxima, vazão de ar, volume de poros, e tempo de renovação total do ar no interior dos tapetes de brita tipo T1.

**Tabela 3** - Resultados obtidos por simulação para o tapete tipo T1

Parâmetro	Módulo (m/s)	Posição X (m)	Posição Y (m)
Velocidade mínima	$2,25 \times 10^{-3}$	8,99	3,18
Velocidade máxima	$6,44 \times 10^{-2}$	0,09	1,58
Vazão de ar	2,9 m <sup>3</sup> /h		
Volume de poros	0,77 m <sup>3</sup>		
Tempo de renovação do ar no tapete	16 minutos		

## 7.2 Simulações para o Tapete Tipo T2

O Tapete tipo T2 corresponde aos tapetes L5, L7, L29, L31, L45 E L47 do Auditório (ver item 3.3 deste texto), apresentando a forma indicada nos Desenhos A4, A5 e A6, do Anexo A.

A chaminé de 6 m de altura fornece a pressão manométrica de sucção, descontadas as perdas de carga nas tubulações,  $\Delta P = 0,35$  Pa, que, expressa em altura de coluna de ar,  $\Delta H_a$ , disponível para os tapetes tipo T2, vale:

$$\Delta H_a = \frac{\Delta P}{\rho_a \cdot g} = \frac{0,35}{1,196 \times 9,81} \cong 0,1. \Delta P = 0,035 \text{ m}$$

onde:

$\rho_a$ : densidade do ar ( $1,196 \text{ kg/m}^3$ ) (101 kPa e 20 °C)

$g$ : aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

A área, em planta, do tapete de brita Tipo T2 (retirada do desenho em escala) é  $50,25 \text{ m}^2$ , donde o volume de ar vale  $0,5(50,25 \times 0,05) = 1,26 \text{ m}^3$ .

Como a vazão de ar na saída do tapete, indicada pela simulação, é de  $0,62 \text{ m}^3/\text{h}$ , o tempo para renovação total do ar nos poros do Tapete Tipo T2 vale  $1,26/0,62 \cong 2$  horas.

O **Desenho B2, Anexo B**, apresenta a rede de fluxo de ar gerada, para a melhor distribuição de perfurações de exaustão e captação de ar atmosférico, juntamente com os valores de velocidade mínima e máxima, vazão de ar, volume de poros, e tempo de renovação total do ar no interior dos tapetes de brita tipo T2, obtidos nas simulações.

A Tabela 4 apresenta os valores de velocidade mínima e máxima, vazão de ar, volume de poros, e tempo de renovação total do ar no interior dos tapetes de brita tipo T2.

**Tabela 4:** Resultados obtidos por simulação para o tapete tipo T2

Parâmetro	Módulo (m/s)	Posição X (m)	Posição Y (m)
Velocidade mínima	$6,5 \times 10^{-5}$	0	2,33
Velocidade máxima	$1,0 \times 10^{-2}$	14,2	0,30
Vazão de ar	0,62 m <sup>3</sup> /h		
Volume de poros	1,26 m <sup>3</sup>		
Tempo de renovação do ar no tapete	2 horas		

### 7.3 Simulações para o Tapete Tipo T3

O Tapete tipo T3 corresponde aos tapetes L23, L24, L47 a L50, do Corredor de Serviço – Adicional, Módulo 1 e Terraço apresentando dimensões em planta de aproximadamente 5,70x6,30 m.

A chaminé de 9 m de altura fornece a pressão manométrica de sucção, descontadas as perdas de carga nas tubulações,  $\Delta P = 1,7$  Pa, que, expressa em altura de coluna de ar,  $\Delta H_a$ , disponível para os tapetes tipo T3, vale:

$$\Delta H_a = \frac{\Delta P}{\rho_a \cdot g} = \frac{1,7}{1,196 \times 9,81} \cong 0,1. \Delta P = 0,17 \text{ m}$$

onde:

$\rho_a$ : densidade do ar (1,196 kg/m<sup>3</sup>) (101 kPa e 20 °C)

$g$ : aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>)

O volume de ar no tapete de brita Tipo T3 (porosidade 0,5) é  $0,5(5,70 \times 6,30 \times 0,05) = 0,90 \text{ m}^3$ .

Como a vazão de ar na saída do tapete, indicada pela simulação, é de  $3,0 \text{ m}^3/\text{h}$ , o tempo para renovação total do ar nos poros do Tapete Tipo T3 vale  $0,77/2,9 = 0,3 \text{ h} \cong 18 \text{ minutos}$ .

O **Desenho B3, Anexo B**, apresenta a rede de fluxo de ar gerada, para a melhor distribuição de perfurações de exaustão e captação de ar atmosférico, juntamente com os valores de velocidade mínima e máxima, vazão de ar, volume de poros, e tempo de renovação total do ar no interior dos tapetes de brita tipo T3, obtidos nas simulações.

A **Tabela 5** apresenta os valores de velocidade mínima e máxima, vazão de ar, volume de poros, e tempo de renovação total do ar no interior dos tapetes de brita tipo T3.

**Tabela 5** - Resultados obtidos por simulação para o tapete tipo T3

Parâmetro	Módulo (m/s)	Posição X (m)	Posição Y (m)
Velocidade mínima	$7,7 \times 10^{-5}$	5,0	6,16
Velocidade máxima	$9,4 \times 10^{-2}$	0,2	6,0
Vazão de ar	3,0 $\text{m}^3/\text{h}$		
Volume de poros	0,90 $\text{m}^3$		
Tempo de renovação do ar no tapete	18 minutos		

#### 7.4 Simulações para o Tapete Tipo T4

O Tapete tipo T4 corresponde aos tapetes L6, L30 e L46 do Auditório, apresentando a forma indicada nos Desenhos A4, A5 e A6, do Anexo A.

A chaminé de 6 m de altura fornece a pressão manométrica de sucção, descontadas as perdas de carga nas tubulações,  $\Delta P = 0,35 \text{ Pa}$ , que, expressa em altura de coluna de ar,  $\Delta H_a$ , disponível para os tapetes tipo T4, vale:

$$\Delta H_a = \frac{\Delta P}{\rho_a \cdot g} = \frac{0,35}{1,196 \times 9,81} \cong 0,1. \Delta P = 0,035 \text{ m}$$

onde:

$\rho_a$ : densidade do ar ( $1,196 \text{ kg/m}^3$ ) (101 kPa e  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ )

$g$ : aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

A área, em planta, do tapete de brita Tipo T4 (retirada do desenho em escala), é  $42,50 \text{ m}^2$ , donde o volume de ar vale  $0,5(42,50 \times 0,05) = 1,06 \text{ m}^3$ .

Como a vazão de ar na saída do tapete, indicada pela simulação, é de  $0,58 \text{ m}^3/\text{h}$ , o tempo para renovação total do ar nos poros do Tapete Tipo T4 vale  $1,06/0,58 \cong 2$  horas.

O **Desenho B4, Anexo B**, apresenta a rede de fluxo de ar gerada, para a melhor distribuição de perfurações de exaustão e captação de ar atmosférico, juntamente com os valores de velocidade mínima e máxima, vazão de ar, volume de poros, e tempo de renovação total do ar no interior dos tapetes de brita tipo T4, obtidos nas simulações.

A **Tabela 6** apresenta os valores de velocidade mínima e máxima, vazão de ar, volume de poros, e tempo de renovação total do ar no interior dos tapetes de brita tipo T4.

**Tabela 6** - Resultados obtidos por simulação para o tapete tipo T4

Parâmetro	Módulo (m/s)	Posição X (m)	Posição Y (m)
Velocidade mínima	$2,9 \times 10^{-4}$	13,3	2,41
Velocidade máxima	$8,9 \times 10^{-3}$	13,10	2,31
Vazão de ar	$0,58 \text{ m}^3/\text{h}$		
Volume de poros	$1,06 \text{ m}^3$		
Tempo de renovação do ar no tapete	2 horas		

## 7.5 Simulações para o Tapete Tipo T5

O Tapete tipo T5 corresponde aos tapetes L1, L25 e L41 do Auditório, (ver item 3.3 deste texto), apresentando a forma indicada nos Desenhos A4, A5 e A6, do Anexo A.

A chaminé de 9 m de altura fornece a pressão manométrica de sucção, descontadas as perdas de carga nas tubulações,  $\Delta P = 1,7$  Pa, que, expressa em altura de coluna de ar,  $\Delta H_a$ , disponível para os tapetes tipo T5, vale:

$$\Delta H_a = \frac{\Delta P}{\rho_a \cdot g} = \frac{1,7}{1,196 \times 9,81} \cong 0,1. \Delta P = 0,17 \text{ m}$$

onde:

$\rho_a$ : densidade do ar ( $1,196 \text{ kg/m}^3$ ) ( $101 \text{ kPa}$  e  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ )

$g$ : aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

A área, em planta, do tapete de brita Tipo T5 (retirada do desenho em escala) é  $53,66 \text{ m}^2$ , donde o volume de ar vale  $0,5(53,66 \times 0,05) = 1,34 \text{ m}^3$ .

Como a vazão de ar na saída do tapete, indicada pela simulação, é de  $7,81 \text{ m}^3/\text{h}$ , o tempo para renovação total do ar nos poros do Tapete Tipo T5 vale  $1,34/7,81 = 0,17 \text{ h} \cong 10$  minutos.

O **Desenho B5, Anexo B**, apresenta a rede de fluxo de ar gerada, para a melhor distribuição de perfurações de exaustão e captação de ar atmosférico, juntamente com os valores de velocidade mínima e máxima, vazão de ar, volume de poros, e tempo de renovação total do ar no interior dos tapetes de brita tipo T5, obtidos nas simulações.

A **Tabela 7** apresenta os valores de velocidade mínima e máxima, vazão de ar, volume de poros, e tempo de renovação total do ar no interior dos tapetes de brita tipo T5.

**Tabela 7-** Resultados obtidos por simulação para o tapete tipo T5

Parâmetro	Módulo (m/s)	Posição X (m)	Posição Y (m)
Velocidade mínima	$3,7 \times 10^{-4}$	10,25	4,15
Velocidade máxima	$1,5 \times 10^{-1}$	4,95	3,83
Vazão de ar	7,81 m <sup>3</sup> /h		
Volume de poros	1,34 m <sup>3</sup>		
Tempo de renovação do ar no tapete	10 minutos		

## 7.6 Simulações para o Tapete Tipo T6

O Tapete tipo T6 corresponde aos tapetes de acesso às salas dos blocos padrões, apresentando as dimensões de aproximadamente 2,50x21,60 m, em planta.

A chaminé de 9 m de altura fornece a pressão manométrica de sucção, descontadas as perdas de carga nas tubulações,  $\Delta P = 1,7$  Pa, que, expressa em altura de coluna de ar,  $\Delta H_a$ , disponível para os tapetes tipo T6, vale:

$$\Delta H_a = \frac{\Delta P}{\rho_a \cdot g} = \frac{1,7}{1,196 \times 9,81} \cong 0,17 \text{ m}$$

onde:

$\rho_a$ : densidade do ar (1,196 kg/m<sup>3</sup>) (101 kPa e 20 °C)

$g$ : aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>)

O volume de ar no tapete de brita Tipo T6 (porosidade 0,5) é  $0,5(2,50 \times 21,60 \times 0,05) = 1,35 \text{ m}^3$ .

Como a vazão de ar na saída do tapete, indicada pela simulação, é de 1,1 m<sup>3</sup>/h, o tempo para renovação total do ar nos poros do Tapete Tipo T6 vale  $1,35/1,1 = 1,23 \text{ h} \cong 1 \text{ hora e } 14 \text{ minutos}$ .

O **Desenho B6, Anexo B**, apresenta a rede de fluxo de ar gerada, para a melhor distribuição de perfurações de exaustão e captação de ar atmosférico, juntamente com

os valores de velocidade mínima e máxima, vazão de ar, volume de poros, e tempo de renovação total do ar no interior dos tapetes de brita tipo T6, obtidos nas simulações.

A **Tabela 8** apresenta os valores de velocidade mínima e máxima, vazão de ar, volume de poros, e tempo de renovação total do ar no interior dos tapetes de brita tipo T6.

**Tabela 8-** Resultados obtidos por simulação para o tapete tipo T6

Parâmetro	Módulo (m/s)	Posição X (m)	Posição Y (m)
Velocidade mínima	$4,79 \times 10^{-5}$	22,64	2,55
Velocidade máxima	$3,44 \times 10^{-2}$	22,40	0,15
Vazão de ar	1,1 m <sup>3</sup> /h		
Volume de poros	1,35 m <sup>3</sup>		
Tempo de renovação do ar no tapete	1 hora e 14 minutos		

## 7.7 Simulações para o Tapete Tipo T7

O Tapete tipo T7 corresponde aos tapetes L1, L21 e L22 do Corredor de Serviço – Adicional, Módulo 1 e Terraço, apresentando dimensões em planta de aproximadamente 4,40x12,00 m.

A chaminé de 9 m de altura fornece a pressão manométrica de sucção, descontadas as perdas de carga nas tubulações,  $\Delta P = 1,7$  Pa, que, expressa em altura de coluna de ar,  $\Delta H_a$ , disponível para os tapetes tipo T7, vale:

$$\Delta H_a = \frac{\Delta P}{\rho_a \cdot g} = \frac{1,7}{1,196 \times 9,81} \cong 0,1. \Delta P = 0,17 \text{ m}$$

onde:

$\rho_a$ : densidade do ar (1,196 kg/m<sup>3</sup>) (101 kPa e 20 °C)

$g$ : aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>)

O volume de ar no tapete de brita Tipo T7 (porosidade 0,5) é  $0,5(4,40 \times 12,00 \times 0,05) = 1,32 \text{ m}^3$ .

Como a vazão de ar na saída do tapete, indicada pela simulação, é de 2,19 m<sup>3</sup>/h, o tempo para renovação total do ar nos poros do Tapete Tipo T1 vale  $1,32/2,19 = 0,60$  h  $\cong$  36 minutos.

O **Desenho B7, Anexo B**, apresenta a rede de fluxo de ar gerada, para a melhor distribuição de perfurações de exaustão e captação de ar atmosférico, juntamente com os valores de velocidade mínima e máxima, vazão de ar, volume de poros, e tempo de renovação total do ar no interior dos tapetes de brita tipo T7, obtidos nas simulações.

A **Tabela 9** apresenta os valores de velocidade mínima e máxima, vazão de ar, volume de poros, e tempo de renovação total do ar no interior dos tapetes de brita tipo T7.

**Tabela 9** - Resultados obtidos por simulação para o tapete tipo T7

Parâmetro	Módulo (m/s)	Posição X (m)	Posição Y (m)
Velocidade mínima	$6,5 \times 10^{-4}$	0,01	0,29
Velocidade máxima	$6,2 \times 10^{-2}$	11,60	0,07
Vazão de ar	2,19 m <sup>3</sup> /h		
Volume de poros	1,32 m <sup>3</sup>		
Tempo de renovação do ar no tapete	36 minutos		

## 7.8 Simulações para o Tapete Tipo T8

O Tapete tipo T8 corresponde aos tapetes L8 e L31 do Corredor de Serviço – Adicional, Módulo 1 e Terraço, apresentando as dimensões em planta indicadas nos Desenhos A8 e A9, Anexo A.

A chaminé de 9 m de altura fornece a pressão manométrica de sucção, descontadas as perdas de carga nas tubulações,  $\Delta P = 1,7$  Pa, que, expressa em altura de coluna de ar,  $\Delta H_a$ , disponível para os tapetes tipo T8, vale:

$$\Delta H_a = \frac{\Delta P}{\rho_a \cdot g} = \frac{1,7}{1,196 \times 9,81} \cong 0,15 \text{ m}$$

onde:

$\rho_a$ : densidade do ar ( $1,196 \text{ kg/m}^3$ ) ( $101 \text{ kPa}$  e  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ )

$g$ : aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

A área, em planta, do tapete de brita Tipo T8 (retirada do desenho em escala) é  $11,51 \text{ m}^2$ , donde o volume de ar vale  $0,5(11,51 \times 0,05) = 0,29 \text{ m}^3$ .

Como a vazão de ar na saída do tapete, indicada pela simulação, é de  $3,55 \text{ m}^3/\text{h}$ , o tempo para renovação total do ar nos poros do Tapete Tipo T4 vale  $0,29/3,55 = 0,08 \text{ h} \cong 5 \text{ minutos}$ .

O **Desenho B8, Anexo B**, apresenta a rede de fluxo de ar gerada, para a melhor distribuição de perfurações de exaustão e captação de ar atmosférico, juntamente com os valores de velocidade mínima e máxima, vazão de ar, volume de poros, e tempo de renovação total do ar no interior dos tapetes de brita tipo T8, obtidos nas simulações.

A **Tabela 10** apresenta os valores de velocidade mínima e máxima, vazão de ar, volume de poros, e tempo de renovação total do ar no interior dos tapetes de brita tipo T8.

**Tabela 10** - Resultados obtidos por simulação para o tapete tipo T8

Parâmetro	Módulo (m/s)	Posição X (m)	Posição Y (m)
Velocidade mínima	$1,9 \times 10^{-3}$	3,44	3,58
Velocidade máxima	$8,0 \times 10^{-2}$	0,08	2,00
Vazão de ar	$3,55 \text{ m}^3/\text{h}$		
Volume de poros	$0,29 \text{ m}^3$		
Tempo de renovação do ar no tapete	5 minutos		

## 7.9 Simulações para o Tapete Tipo T9

O Tapete tipo T9 corresponde aos tapetes L32 e L56 do Corredor de Serviço – Adicional, Módulo 1 e Terraço, apresentando as dimensões em planta indicadas nos Desenhos A7 e A8, Anexo A.

A chaminé de 9 m de altura fornece a pressão manométrica de sucção, descontadas as perdas de carga nas tubulações,  $\Delta P = 1,7$  Pa, que, expressa em altura de coluna de ar,  $\Delta H_a$ , disponível para os tapetes tipo T9, vale:

$$\Delta H_a = \frac{\Delta P}{\rho_a \cdot g} = \frac{1,7}{1,196 \times 9,81} \cong 0,1. \Delta P = 0,17 \text{ m}$$

onde:

$\rho_a$ : densidade do ar ( $1,196 \text{ kg/m}^3$ ) (101 kPa e  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ )

$g$ : aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

A área, em planta, do tapete de brita Tipo T9 (retirada do desenho em escala) é  $25,76 \text{ m}^2$ , donde o volume de ar vale  $0,5(25,76 \times 0,05) = 0,64 \text{ m}^3$ .

Como a vazão de ar na saída do tapete, indicada pela simulação, é de  $2,87 \text{ m}^3/\text{h}$ , o tempo para renovação total do ar nos poros do Tapete Tipo T9 vale  $0,64/2,87 = 0,22 \text{ h} \cong 14$  minutos.

O **Desenho B9, Anexo B**, apresenta a rede de fluxo de ar gerada, para a melhor distribuição de perfurações de exaustão e captação de ar atmosférico, juntamente com os valores de velocidade mínima e máxima, vazão de ar, volume de poros, e tempo de renovação total do ar no interior dos tapetes de brita tipo T9, obtidos nas simulações.

A **Tabela 11** apresenta os valores de velocidade mínima e máxima, vazão de ar, volume de poros, e tempo de renovação total do ar no interior dos tapetes de brita tipo T9.

**Tabela 11-** Resultados obtidos por simulação para o tapete tipo T9

Parâmetro	Módulo (m/s)	Posição X (m)	Posição Y (m)
Velocidade mínima	$6,0 \times 10^{-4}$	0,0	4,99
Velocidade máxima	$8,8 \times 10^{-2}$	0,25	0,12
Vazão de ar	2,87 $\text{m}^3/\text{h}$		
Volume de poros	0,64 $\text{m}^3$		
Tempo de renovação do ar no tapete	14 minutos		

## 7.10 Simulações para o Tapete Tipo T10

O Tapete tipo T10 corresponde aos tapetes L33 e L57 do Corredor de Serviço – Adicional, Módulo 1 e Terraço, apresentando as dimensões em planta indicadas nos Desenhos A7 e A8, Anexo A.

A chaminé de 9 m de altura fornece a pressão manométrica de sucção, descontadas as perdas de carga nas tubulações,  $\Delta P = 1,7$  Pa, que, expressa em altura de coluna de ar,  $\Delta H_a$ , disponível para os tapetes tipo T10, vale:

$$\Delta H_a = \frac{\Delta P}{\rho_a \cdot g} = \frac{1,7}{1,196 \times 9,81} \cong 0,1. \Delta P = 0,17 \text{ m}$$

onde:

$\rho_a$ : densidade do ar (1,196 kg/m<sup>3</sup>) (101 kPa e 20 °C)

$g$ : aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>)

A área, em planta, do tapete de brita Tipo T10 (retirada do desenho em escala) é 29,73 m<sup>2</sup>, donde o volume de ar vale  $0,5(29,73 \times 0,05) = 0,74$  m<sup>3</sup>.

Como a vazão de ar na saída do tapete, indicada pela simulação, é de 4,56 m<sup>3</sup>/h, o tempo para renovação total do ar nos poros do Tapete Tipo T10 vale  $0,74/4,56 = 0,16$  h  $\cong$  10 minutos.

O **Desenho B10, Anexo B**, apresenta a rede de fluxo de ar gerada, para a melhor distribuição de perfurações de exaustão e captação de ar atmosférico, juntamente com os valores de velocidade mínima e máxima, vazão de ar, volume de poros, e tempo de renovação total do ar no interior dos tapetes de brita tipo T10, obtidos nas simulações.

A **Tabela 12** apresenta os valores de velocidade mínima e máxima, vazão de ar, volume de poros, e tempo de renovação total do ar no interior dos tapetes de brita tipo T10.

**Tabela 12** - Resultados obtidos por simulação para o tapete tipo T10

Parâmetro	Módulo (m/s)	Posição X (m)	Posição Y (m)
Velocidade mínima	$1,5 \times 10^{-4}$	8,0	0,01
Velocidade máxima	$1,3 \times 10^{-1}$	3,45	0,55
Vazão de ar	4,56 m <sup>3</sup> /h		
Volume de poros	0,74 m <sup>3</sup>		
Tempo de renovação do ar no tapete	10 minutos		

## 8 SISTEMA DE VENTILAÇÃO PROPOSTO

O sistema proposto considera a presença, comprovada em relatório anterior por fotografias do arquivo da Coesf (IPT, 2009), de tapetes de brita nº 2 colocados sob as lajes de piso do edifício por ocasião de sua construção e tem como princípio básico a imposição de redes de fluxo de ar atmosférico nos tapetes, com o intuito de captar eventuais emanções de metano, impedindo sua intrusão no edifício.

A vazão efetiva de ar atmosférico imposta ao tapete de brita deve ser suficiente para substituir o ar dos seus poros numa velocidade superior à do aporte de gases e vapores do subsolo. Como essa velocidade não é conhecida, estima-se que seja suficiente que essa substituição ocorra uma vez a cada duas horas, que é o máximo tempo de renovação do ar nos tapetes (tapetes tipo T2 e T4) como se pode verificar nas Tabelas 3 a 12.

Os tapetes de brita encontram-se encapsulados pelas vigas baldrame que sustentam cada “pano de laje”, configurando “panos de tapete” independentes entre si.

O sistema de ventilação de cada tapete de brita compõe-se basicamente de um furo de exaustão, de um lado da laje de piso sobre o tapete, ligado por tubulação a uma chaminé externa ao edifício, e de um furo de captação de ar atmosférico do lado oposto da laje. Em algumas lajes, de geometria menos favorável, foi necessário propor mais que um furo. Essas situações estão indicadas nos **Desenhos A1 a A10, Anexo A**.

Os furos de exaustão, os de captação, as tubulações de ligação e as chaminés têm 10 cm de diâmetro.

O objetivo desse sistema é provocar uma rede de fluxo de ar atmosférico nos tapetes de brita, de maneira a coletar o gás eventualmente emanado do subsolo do edifício, e transportá-lo para um ponto seguro acima do edifício, liberando-o à atmosfera, ou tratando-o por combustão, caso necessário.

O fluxo de ar será imposto utilizando-se o chamado “efeito chaminé”: chaminés metálicas pintadas com tinta esmalte preta fosca por dentro e por fora, ligadas aos furos de extração, funcionando por aquecimento solar, provocando fluxo por diferença de densidade entre a coluna de ar aquecido, interna à chaminé, e a coluna de ar externa, mais fria.

Apesar de o trabalho experimental para este relatório ter sido executado com chaminés de PVC, recomenda-se que se utilizem chaminés metálicas, devido ao fato de que as altas temperaturas que podem ser atingidas nas chaminés, nos períodos mais quentes do ano, podem danificar o PVC. O comportamento das chaminés não será negativamente afetado com esse procedimento, desde que sejam pintadas externa e internamente com tinta esmalte preta fosca, a fim de se garantir a alta absorção em sua face externa e alta emissividade em sua superfície interna.

As chaminés deverão ser providas, em sua base, de porta de monitoramento para medida periódica e contínua do nível de explosividade, com equipamento adequado.

As chaminés deverão ter ponteira superior apropriada para adaptar queimadores de gás, que deverão ser acionados quando o monitoramento indicar atmosfera inflamável no seu interior.

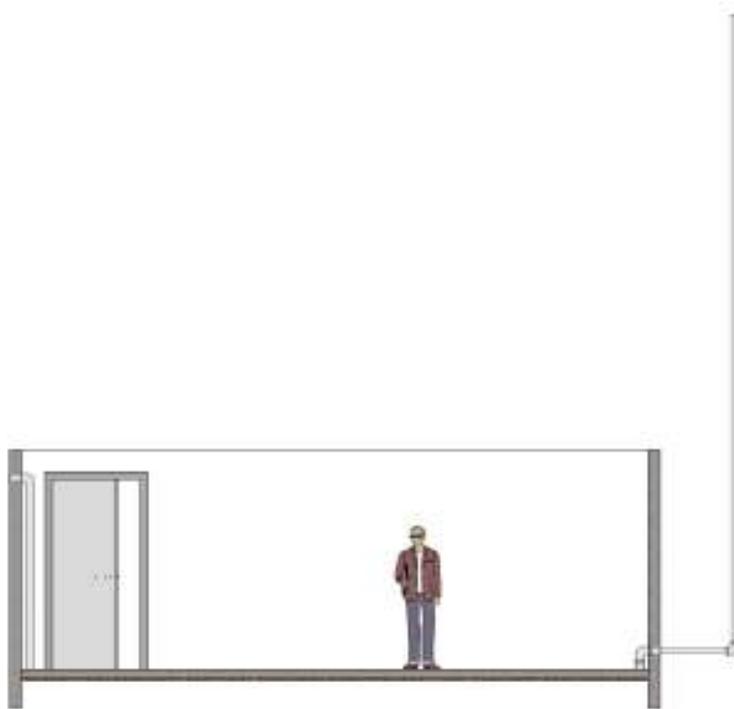
As chaminés deverão ser providas de “chapéu” protetor contra chuva, retirável no caso de ser necessário acionar o queimador de gás, no seu topo, e de câmara protetora contra acúmulo de material sólido, em sua base.

As chaminés foram posicionadas (Desenhos A1 a A9, Anexo A) de maneira a maximizar sua exposição ao sol, de forma que o fluxo de ar gerado seja suficiente para

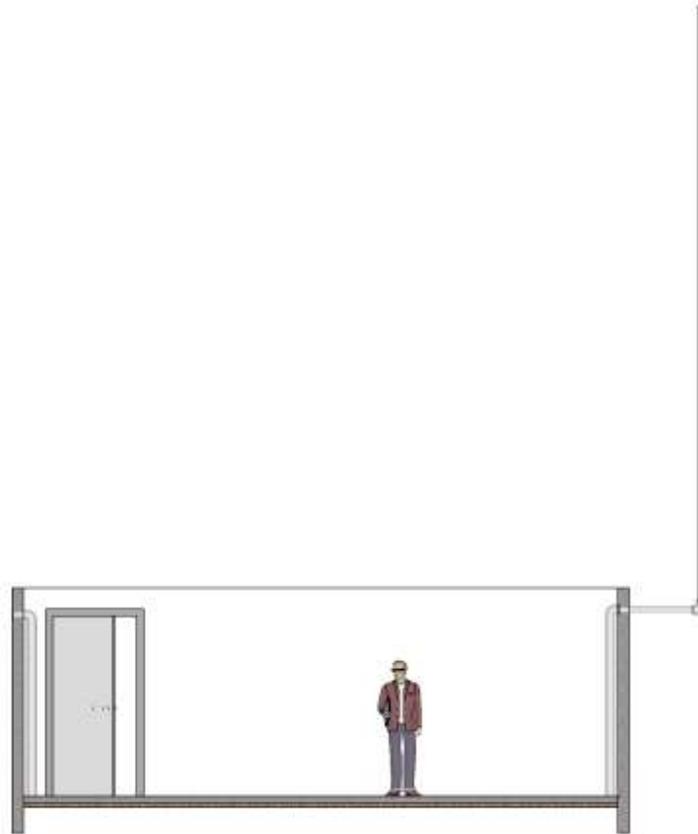
renovar o ar dos poros da brita constituinte dos tapetes com frequência satisfatória, em todos os tapetes do edifício.

As perfurações nas lajes devem ter 10 cm de diâmetro, e atravessar toda sua espessura, de forma a alcançar o tapete de brita sob a laje. Obviamente, a execução dessas perfurações deve ser cuidadosa, empregando tecnologia adequada para trabalhos em área potencialmente explosiva, devido à provável presença de gás metano acumulado sob as lajes, no próprio tapete de brita ou em bolsões criados pelos recalques do solo sob as lajes, que se constatou que ocorrem de maneira generalizada no campus (ver IPT, 2009).

Na Figura 29 e na Figura 30 é apresentado esquema do sistema proposto, com as chaminés localizadas próximo à fachada das salas a fim de minimizar o comprimento dos trechos de tubos de ligação entre os tapetes e as chaminés, e as curvas, que podem gerar perdas de pressão.



**Figura 29:** Esquema ilustrativo de posicionamento do sistema para situação em que a chaminé se inicia na proximidade do piso



**Figura 30:** Esquema ilustrativo de posicionamento do sistema para situação em que a chaminé se inicia na proximidade do forro

As dimensões relevantes do sistema, não apresentadas na Figura 29 e na Figura 30, são:

- a) Diâmetro das chaminés solares: 10 cm;
- b) Diâmetro dos tubos que conectam os furos das lajes à parede: 10 cm;
- c) Diâmetro dos furos nas lajes para escoamento de vapores: 10 cm;
- d) Altura das chaminés: 9 m para aquelas que podem ser executadas a partir da cota do terreno (Figura 29), aproximadamente, ou de 6 m, quando iniciadas junto ao forro dos ambientes, com dutos de exaustão passando sobre corredores (Figura 30);

- e) Espessura das lajes de piso: 10 cm;
- f) Espessura dos tapetes de brita nº 2 sob as lajes de piso: 5 cm;
- g) Altura das vigas baldrame ao longo do perímetro dos tapetes: 40 a 50 cm.

Observa-se que, como a perda de carga é função da velocidade do escoamento elevada ao quadrado, optou-se por tubos de grande diâmetro (10 cm), que reduzem a velocidade, para a mesma vazão, a fim de reduzir essas perdas.

Com os valores dos coeficientes de ajuste determinados no item 4.3.2 acima, determinou-se a pressão total, potencialmente gerada pela chaminé aquecida, a perda de carga no sistema de distribuição de ar e, por diferença, a pressão disponível para o tapete de brita além da vazão de ar máxima que pode atravessar o sistema.

Após simulação computacional da rede de fluxo nos tapetes, determinou-se a vazão de ar que efetivamente atravessa o sistema.

Os valores obtidos, considerando aquecimento do fluxo ascendente de ar de 6°C (valor de maior ocorrência), estão apresentados nos itens 7.1 a 7.10 deste texto.

## **9 CONCLUSÕES**

O sistema de ventilação natural proposto tem condições de realizar a exaustão de gases e vapores eventualmente existentes sob as lajes do piso do Edifício Módulo Inicial da EACH-USP, nas seguintes condições:

- ✓ O processo de exaustão ocorrerá de forma quase contínua enquanto houver forte incidência de radiação solar sobre as chaminés, ocorrendo “pulsações” no escoamento, decorrente dos fenômenos de turbilhonamento do ar ascendente no interior das chaminés.

- ✓ A resposta do sistema é muito rápida, ou seja, a temperatura superficial sobe rapidamente quando os tubos são pintados de preto e cai rapidamente com a queda da radiação solar. Os regimes de escoamento dentro da chaminé estabelecem-se muito rapidamente, em intervalos de tempo da ordem de dezenas de segundos, e caem com a mesma rapidez com que cai a radiação solar.
- ✓ O processo de escoamento de ar através do leito de brita promove boa ventilação dos tapetes de brita, com renovação total do ar dos seus poros entre 5 minutos (tapete tipo T8) e 2 horas (tapetes tipo T2 e T4), (ver Tabelas 3 a 12), o que se pode considerar adequado para os propósitos do presente trabalho. A vazão efetiva no tapete de brita deve ser suficiente para substituir o ar dos seus poros numa velocidade superior à do aporte de gases e vapores do subsolo. Como essa velocidade não é conhecida, estima-se que seja suficiente que essa substituição ocorra uma vez a cada duas horas.
- ✓ Nessa condição, caso ocorra pelo menos 2 horas de sol intenso por dia, sobre cada chaminé, já é possível se conseguir uma renovação total do ar em todos os tapetes de brita.
- ✓ Com o sistema proposto, conseguem-se altas velocidades de escoamento, porém baixas pressões, o que faz com que se consiga ventilar rapidamente o tapete, devendo-se, entretanto, posicionar as chaminés o mais próximo possível às fachadas dos edifícios, para minimizar as perdas de carga nas tubulações de ligação entre o tapete e a chaminé. Eventual reposicionamento de chaminés só pode ser feito após análise cuidadosa das perdas de carga geradas, sob pena de inviabilizar o funcionamento do sistema de ventilação.
- ✓ A cor da superfície externa afeta significativamente a absorção da radiação solar das chaminés e a elevação de temperatura do escoamento de ar, sendo a cor preta a mais favorável. As chaminés deverão ser pintadas externa e internamente com tinta esmalte preta fosca, a fim de se garantir a alta absorvância em sua face externa e alta emissividade em sua superfície interna.

- ✓ Mesmo com incidência contínua de radiação solar, o sistema terá pulsações a cada 30 segundos, devido aos fenômenos de turbilhonamento do escoamento ascendente de ar quente.

## **10 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES**

Em períodos com baixa temperatura do ar exterior e baixa ou nenhuma incidência de radiação solar (período noturno) é provável que ocorra inversão total do escoamento, ou seja, entrada de ar frio pelas chaminés, com expulsão de vapores pelos orifícios na parede oposta. Caso se deseje um sistema com funcionamento contínuo, independentemente das condições climáticas, deverá ser adotado um sistema eletromecânico.

- ✓ Recomenda-se que se mantenha uma bomba de sucção de ar eletromecânica preparada para emergência, em caso de períodos prolongados de baixa incidência de radiação solar, ou em qualquer outro tipo de ocorrência que se traduza em momentânea queda de eficiência do sistema de ventilação natural proposto. Essa bomba deverá ser um sistema móvel para atender os vários edifícios do campus da Gleba I da EACH-USP. Para tanto, as tubulações de ligação dos tapetes de brita com as chaminés deverão ser providas de uma conexão para permitir o acoplamento da bomba de sucção de emergência.
- ✓ Recomenda-se, por fim, que um programa contínuo e permanente de monitoramento de gases e vapores seja implementado, efetuando-se medidas nas tubulações de saída dos tapetes e no interior dos edifícios e espaços confinados, em geral, na área da EACH-USP, com emprego de equipamentos de campo, especialmente dedicados à detecção do gás metano e à medidas de explosividade, com registros efetuados com periodicidade a ser definida após um programa inicial. Especial atenção deve ser dada, no monitoramento, à medidas de explosividade nas caixas de passagem e outras estruturas construídas para passagem de cabos de instalações elétricas, mesmo em locais externos aos edifícios. Caso as medidas indiquem índice de explosividade igual ou superior a 10% do Limite Inferior de

Explosividade, emprego do equipamento eletromecânico de exaustão citado acima deve ser adotado, além de procedimentos especiais de segurança.

São Paulo, 28 de outubro de 2011.

**CENTRO DE TECNOLOGIAS AMBIENTAIS E ENERGÉTICAS**  
Laboratório de Resíduos e Áreas Contaminadas

---

**Geol<sup>o</sup> Dr. Nestor Kenji Yoshikawa**  
Responsável pelo Laboratório  
CREA SP 0600796380 – RE 05066

**CENTRO DE TECNOLOGIAS AMBIENTAIS E ENERGÉTICAS**  
Laboratório de Resíduos e Áreas Contaminadas

---

**Eng<sup>o</sup> Dr. Scandar Gasperazzo Ignatius**  
Gerente do Projeto  
CREA SP 52820/D – RE 02607

**CENTRO TECNOLÓGICO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**

---

**Eng<sup>o</sup> Mecânico Dr. Fúlvio Vittorino**  
Diretor do Centro  
CREA SP 177.763/D - RE 8261.0

**CENTRO DE TECNOLOGIAS AMBIENTAIS E ENERGÉTICAS**

---

**Geól<sup>o</sup> Mestre Antonio Gimenez Filho**  
Diretor do Centro  
CREA SP 0600693084 – RE 04765

## **EQUIPE TÉCNICA**

### **Centro de Tecnologias Ambientais e Energéticas**

#### **Laboratório de Resíduos e Áreas Contaminadas**

**Gerente do Projeto:** Scandar Gasperazzo Ignatius - Engenheiro Civil, Dr.

Geraldo Antunes - Técnico Nível Médio

Sebastião Fernandes Junior - Técnico Nível Médio

Wilson de Souza Valentim - Técnico Nível Médio

Fabiano Raimundo dos Santos - Técnico Nível Médio

Paulo Mendes da Silva - Estagiário

**Apoio Administrativo:** Elma Moura Coelho Oliveira - Secretária

### **Centro Tecnológico do Ambiente Construído**

#### **Laboratório de Conforto Ambiental e Sustentabilidade dos Edifícios**

Fúlvio Vittorino - Engenheiro Mecânico, Doutor

Marcelo de Mello Aquilino – Físico, Mestre

Adriana Camargo de Brito - Arquiteta, Mestre

Roberto Henriques de Araújo – Técnico Nível Médio

Ângelo de Freitas Duarte Bezerra - Técnico Nível Médio

**Apoio Administrativo:** Vera Lúcia Assaiante de Souza – Secretária

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM (2006). D5719 – 95 (Reapproved 2006), Standard Guide for Simulation of Subsurface Airflow Using Ground-Water Flow Modeling Codes, ASTM International, Pennsylvania, U.S.
- IGNATIUS, S.G. (1999). Fluxo Unidirecional de Gás Através de Um Solo Compactado - Determinação Laboratorial dos Parâmetros, Tese de Doutorado, EPUSP, 337 p.
- IPT (2009). Relatório Técnico N° 112 640-205 - Relatório Final - Elaboração de Projeto Conceitual de Ventilação do Subsolo do Edifício “Módulo Inicial”, Detalhamento da Contaminação do Solo Superficial da Área A-16 e Serviços Complementares no Campus da Each-Usp (Usp Leste)
- LAMBE, T.W., R.V. Whitman. 1969. Soil Mechanics. John Wiley and Sons. New York.
- PINTO, C.S. (2006). Curso Básico de Mecânica dos Solos, 3ª ed., São Paulo, Oficina de Textos.

ANEXO A

Sistema de ventilação proposto (10 páginas, incluindo folha de rosto)

ANEXO B

Simulações do escoamento de ar no interior dos tapetes de brita (11 páginas, incluindo  
folha de rosto)