

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Lilian Velloso Pereira

**Avaliação do uso de placas perfuradas para distribuição de fluxo
em precipitadores eletrostáticos, utilizando a dinâmica dos fluidos
computacional**

São Paulo

2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**Avaliação do uso de placas perfuradas para
distribuição de fluxo em precipitadores
eletrostáticos, utilizando a dinâmica dos fluidos
computacional**

Lilian Velloso Pereira

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Lilian Velloso Pereira

Avaliação do uso de placas perfuradas para distribuição de fluxo em precipitadores eletrostáticos, utilizando a dinâmica dos fluidos computacional

Dissertação apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, para obtenção do título de Mestre em Processos Industriais

Área de concentração: Processos Industriais da Engenharia Química

Orientador: Dr. Efraim Cekinski

São Paulo

2007

Ficha Catalográfica

Elaborada pelo Departamento de Acervo e Informação Tecnológica – DAIT
do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT

P436a

Pereira, Lilian Velloso

Avaliação do uso de placas perfuradas para distribuição de fluxo em precipitadores eletrostáticos, utilizando a dinâmica dos fluidos computacional. / Lilian Velloso Pereira. São Paulo, 2007.

129p.

Dissertação (Mestrado em Processos Industriais) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Área de concentração: Desenvolvimento e Otimização de Processos Industriais.

Orientador: Prof. Dr. Efraim Cekinski

1. Precipitador eletrostático 2. Fluidodinâmica computacional 3. Placa perfurada 4. Difusor 5. Controle da poluição 6. Dinâmica dos fluidos 7. Tese I. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Coordenadoria de Ensino Tecnológico II. Título

07-220

CDU 532(043)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família que sempre apoiou e me deu forças para vãos mais altos.

AGRADECIMENTOS

Ao IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

Ao Professor Dr. Efraim Cekinski pela orientação, estímulo e amizade.

A ALSTOM do Brasil LTDA. pelo apoio financeiro ao projeto de Mestrado.

A Carlos de Almeida pelo apoio e pela oportunidade de continuar o estudo.

A Jörgen Grubbstrom pela sugestão do tema, ensinamentos e amizade.

A Daniel Luiz Panza pelos ensinamentos, amizade e suporte na realização dos modelos.

Aos colegas de trabalho da ALSTOM e colegas de estudo do IPT pela ajuda, pelo convívio e apoio dados neste período.

Aos colegas e amigos da Mosaic Fertilizantes LTDA, pelo apoio no início do projeto de mestrado.

Aos meus pais, Vicente e Martha, aos meus irmãos Renato e Marina, ao André, e a todos os amigos e familiares pelo apoio e incentivo.

RESUMO

O precipitador eletrostático é um equipamento utilizado para redução da concentração de material particulado em gases industriais emitidos para a atmosfera. Para uma remoção eficiente das partículas, é reconhecida a necessidade de uma distribuição de velocidades uniforme na zona de tratamento do equipamento. Esta distribuição uniforme é obtida pela utilização de placas perfuradas no interior de seu difusor de entrada. Observa-se que o posicionamento, a porosidade e do tamanho dos orifícios destas placas influencia significativamente no resultado final de uniformidade de fluxo e perda de carga do conjunto.

Utilizando-se Fluidodinâmica Computacional, foram avaliados diversos tipos de arranjo de placas, que variavam quanto à posição, porosidade e tamanho dos orifícios. Os modelos computacionais criados em duas e três dimensões apresentam geometria semelhante a modelos físicos encontrados na literatura porém, com tamanhos de orifícios variados. Para os testes em 2D porosidades 0,50, 0,40 e 0,58 foram testadas, enquanto que para os testes em 3D, somente a porosidade de 0,5 foi utilizada. Os testes foram validados através da comparação dos resultados das simulações com aqueles obtidos em modelos físicos e publicados na literatura.

Nos testes realizados em 2D, o melhor resultado de distribuição de fluxo dentre as geometrias estudadas, foi obtido pelo arranjo 16 (com a placa menor localizada uma posição após o início do difusor e a maior, uma posição antes do final do difusor), com ambas as placas de porosidade $\beta = 0,50$ e com os furos de tamanho 0,006 m. Além dos modelos com duas placas perfuradas no funil de entrada, também foram realizados testes em 2D com a adição de uma placa perfurada no final da zona de tratamento do PE. Em geral, esta adição trouxe melhorias na distribuição de fluxo, sobretudo para os arranjos que apresentavam distribuição deficiente com apenas duas placas.

Nos modelos computacionais em 3D, os arranjos que produziram melhor distribuição de fluxo foram o 06 e 05 (placa maior fixa no final do difusor e placa menor nas posições próximas ao início do difusor), para o teste com um quarto da geometria completa (considerando eixo de simetria) e teste com a geometria completa, respectivamente.

Observou-se claramente que, tanto em modelos físicos já publicados quanto nos modelos computacionais desenvolvidos no presente trabalho, de acordo com o posicionamento das placas, pode ser feita uma divisão dos resultados de uniformidade de fluxo e perda de carga em três regimes distintos. No Regime 1, quando as duas placas estão mais próximas uma da outra, no final do difusor, a perda de carga é mínima e a uniformidade de fluxo não é satisfatória. No Regime 2, quando as duas placas estão mais afastadas, a perda de carga oferecida pelo arranjo é maior e perfis mais uniformes são obtidos na saída do difusor. E finalmente o Regime 3, quando uma placa está no início e outra no final do difusor, que apresenta a maior perda de carga entre os três regimes, porém este aumento não representa ganho em uniformidade.

Esta divisão em regimes é observada sistematicamente, independente da porosidade das placas utilizadas e da realização em geometrias 2D ou 3D. Pode-se dizer também que nem sempre o maior valor de perda de carga significa a melhor distribuição de gases.

Palavras-chave: Precipitadores Eletrostáticos, difusores, placas perfuradas, CFD.

ABSTRACT

The electrostatic precipitator is a type of pollution control equipment used for particulate matter collection from industrial gas flow emissions. For an efficient dust removal, it is necessary a uniform velocity distribution inside the equipment treatment zone. This uniform gas distribution is achieved with the installation of perforated plates inside the inlet diffuser. The location, porosity and size of plate's orifices can influence significantly the final pressure drop and flow uniformity result.

Different types of perforated plate's arrangements were evaluated using Computational Fluid Dynamics. They varied according to the position, porosity and size of the orifices. The models, created in two and three dimensions presented a geometry that is similar to that ones found in the physical models published, only the orifices size and shape were different. For the 2D models, porosities of 0.50, 0.40 and 0.58 were tested. For 3D models, only the porosity of 0.5 was used. The tests were validated with the comparison between the computational simulation results and the information obtained from physical experiments described in the literature.

The best gas distribution results of the 2D tests were in accordance to the literature: the arrangement 16 (with the smallest plate located one position after the diffuser beginning, and the biggest plate, one position before the diffuser end), both plates with porosity $\beta = 0.50$ and orifices diameter of 0.006 m. In addition to the models with two perforated plates in the inlet diffuser, tests with a perforated plate at the end of the treatment zone were performed. In general, these tests showed an improvement in gas distribution, mainly in the arrangements where the distribution was deficient with only two plates.

The best results of computational models in 3D were achieved by the arrangements 06 and 05 (with the biggest plate fixed at the end of the diffuser and the smallest plate in the positions 6 and 5, close to the beginning of the diffuser). This results were achieved in the tests with a quarter of the complete geometry (symmetry axes were considered) and tests with the complete geometry, respectively.

It was clearly observed that both in the published physical models and computational models studied, according to the position of the plates, a division of the uniformity and pressure drop results can be made in three distinct regimes. Regime 1: the two perforated plates are located close to each other, at the end of diffuser; the pressure drop is minimal and the flow uniformity is not satisfactory. Regime 2: the perforated plates are more apart from each other and better uniformity is achieved. Regime 3: one plate is at the very beginning of the diffuser and the other is at the end; it presents the highest pressure drop of all regimes and it does not represent a better flow uniformity.

This division into regimes is systematically observed, independently from porosity or execution of the models in 2D or 3D. It can be also concluded that a higher pressure drop does not always means a better flow distribution.

Keywords: Electrostatic Precipitators, diffusers, perforated plates, CFD.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Esquema geral de um precipitador eletrostático (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005).	3
Figura 2. Princípio de funcionamento do precipitador eletrostático (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005).	4
Figura 12. Placa de orifício em um duto. Observação da <i>vena contracta</i> (SAHIN, 1988).	16
Figura 13. Coeficiente de perda de carga K pela porosidade β de placas perfuradas (SAHIN; WARD-SMITH, 1989).	18
Figura 14. Variação do coeficiente de perda de carga, K , em função do número de Reynolds (SAHIN, 1988).	18
Figura 15. Representação esquemática (fora de escala) do modelo de teste utilizado por Sahin & Ward-Smith (1987). Dimensões em milímetros.	20
Figura 17. Fluxo unidimensional no difusor e denominação dos locais de medição de pressão (SAHIN; WARD-SMITH, 1987).	21
Figura 18. Coeficiente de perda de carga através de combinações de posições de placas. Placa AA em posição fixa e placa BB em posição variável. Porosidade (β) igual a 0,5. (SAHIN; WARD-SMITH, 1987).	23
Figura 19. Diagramas esquemáticos do perfil de fluxo no plano horizontal. Ângulo de abertura do difusor (2γ) igual a 97° ; (a) $\beta = 0,5$; (b) $\beta = 0,58$; (c) $\beta = 0,4$ (SAHIN; WARD-SMITH, 1987).	25
Figura 22. (a) Velocidade do fluxo de gases próximo ao eletrodo de coleta. (b) Velocidade do fluxo de gases próximo ao eletrodo de coleta, com a presença um eletrodo de descarga rígido. Tensão média 70kV e densidade de carga iônica $30 \mu\text{C}/\text{m}^2$ (BERNSTEIN; CROWE, 1981).	31
Figura 28. Geometria básica e posições das placas em 3D. (a) Geometria com eixo de simetria. (b) Geometria do modelo completo.	43
Figura 30. Detalhe do recurso <i>inflation</i> utilizado nas paredes externas do modelo.	48
Figura 31. Detalhe da malha gerada na região das placas perfuradas.	48
Figura 32. Resolução angular da malha gerada em 3D.	48
Figura 38. Valores de C_p para os Testes 1a, 1b, 1c, 1d e 1e.	54
Figura 39. Valores de $C.V.$ em S2 para os Testes 1a, 1b, 1c, 1d e 1e.	54
Figura 47. Valores C_p de para os arranjos tipo 0 e classificação dos tipos de regime – Teste 2.	59
Figura 49. Valores de $C.V.$ nas posições S1, S2, S3 e S4 para os arranjos tipo 0 – Teste 2.	61
Figura 53. Valores de $C.V.$ nas posições S1 e S4, e $C.V.$ médio para estas duas posições, para todos os arranjos do Teste 2.	63
Figura 54. Valores C_p de para todos os arranjos do Teste 2.	64

Figura 55. Valores C_p de para os arranjos tipo 0 e classificação dos tipos de regime – Teste 3.	65
Figura 56. Valores de $C.V.$ nas posições S2 e S4, e $C.V.$ médio para estas duas posições, para todos os arranjos do Teste 3.....	65
Figura 58. Valores C_p de para os arranjos tipo 0 e classificação dos tipos de regime – Teste 4.	67
Figura 59. Valores de $C.V.$ nas posições S2 e S4, e $C.V.$ médio para estas duas posições, para todos os arranjos do Teste 4.....	67
Figura 61. Valores C_p de para os arranjos 15,5 e 16,5 – Comparativo dos Testes 2 e 5.	69
Figura 62. Valores de $C.V.$ nas posições S2 e S4, e $C.V.$ médio para estas duas posições - Comparativo dos Testes 2 e 5.	69
Figura 64. Valores de $C.V.$ nas posições S2 e S4, e $C.V.$ médio para estas duas posições16 – Comparativo dos Testes 2, 4 e 6.....	71
Figura 66. Valores C_p de para os arranjos 15 e 16 – Comparativo dos Testes 2, 4 e 6.	72
Figura 71. Valores C_p de para os arranjos tipo 0 – Comparativo dos Testes 8, 2 e dados experimentais publicados por Sahin & Ward-Smith (1987).	77
Figura 72. Valores de $C.V.$ nas posições S1, S2, S3, S4, e $C.V.$ médio para as posições S2 e S4 – Teste 8.....	78
Figura 83. Valores C_p de para os arranjos tipo 0 – Comparativo dos Testes 9, 2 e dados experimentais publicados por Sahin & Ward-Smith (1987).	85
Figura 84. Valores de $C.V.$ nas posições S1, S2, S3, S4, e $C.V.$ médio para as posições S2 e S4 – Teste 9.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de geometria e coeficiente de perda de carga para modelo físico; $\beta= 0,5$ (SAHIN; WARD-SMITH, 1987)

Tabela 2 - Dados de geometria em 2D.

Tabela 3 - Arranjos de placas perfuradas estudados em 2D.

Tabela 4 - Seqüência de experimentos realizados em 2D.

Tabela 5 - Propriedades físicas do fluido – modelos 2D.

Tabela 6 - Dados de geometria em 3D.

Tabela 7 - Arranjos de placas perfuradas estudados em 3D.

Tabela 8 - Resumo estatístico das geometrias e malhas geradas em 3D.

Tabela 9 - Teste 1 (a - e) - tamanhos dos orifícios utilizados.

Tabela 10 - Resumo de resultados do Teste 7 e comparativo com o Teste 2.

Tabela 11 - Tabela resumo de resultados 2D – Testes 0 a 7.

Tabela 12 - Tabela resumo de resultados 3D – Testes 8 e 9.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
ICAC	<i>Institute of Clean Air Companies Inc.</i>
IGCI	<i>Industrial Gas Cleaning Institute</i>
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
PE	Precipitador Eletrostático
USP	Universidade de São Paulo
UDF	<i>User defined functions</i>
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões

LISTA DE SÍMBOLOS

A	: área total de coleta do precipitador	[m ²]
A_1	: área da seção transversal do duto de entrada	[m ²]
A_2	: área da seção transversal da placa BB	[m ²]
A_4	: área da seção transversal da placa AA	[m ²]
A_a	: área transversal aberta	[m ²]
A_c	: área transversal mínima na <i>vena contracta</i>	[m ²]
A_d	: área transversal total do duto ou difusor onde a placa está inserida.	[m ²]
A_e	: área de coleta efetiva do precipitador	[m ²]
A_m	: área do elemento finito	[m ²]
A_o	: área transversal do orifício	[m ²]
A_p	: área transversal total da placa perfurada	[m ²]
$C.V.$: coeficiente de variação de velocidades	[%]
C_p	: coeficiente de recuperação de pressão global do conjunto placas e difusor	[-]
C_{p1}	: coeficiente de recuperação de pressão global da placa BB	[-]
C_{p2}	: coeficiente de recuperação de pressão global da placa AA	[-]
C_{e1}	: constante empírica da taxa de dissipação de energia	[-]
C_{e2}	: constante empírica da taxa de dissipação de energia	[-]
C_μ	: constante empírica da viscosidade turbulenta	[-]
c_p	: calor específico a pressão constante	[J/(kg.K)]
D	: dimensão linear da placa perfurada	[m]
D_1	: diâmetro ou dimensão linear do duto de entrada	[m]
D_2	: dimensão linear da placa BB	[m]
D_4	: dimensão linear da placa AA	[m]
d	: diâmetro do orifício da placa perfurada ou comprimento linear do orifício da placa perfurada.	[m]
err	: Variável de convergência comparada à tolerância relativa	[-]
E	: erro estimado para vetor solução	[-]
H	: altura do precipitador	[m]
g	: gravidade	[m/s ²]
g	: quantidade de energia gerada no sistema	[J]
h	: altura dos orifícios das placas perfuradas modelo 2D.	[m]
h_L	: mudança de energia interna (<i>head loss</i>)	[J]

h_i	: comprimentos dos lados dos triângulos; $i= 1, 2$ e 3	[m]
K	: coeficiente de perda de carga	[-]
k	: energia cinética turbulenta	[m ² /s ²]
k_c	: coeficiente de condutividade térmica	[W/(m.K)]
L	: comprimento total do precipitador	[m]
L_d	: comprimento do difusor	[m]
n	: número de pontos ou orifícios	[-]
N	: número de seguimentos do precipitador	[-]
N_g	: número de graus de liberdade	[-]
p	: pressão estática	[Pa]
p_1	: pressão estática no duto de entrada	[Pa]
p_2	: pressão estática antes da placa BB	[Pa]
p_3	: pressão estática depois da placa BB	[Pa]
p_4	: pressão estática antes da placa AA	[Pa]
p_5	: pressão estática depois da placa AA	[Pa]
q	: qualidade da malha não estruturada	[-]
Q	: vazão total de gás do precipitador	[m ³ /s]
Q_i	: vazão de gás em um seguimento particular do precipitador	[m ³ /s]
Re	: número de Reynolds	[-]
S	: espaçamento entre placa e eletrodo	[m]
S_i	: fatores de escala	[-]
SD	: desvio padrão	[-]
T	: temperatura	[K]
t	: tempo	[s]
t_p	: espessura da placa perfurada	[m]
v	: velocidade do gás no precipitador ou velocidade de escoamento	[m/s]
v_m	: velocidade média do gás no precipitador	[m/s]
u	: velocidade do gás no duto ou difusor	[m/s]
\bar{u}	: velocidade média do escoamento	[m/s]
u'	: velocidade flutuante	[m/s]
u_m	: velocidade média do gás no duto ou difusor	[m/s]
u_1	: velocidade do gás no duto de entrada	[m/s]
u_3	: velocidade do gás depois da placa BB	[m/s]
U	: aproximação do verdadeiro vetor solução do modelo	[m/s]

W	: largura do precipitador	[m]
W_i	: fatores de ponderação	[-]
y	: altura ou coordenada vertical	[m]

Letras Gregas:

α	: ângulo horizontal de abertura do difusor	[°]
β	: porosidade	[-]
Δp	: diferença de pressão estática	[Pa]
ε	: taxa de dissipação de energia cinética turbulenta	[-]
γ	: ângulo vertical de abertura do difusor	[°]
κ	: constante de acordo com distribuição granulométrica das partículas	[-]
μ	: viscosidade dinâmica	[kg/m s]
η	: eficiência de remoção de pó	[-]
η_T	: eficiência de remoção de pó total	[-]
η_i	: eficiência de remoção de pó em um seguimento particular	[-]
σ_k	: constante empírica de energia cinética turbulenta	[-]
σ_ε	: constante empírica de taxa de dissipação de energia	[-]
ϕ	: coeficiente de contração	[-]
θ	: resolução angular	[°]
π	: número irracional, resultado da divisão do comprimento de uma circunferência pelo seu diâmetro	[-]
ρ	: densidade	[kg/m ³]
ν	: viscosidade cinemática	[m ² /s]
ν_τ	: viscosidade cinemática turbulenta	[m ² /s]
ω	: velocidade de migração	[m/s]
ω_κ	: velocidade de migração correspondente à “Equação de Deutsch modificada”	[m/s]

Subscritos

m	: valor médio
l	: linear
i	: valor individual
j	: valor individual
x	: valor na coordenada cartesiana x
y	: valor na coordenada cartesiana y
z	: valor na coordenada cartesiana z

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	2
1.2	Justificativa	2
2	Revisão da literatura	3
2.1	Precipitadores Eletrostáticos: função e funcionamento.....	3
2.1.1	Projeto de Precipitadores Eletrostáticos	5
2.1.2	Distribuição de gases.....	7
2.1.3	Norma internacional – critérios de uniformidade e estudos de modelagem	10
2.1.4	Cálculo de eficiência de coleta do PE com base distribuição de gases... ..	13
2.2	Placas perfuradas: cálculo de perda de carga e porosidade	16
2.3	Experimentos na área de distribuição de gases – Modelos Físicos.....	18
2.3.1	Metodologia e principais conclusões de experimentos físicos pesquisados	20
2.4	Fluidodinâmica computacional.....	28
2.4.1	Modelos fluidodinâmicos.....	28
2.4.2	Experimentos na área de distribuição de gases utilizando-se Modelos Computacionais	30
2.4.3	Ferramentas computacionais.....	34
3	Métodos	35
3.1	Modelagem computacional	35
3.2	Modelagem em 2D.....	35
3.2.1	Definições de geometria e seqüência de experimentos em 2D	35
3.2.2	Definições do modelo fluidodinâmico em 2D	39
3.2.3	Definição das propriedades físicas dos modelos 2D	39
3.2.4	Definição de condições de contorno gerais em 2D.....	40
3.2.5	Geração das malhas de elementos finitos em 2D.....	41
3.2.6	Definições de resolução em 2D	42
3.3	Modelagem em 3D.....	42
3.3.1	Definições de geometria e seqüência de experimentos em 3D	42
3.3.2	Definições do modelo fluidodinâmico em 3D	44
3.3.3	Definição das propriedades físicas dos modelos 3D	45
3.3.4	Definição de condições de contorno gerais em 3D.....	45
3.3.5	Geração das malhas de elementos finitos em 3D.....	45

3.3.6	Definições de resolução.....	49
3.4	Medição da uniformidade do perfil de velocidades nos modelos 2D e 3D ..	49
3.5	Medição da perda de carga nos modelos 2D e 3D	50
4	Resultados e discussão	50
4.1	Teste 0	50
4.2	Teste 1	51
4.3	Teste 2	55
4.4	Teste 3	64
4.5	Teste 4	66
4.6	Teste 5	68
4.7	Teste 6	70
4.8	Teste 7	73
4.9	Teste 8	75
4.10	Teste 9	79
4.11	Discussão geral dos resultados	86
5	Conclusões	89
6	Referências bibliográficas	91

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a preocupação com a preservação ambiental é cada vez maior e a busca pela melhoria do desempenho de sistemas de controle de poluição tem papel significativo. O precipitador eletrostático (PE) é um equipamento utilizado há quase 100 anos para redução da concentração de material particulado em gases industriais emitidos para a atmosfera. Gases gerados em caldeiras, incineradores, fornos, etc. são levados por meio de dutos ao PE e o material particulado contido nestes gases é removido pela ação de um campo elétrico (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005). Para uma remoção eficiente das partículas, é reconhecida a necessidade de uma distribuição de velocidades uniforme na zona de tratamento do equipamento (SAHIN; WARD-SMITH, 1987).

Neste tipo de sistema, para assegurar que as partículas sejam removidas da corrente gasosa, existe a preocupação com o dimensionamento do conjunto de dutos de exaustão e com a expansão do fluxo por meio de um difusor, antes da entrada na zona de tratamento. O difusor é utilizado para diminuir a velocidade do gás no interior do equipamento a cerca de um décimo da velocidade nos dutos a montante. A solução convencional para controle de uniformidade durante esta expansão é a utilização de difusores piramidais com placas perfuradas instaladas em seu interior (SAHIN; WARD-SMITH, 1987).

Diversos estudos em modelos físicos foram realizados sobre a expansão de fluxo e controle da distribuição de velocidades, porém poucos deles direcionados à aplicação em precipitadores eletrostáticos. Metha (1979) publicou extenso trabalho sobre o projeto de difusores com telas ou placas perfuradas para garantia de uniformidade de fluxo em túneis de vento. Este trabalho serviu de base para um conjunto de publicações de Sahin & Ward-Smith de 1987 a 1995, que apresentam um grande número de experimentos físicos e resultados sobre as condições de fluxo na saída de difusores, mediante a variação da posição, porosidade e quantidade de placas perfuradas instaladas em seu interior. Com a seleção correta destes parâmetros pode-se eliminar a separação de fluxo e atingir-se uma uniformidade satisfatória na saída do difusor. Nestes estudos, buscou-se o ponto ótimo para satisfação dos critérios de uniformidade de fluxo no interior de precipitadores eletrostáticos utilizados amplamente no mundo inteiro, ou seja, as especificações internacionais estabelecidas pela ICAC - *Institute of Clean Air Companies Inc.* (ICAC, 2004).

Para aperfeiçoamento de projeto de PEs, ferramentas computacionais vêm sendo cada vez mais aplicadas de forma a minimizar o número de modelos físicos criados e reduzir o tempo de cálculo de equações envolvidas nos fenômenos de transporte de massa, calor e quantidade de movimento. Diversos trabalhos vêm sendo publicados neste sentido, principalmente sobre modelagem computacional dos fenômenos eletrostáticos e fluidodinâmicos no interior de precipitadores. Bernstein & Crowe (1981) obtiveram modelos teóricos para simulação numérica do efeito de turbulência e sua interação com eletrostática e dinâmica da partícula. Gallimberti (1998) publicou um modelo matemático para simulação das condições operacionais em precipitadores eletrostáticos de grande escala, com simulações envolvendo fenômenos de precipitação eletrostática, processos elétricos e de transporte. Outros modelos matemáticos também foram publicados para estimativa de eficiência de PEs e qualidade do campo elétrico foram desenvolvidos por Abdel-Sattar (1991),

Cañadas e colaboradores (1995), LAMI e colaboradores (1998), Barrics e colaboradores (1998).

Estudos fluidodinâmicos sobre distribuição de velocidades e aperfeiçoamento de projetos de dutos foram realizados por Macchion e colaboradores (2004), utilizando-se Fluidodinâmica Computacional (CFD). Para medição de perda de carga em placas de orifício e placas perfuradas, bem como observação da uniformidade de fluxo, foram desenvolvidos modelos físicos e computacionais, por Gan & Riffat (1997). Em 2002, Varonos e colaboradores (2002) publicaram extenso trabalho que descreve o desenvolvimento de um projeto completo e método para melhoria da eficiência de um precipitador eletrostático levando-se em consideração a uniformidade de fluxo, as partículas e propriedades do campo elétrico aplicado. A modelagem do fluxo foi feita por volumes finitos, utilizando-se modelo de fluxo turbulento e tri-dimensional $k-\epsilon$, sem influência do campo elétrico ou distribuição de partículas. Buscou-se a melhoria do perfil de velocidades na entrada da seção de coleta do precipitador adicionando-se placas perfuradas e defletoras no funil de entrada.

Utilizando-se Fluidodinâmica Computacional, foram avaliados, no presente trabalho, diversos tipos de arranjo de placas perfuradas que variam quanto à posição, porosidade e tamanho dos orifícios das mesmas. Os modelos computacionais criados em duas e três dimensões apresentam geometria semelhante à dos modelos físicos realizados por Sahin & Ward-Smith (1987) e Sahin & Ward-Smith (1990).

1.1 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é avaliar a utilização de placas perfuradas em um difusor de entrada típico de precipitadores eletrostáticos, utilizando a técnica de CFD (Fluidodinâmica Computacional). Partindo-se de geometrias e condições de contorno descritas em experimentos com modelos físicos, já publicados por Sahin & Ward-Smith (1987) e Sahin & Ward-Smith (1990), modelos computacionais foram criados para verificação dos resultados e aplicabilidade deste tipo de ferramenta.

Busca-se o melhor arranjo de posição e porosidade de placas perfuradas no difusor de entrada do equipamento de controle de poluição, avaliando-se tanto a distribuição do fluxo em seu interior quanto a perda de carga criada nesta região. A influência do número de placas e tamanho de seus orifícios nos resultados finais de distribuição de velocidades também é observada.

1.2 Justificativa

A preocupação com a distribuição de gases no interior da zona de tratamento de um precipitador eletrostático é fundamental para o bom desempenho do equipamento. A uniformidade de fluxo depende do correto dimensionamento do difusor de entrada e placas perfuradas em seu interior. O presente trabalho propõe o estudo destes componentes, presentes na maioria dos precipitadores utilizados atualmente: difusor de entrada com elevado ângulo de abertura e placas perfuradas em diversos arranjos. Desta forma, a metodologia utilizada e os resultados obtidos aqui poderão ser usados para melhoria do projeto destes equipamentos.

Muitas vezes, a obtenção do arranjo ótimo para distribuição de gases é conseguida de forma empírica, com projetos em escala piloto. O uso de modelos físicos é recomendado tanto para área de pesquisa e desenvolvimento de precipitadores

eletrostáticos, quando para aprimoramento de projetos de difícil instalação. Porém, o custo de fabricação e operação de plantas piloto é muito elevado e necessita de cuidadoso planejamento (ICAC, 1968). O presente trabalho apresenta resultados e metodologia que podem ser utilizados como auxílio ao planejamento e complementação de estudos em modelos físicos. Significativa redução de tempo e custo nas investigações sobre o melhor arranjo de placas perfuradas, de acordo com porosidade e posicionamento, poderão ser alcançadas partindo-se da análise prévia dos melhores resultados de uniformidade de fluxo obtidos em CFD.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Precipitadores Eletrostáticos: função e funcionamento

O primeiro precipitador eletrostático (PE) industrial é geralmente atribuído a um trabalho iniciado em 1907 por Frederick Cottrell, cujo sucesso se deve ao desenvolvimento de transformadores de alta tensão alternada e retificadores mecânicos síncronos. Por este motivo, por muitos anos, os precipitadores eletrostáticos foram chamados de “Coletores Cottrell”. Ao longo dos anos, o projeto destes equipamentos sofreu avanços tanto em sua geometria, quanto na forma de fornecimento e controle do campo elétrico, embora o conceito básico estabelecido por Cottrell não tenha mudado significativamente. Esta evolução vem sendo impulsionada pela necessidade de se atingir maior eficiência e níveis de emissão de particulados cada vez mais baixos (ICAC, 2000).

O PE comumente projetado nos dias de hoje é composto de uma carcaça, onde o gás é tratado, que possui fileiras paralelas de eletrodos, alguns de alta tensão (eletrodos de emissão) e outros aterrados (placas coletoras), como apresentado na **Figura 1**. Com a alta tensão aplicada nos eletrodos de emissão, um campo elétrico bastante forte é criado entre os eletrodos e o gás é ionizado: os íons positivos migram para o eletrodo negativo e os íons negativos migram para o eletrodo positivo. No seu trajeto no interior do gás carregado com material particulado poluente, os íons colidem e se aderem às partículas arrastando-as em direção aos eletrodos, como mostrado na **Figura 2** (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005).

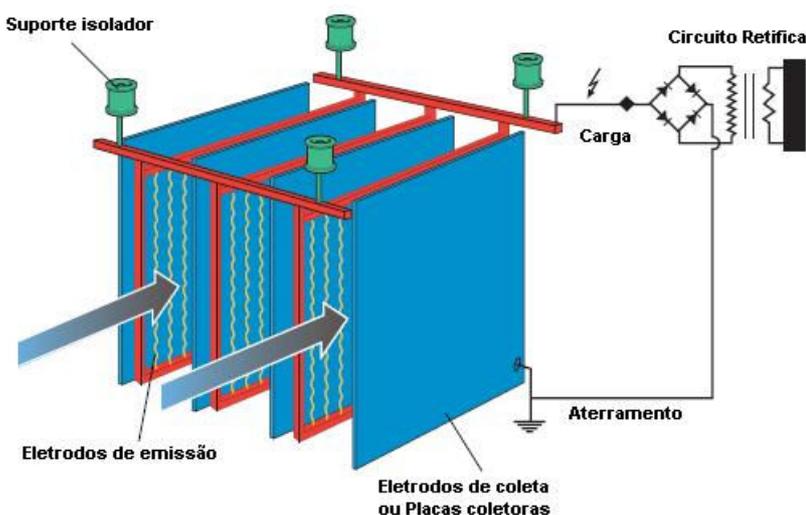


Figura 1. Esquema geral de um precipitador eletrostático (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005).

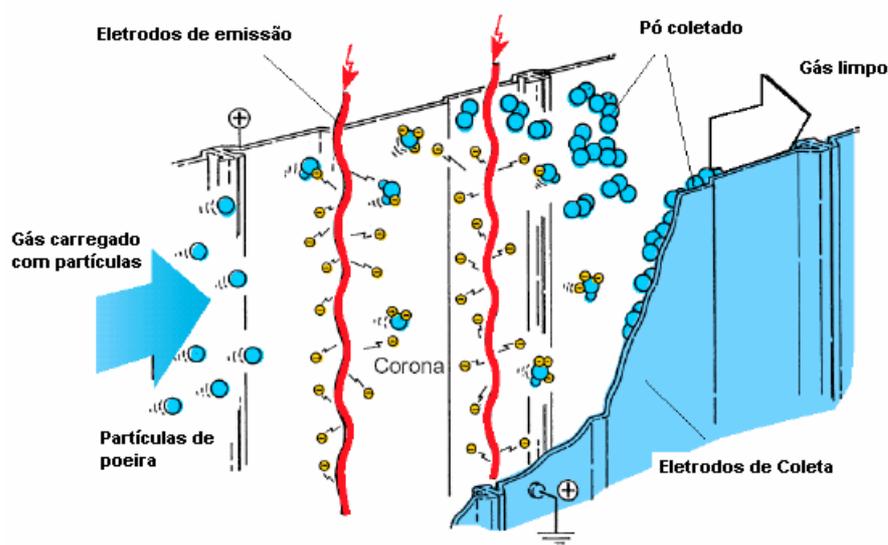


Figura 2. Princípio de funcionamento do precipitador eletrostático (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005).

No processo de formação do campo elétrico no interior do precipitador, o chamado “Efeito Corona” é observado: um fenômeno de descarga (ionização do gás, gerando elétrons livres) que ocorre ao redor do eletrodo de alta tensão ou emissão, formando uma “coroa” brilhante em determinados pontos, composta principalmente de tensão negativa. As cargas negativas migram para o eletrodo aterrado e constituem uma corrente (mA) (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005).

Existem dois mecanismos principais de ionização de partículas: a ionização por difusão e por campo elétrico. A ionização por difusão é resultante da energia cinética térmica dos íons presentes no gás que colidem com as partículas de poeira, sobrepondo as forças de repulsão presentes nas próprias partículas. A ionização por campo elétrico ocorre com o direcionamento dos íons negativos para as partículas de poeira através das linhas de fluxo do campo. Os dois mecanismos atuam para todos os tamanhos de partículas. Porém a ionização por campo adiciona carga de forma mais significativa a partículas maiores que 2 μm de diâmetro e a ionização por difusão atua de forma mais efetiva em partículas menores que 0,5 μm (DAVIS, 2000).

Devido ao efeito de ionização e arraste de partículas, camadas de material particulado aderem aos eletrodos, que devem ser limpos com certa frequência para que novas partículas sejam coletadas. Este é um processo contínuo e a camada de pó retirada dos eletrodos deve ser descarregada de forma segura no interior do precipitador, para que não retorne à corrente gasosa. A limpeza é feita normalmente com o impacto do batimento de martelos nos quadros de eletrodos. Este é um processo válido para os precipitadores secos, ou seja, para partículas coletadas a seco. Uma alternativa é a limpeza líquida, no assim chamado precipitador úmido, onde as partículas formam suspensão ou são dissolvidas em um líquido, como a água, por exemplo (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005).

Precipitadores são coletores de particulado comuns, utilizados para uma série de aplicações. Usuários frequentes de PEs são plantas de geração de energia com caldeiras a carvão, óleo ou biomassa; indústrias de cimento, papel e celulose, siderurgia, não-ferrosos, assim como plantas com incineradores. Em cada

seguimento industrial existem aplicações específicas. Por exemplo, em plantas de cimento, PEs são utilizados após vários tipos de fornos, na moagem, nos resfriadores, etc. Cada processo tem suas próprias características, como temperatura do gás, composição do fluxo, tamanho, forma, composição química, condutividade ou resistividade das partículas. Desta forma, o dimensionamento do precipitador varia sensivelmente com cada aplicação (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005).

A eficiência de remoção de material particulado de um precipitador eletrostático varia com diversos fatores. Os principais fatores são:

- a) combustível utilizado no processo a montante do PE como tipos de carvão, coque, gás natural, biomassa, etc.;
- b) tecnologia de projeto do PE, como tipos de eletrodos, posição e tipos de batedores de limpeza, disposição de equipamentos de distribuição de gás (como placas perfuradas e defletoras internas), tempo de retenção e tensão aplicada na operação;
- c) composição do material particulado a ser removido, como teores de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, TiO₂, P₂O₅, SO₃, etc.;
- d) dados de processo como composição do gás, temperatura, distribuição granulométrica e formato das partículas, resistividade do pó, pressão na entrada, umidade na corrente gasosa, etc.;
- e) parâmetros de controle do PE como seqüência de batimento, taxa de faiscamento, forma de fornecimento de energia;
- f) características próprias de cada unidade industrial como layout, forma de mistura e homogeneidade do gás proporcionada pelo arranjo de dutos, necessidade de recirculação do pó;
- g) qualidade do processo de combustão a montante do PE, envolvendo variáveis como excesso de ar, recirculação do gás, condições de partida dos equipamentos (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005).

Todos estes fatores, em maior ou menor escala, são determinantes para o desempenho do equipamento de controle ambiental e o projeto é desenvolvido levando-se em consideração todas estas variáveis. A seção 2.1.1 mostra como, na prática, estes fatores são agrupados para correto dimensionamento do precipitador eletrostático.

2.1.1 Projeto de Precipitadores Eletrostáticos

A estimativa do tempo de tratamento (tempo de retenção) ou área de coleta para uma determinada vazão de gás e eficiência esperada pode ser feita de várias formas. Um modo amplamente utilizado em todo o mundo é descrito pela Equação desenvolvida por Deutsch em 1922, apresentada na **Equação 1** (GROVES; SMITH, 1980):

$$\eta = 1 - e^{-\left(\frac{\omega A}{Q}\right)} \quad (1)$$

onde η é a eficiência de remoção de pó; ω é a velocidade de migração do pó; A é a área total de coleta do precipitador e Q é a vazão total de gás do precipitador.

Ao longo dos anos, as exigências de melhoria de desempenho se tornaram cada vez mais elevadas e requisitos de emissões de particulados cada vez mais restritos. Em 1963, Matts and Ohnfeldt propuseram uma “Equação de Deutsch Modificada”, que levava em consideração os efeitos dos diferentes tamanhos de partículas (distribuição granulométrica do particulado) para altas eficiências, como mostra a **Equação 2** (ICAC, 2000).

$$\eta = 1 - e^{-\left(\frac{\omega_{\kappa} A}{Q}\right)^{\kappa}} \quad (2)$$

onde ω_{κ} é a velocidade de migração do pó, correspondente à “Equação de Deutsch Modificada”, e κ é uma constante que depende da distribuição granulométrica das partículas e varia de 0,5 a 1,0.

A constante κ vem sendo calculada como 0,5 para maioria das aplicações, através de análises de regressão. Valores até 1,0 são utilizados, o que corresponde à fórmula de Deutsch original (**Equação 1**) (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005). Portanto, tanto a **Equação 1** quanto a **Equação 2** são utilizadas hoje em dia para dimensionamento de PEs. A escolha entre uma ou outra varia de acordo com o processo, tipo de aplicação e impacto da distribuição granulométrica das partículas na eficiência do precipitador.

A velocidade de migração (ω ou ω_{κ}) corresponde à velocidade média de uma partícula carregada dentro do campo elétrico, que migra em direção à placa coletora dentro do espaçamento entre alta tensão (eletrodo de emissão) e o eletrodo aterrado (placa coletora). A velocidade de migração é, em princípio, uma constante dependente de diversos fatores como tamanho e formato de partícula, composição e temperatura do gás, etc. O desafio é escolher o valor de velocidade de migração a ser utilizado para uma nova planta ou novo projeto (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005).

Os valores de ω ou ω_{κ} podem ser calculados teoricamente, porém o resultado normalmente apresenta grande desvio em relação aos precipitadores reais. Isto se deve ao fato das formas teóricas apresentarem simplificações da realidade e de uma série de aspectos práticos não poderem ser modelados de forma precisa. Por isso, para fins práticos, são utilizados valores de ω ou ω_{κ} atingidos em plantas existentes, em um dado processo, e são aplicados fatores de correção sobre os desvios das condições operacionais do novo projeto. Nota-se que o valor de velocidade de migração não pode ser medido, mas sim calculado pelas **Equações 1 ou 2**, de acordo com a eficiência de coleta medida e área do PE (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005).

A área total de coleta do PE, calculada de acordo com sua geometria, e vazão do gás no interior do PE são dadas por:

$$A = \frac{W \cdot H \cdot L}{S} \quad (3)$$

$$Q = v_m \cdot W \cdot H \quad (4)$$

onde W é a largura do precipitador; H é a altura do precipitador; L é o comprimento total do precipitador; v_m é a velocidade média do gás no precipitador; S é o espaçamento entre placas de coleta e eletrodos de emissão.

Verifica-se que quanto maior a vazão ou velocidade do gás em um determinado equipamento, menor a eficiência de coleta esperada. Este efeito pode ser visualizado no gráfico da **Figura 3**.

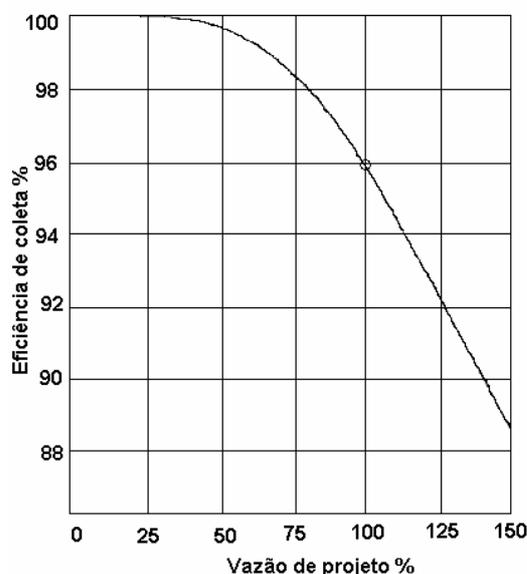


Figura 3. Exemplo de eficiência de coleta típica X vazão de gás, pela Equação de Deutsch (GROVES; SMITH, 1980).

A velocidade do gás está relacionada ao tempo de retenção dentro do equipamento coletor e, principalmente ao efeito de reentrada de partículas já coletadas na corrente gasosa. Sabe-se por experiência que altas velocidades no interior do precipitador podem provocar este efeito (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005). Por este motivo, a distribuição de velocidades no interior do precipitador deve ser a mais uniforme possível.

Para limites de emissão baixos, a tendência para projeto é a redução das velocidades para valores em torno de 1 m/s. Velocidades até 1.7 - 1.8 m/s podem ser utilizadas sem afetar o valor da velocidade de migração, em aplicações especiais e quando o material particulado tem propriedades aglomerantes. Velocidades baixas, menores que 0.5 m/s, devem ser evitadas, pois podem resultar na estratificação de temperatura, o que dificulta a obtenção de uma boa distribuição de gases (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005).

2.1.2 Distribuição de gases

A manutenção da uniformidade na velocidade do gás e na distribuição do material particulado em suspensão no interior do equipamento é bastante importante para a eficiência de coleta e para que não haja desgaste ou sobrecarga em regiões específicas. Deste modo, muitos estudos têm sido desenvolvidos a respeito da transição de altas velocidades no duto de exaustão para baixas velocidades dentro do precipitador eletrostático (FOGIEL, 1978).

Já se sabe que, para preservar um bom comportamento do padrão de distribuição de gases em um difusor, o ângulo de divergência das paredes deve ser o menor possível. Para fins industriais, a utilização de difusores com pequeno ângulo de abertura tem a desvantagem de ocupar um espaço excessivo e um maior custo, o que exige um projeto mais compacto. Por outro lado, quando o difusor apresenta

ângulos mais abertos, o fluxo pode apresentar regiões de separação, principalmente nas proximidades das paredes (SAHIN; WARD-SMITH; LANE, 1995).

A transição de entrada (funil ou difusor) é uma peça necessária para reduzir a velocidade do duto, em trono de 9 - 15 m/s, para a área de tratamento do PE, onde a velocidade atinge geralmente 0.75 a 1.5 m/s. O projeto desta parte do equipamento ainda deve minimizar a queda ou sedimentação de particulado resultante da desaceleração do gás. Dependendo do arranjo de layout do PE, esta peça pode ser com entrada pelo topo, horizontal, inferior ou lateral (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005). Segundo Groves e Smith (1980) o difusor de entrada possui, em resumo, diversas tarefas simultâneas:

- a) é a peça de transição entre a câmara do PE e os dutos, conectando diferentes planos e elevações;
- b) tem uma função estrutural no fechamento da câmara e suportando os dutos que chegam até o equipamento;
- c) neste trecho ocorre a desaceleração do fluxo, de velocidades mais “econômicas” utilizadas nos dutos, para velocidades requeridas na zona de tratamento;
- d) ele deve distribuir o fluxo de forma uniforme por toda a seção transversal do primeiro campo do precipitador.

Para homogeneização e redução dos efeitos de separação de fluxo, placas ou grades difusoras são geralmente utilizadas na entrada do precipitador ou em curvas próximas à entrada. Vários formatos têm sido desenvolvidos e um exemplo da utilização destas placas é mostrado na **Figura 4**. O dimensionamento destas peças, no entanto, é bastante empírico e tem sido feito por meio de modelos em escala de laboratório, por métodos de tentativa e erro, como os desenvolvidos por Sahin & Ward-Smith de 1987 a 1995. A porcentagem de área aberta (porosidade) bem como o posicionamento das mesmas são fatores primordiais para uma boa distribuição de fluxo (SAHIN; WARD-SMITH, 1987).

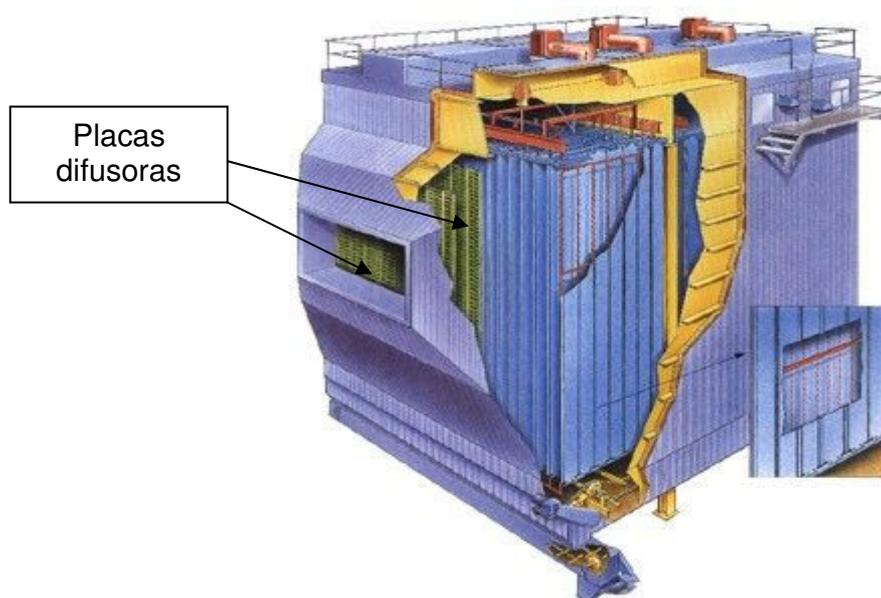


Figura 4. Visualização de placas difusoras na entrada de precipitador eletrostático (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005).

Sobre as placas podem ser utilizados ainda defletores para direcionar o fluxo de forma homogênea para o interior do precipitador. Em caso de partículas mais aderentes ou em grandes concentrações, são adicionados também batedores para limpeza destas placas e para evitar má distribuição de gases, como pode ser visualizado na **Figura 5**.

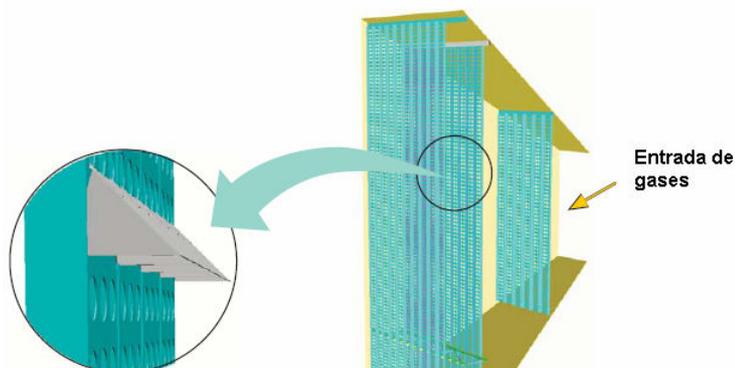


Figura 5. Placas perfuradas com defletores no funil de entrada para distribuição de gases (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005).

Ainda com o objetivo de melhorar a distribuição de fluxo e evitar desvio do gás da área do campo elétrico para a área das tremonhas, na base do PE, onde o particulado é coletado, são instaladas placas defletoras neste local, como mostra a **Figura 6**. Outra prática também comum nos equipamentos atuais é a instalação de placas perfuradas ou “cortinas” de placas também no difusor de saída do precipitador.

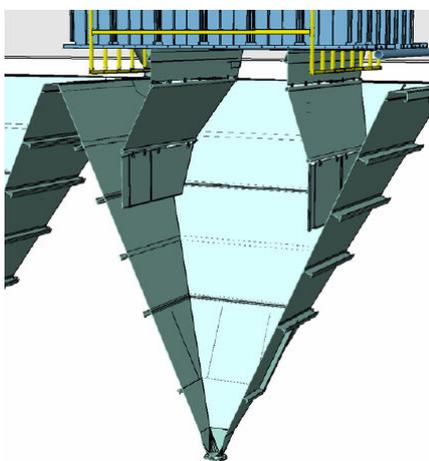


Figura 6. Arranjo típico de placas defletoras em tremonhas do tipo piramidal (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005).

Em resumo, o uso de difusores piramidais na entrada sem a presença de placas perfuradas causa a concentração de fluxo na parte central e recirculação nas extremidades da câmara, como mostrado na **Figura 7a e 7b**. Normalmente, duas ou três placas são necessárias para garantir que toda a área transversal receba o fluxo de forma uniforme. Além disso, como já citado, a presença de defletores nas tremonhas é fundamental, como pode ser visto na **Figura 7c**.

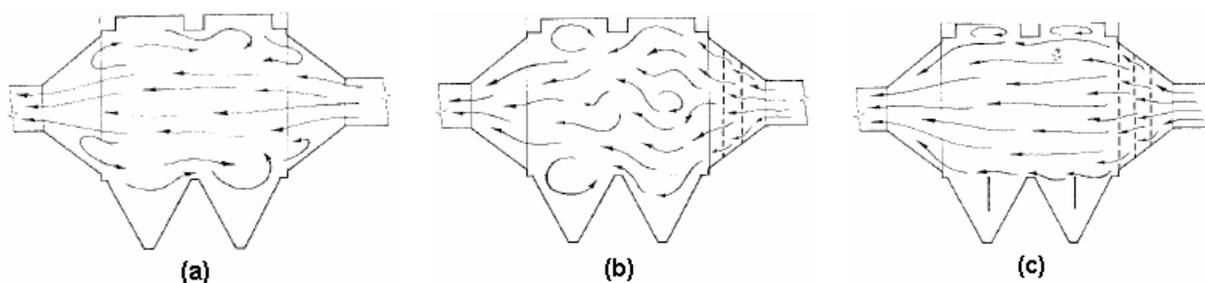


Figura 7. Distribuição de velocidades com funil de entrada piramidal: (a) sem placas perfuradas; (b) placas de distribuição inadequadas; (c) placas de distribuição e defletoras adequadas (GROVES; SMITH, 1980).

Outra figura (ver **Figura 8**) mostra a distribuição ideal de velocidades, com o fluxo passando em toda a extensão da altura do precipitador e sem desvio para a área superior ou inferior do equipamento.

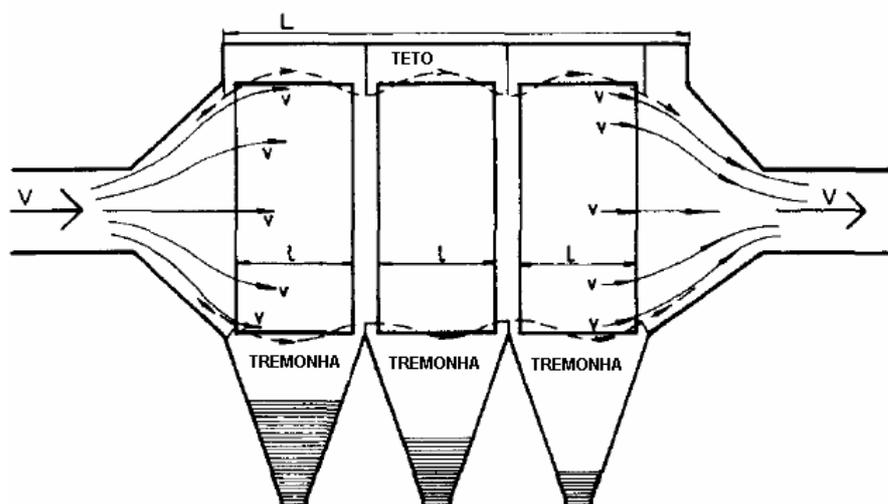


Figura 8. Condição ideal de distribuição de fluxo al logo dos campos do precipitador, sem desvio para o teto ou tremonhas (GROVES; SMITH, 1980).

2.1.3 Norma internacional – critérios de uniformidade e estudos de modelagem

Para melhor utilização da zona de tratamento do precipitador, o gás deve ser bem distribuído no interior de cada carcaça e entre as carcaças (no caso de precipitadores com mais de uma carcaça). A teoria sugere uma distribuição homogênea ao longo das seções do PE e a mesma velocidade do gás em todas as passagens e altura do PE. Na prática esta condição não é possível de atingir devido à pequena distância para expansão da alta velocidade do duto para a zona de tratamento e também por pequenos obstáculos como perfis, placas defletoras, etc. (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005).

Além disso, é muito importante evitar o vazamento de gás para fora dos limites do campo elétrico. Por isso o perfil de velocidades deve estar compreendido entre o topo e a base das placas coletoras. Em princípio, é impossível atingir eficiências acima de 99,5 %, por exemplo, se 0,5 % do gás está sendo desviado do campo elétrico (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005).

O ICAC, *Institute of Clean Air Companies*, nos Estados Unidos, tem publicado recomendações para distribuições de gás aceitáveis, que devem ser seguidas por fornecedores, usuários e consultores de precipitadores eletrostáticos (ICAC, 2004). Fornecedores devem ter ainda requisitos mínimos para otimização de desempenho. As normas definem um valor máximo de *C.V.* (coeficiente de variação de velocidade) na entrada do PE.

A revisão de Junho/2004 da norma EP-7 do ICAC estabeleceu que o padrão de distribuição de velocidades nas seções transversais de entrada e saída do precipitador deve apresentar, no mínimo, 85% das leituras menores que 1,15 vezes a velocidade média e 99% das leituras menores que 1,40 vezes a velocidade média. Desta forma, recomenda-se que o coeficiente de variação (*C.V.*), dado pelas **Equações 5 e 6**, deve ser de 15 % ou menor.

$$C.V. = \frac{100 \times SD}{v_m} \quad (5)$$

$$SD = \left(\frac{\sum (v_i - v_m)^2}{n - 1} \right)^{0,5} \quad (6)$$

onde *C.V.* é coeficiente de variação de velocidade; *SD* é desvio padrão das leituras de velocidade; v_m é a velocidade média do gás; v_i é a velocidade do gás em cada ponto de leitura individual; *n* é o número de pontos de leitura.

Para realização do teste de medição de *C.V.*, o número mínimo de pontos de leitura de velocidade recomendável é de um ponto a cada 1,2 m² de área transversal. Um número máximo de leituras não é estabelecido. A distancia máxima vertical entre os pontos de leitura deve ser de 10% do total da altura da placa de coleta.

Para garantias de emissão de particulado maiores que 100 mg/Nm³ medidas menos restritivas são adequadas. A ICAC (2004) estabelece que 75% das leituras de velocidade nas seções transversais de entrada e saída do precipitador devem ser menor que 1,15 vezes a velocidade média e 95% das leituras menores que 1,40 vezes a velocidade média.

Restrições da planta, relativa ao *layout* e dutos e interações com outros equipamentos geralmente resultam em distribuição de gases de entrada muito distantes do que é considerado uniforme. Somente quando providências para correção da má distribuição de gases são tomadas, pode-se utilizar da melhor forma possível a área de coleta projetada. Desde a concepção até a posta em marcha, e, às vezes durante a vida útil do precipitador, existe a necessidade de se checar os efeitos de mudanças na distribuição de gases na eficiência de coleta do equipamento (GROVES; SMITH, 1980).

Não é fácil seguir a norma em todas as suas determinações, já que a velocidade é geralmente zero no topo e base das placas coletoras e como perfis e outras restrições fazem com que a medição seja dificultada. O interesse é a distribuição dos gases no interior das passagens de gás (entre placas de coleta e eletrodos de emissão), porém, estas medições geralmente são realizadas antes e depois do campo por questões práticas. Medições e correções, se necessário, na distribuição de gases devem ser realizadas sempre que possível quando um novo precipitador entra em operação. Um relatório mostrando os ajustes deve ser mantido com o usuário para questões de manutenção (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005).

A **Figura 9** mostra um exemplo de distribuição de velocidades na seção transversal de um grande precipitador, próximo à entrada da zona de tratamento, após o primeiro campo. O *C.V.* é 15% neste caso, um valor considerado normalmente aceitável. A distância entre os pontos de medição é 1 m e existe um grande número de relatórios mostrando que emissões de material particulado irão aumentar, caso a distribuição de gases seja menos homogênea.

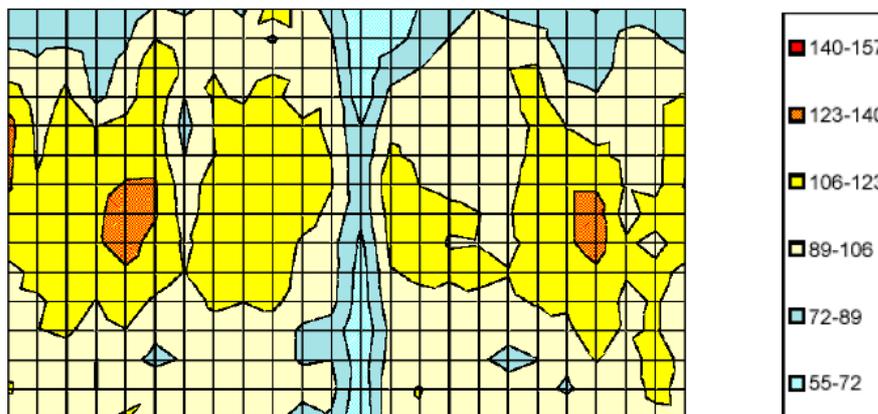


Figura 9. Exemplo de distribuição de gases através de uma seção transversal de um PE. Representação em cores do percentual da velocidade média (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005).

No exemplo da **Figura 9**, mostra-se a distribuição de gases através de uma seção transversal de um PE de 24 m de largura por 15 m de altura. A figura foi formada por medições de velocidade e as cores representam a porcentagem da velocidade média.

Uma prática comum é utilizar testes em modelos físicos quando são necessárias configurações especiais no duto de entrada, funis, etc. Modelos em escala 1:10 ou até 1:16 são usados. Testes conduzidos por laboratórios com larga experiência neste tipo de estudo, têm mostrado resultados semelhantes às plantas de tamanho real. O teste normalmente considera:

- a) distribuição do gás dentro e entre carcaças;
- b) tentativa de minimizar a perda de carga ao longo da planta;
- c) identificação das áreas e redução do risco de deposição de material particulado.

O uso de ferramentas computacionais (CFD) para distribuição de gases também é utilizado, porém com maior dificuldade para modelagem de todos os fatores internos ao PE. Por isso, recomenda-se uma checagem final da distribuição de gases em campo, no precipitador real (PORLE; FRANCIS; BRADBURN, 2005).

Segundo a ICAC (2004) a decisão sobre a necessidade de modelagem, física ou computacional, de um projeto é influenciada pelos seguintes fatores:

- a) análise do layout de dutos e confiança sobre a continuidade do projeto sem a necessidade de modelagem;
- b) a eficiência de remoção garantida pelo precipitador, ou seja, quanto mais próxima de 100%, maior a importância da uniformidade do fluxo; as partículas menores têm tendência de seguir as linhas de fluxo; há necessidade de que

praticamente nenhum gás passe externamente ao campo elétrico ou pelas tremonhas;

- c) em casos de projetos idênticos a outros já executados e com eficiência comprovada, o modelo pode ser omitido;
- d) em casos de simetria, ou seja, um grande precipitador subdividido em partes idênticas e simétricas, apenas uma divisão simétrica necessita ser modelada;
- e) nos casos em que a perda de carga do sistema faz parte da garantia, a modelagem pode assegurar a minimização destas perdas e irá apontar os pontos ou arranjos que provocam maior gasto de energia;
- f) para atingir-se a capacidade máxima do ventilador de exaustão, a uniformidade do fluxo é importante; recomenda-se, desta forma, a inclusão da modelagem dos dutos de saída, entre precipitador e ventilador;

De qualquer forma, mesmo com a realização de modelos físicos ou computacionais, após instalação do equipamento, uma inspeção criteriosa dos funis de entrada deve ser realizada em campo, para assegurar que os equipamentos de distribuição de gases (placas perfuradas e defletoras) foram instalados corretamente. Antes da partida do equipamento, medições de velocidade nas seções transversais na entrada e saída da zona de tratamento devem ser realizadas. Estas medições devem ser feitas nos mesmos locais em que os modelos de testes foram realizados servem para estabelecer o grau de correspondência entre o modelo e a instalação real (ICAC, 2004).

2.1.4 Cálculo de eficiência de coleta do PE com base distribuição de gases

Tanto a **Equação 1** (Equação de Deutsch) quanto à **Equação 2** (“Equação de Deutsch Modificada”) levam em consideração os seguintes fatores:

- a) a distribuição dos gases é absolutamente uniforme ao longo da seção transversal dos campos elétricos;
- b) não existe desvio de fluxo da região de tratamento para o teto ou área das tremonhas (DARBY, 1981).

Em relação à consideração (a), a **Figura 10** mostra a variação da eficiência do precipitador de acordo como o desvio, em relação ao padrão, da distribuição de velocidades apresentada por Darby (1981). Em condições ideais o PE atingiria 99% de eficiência. Normas publicadas pela I.G.C.I. (*Industrial Gas Cleaning Institute*) tendem a informar 98,8% de eficiência, enquanto, sob condições de má distribuição de gases, estas eficiências estariam bem abaixo de 97%.

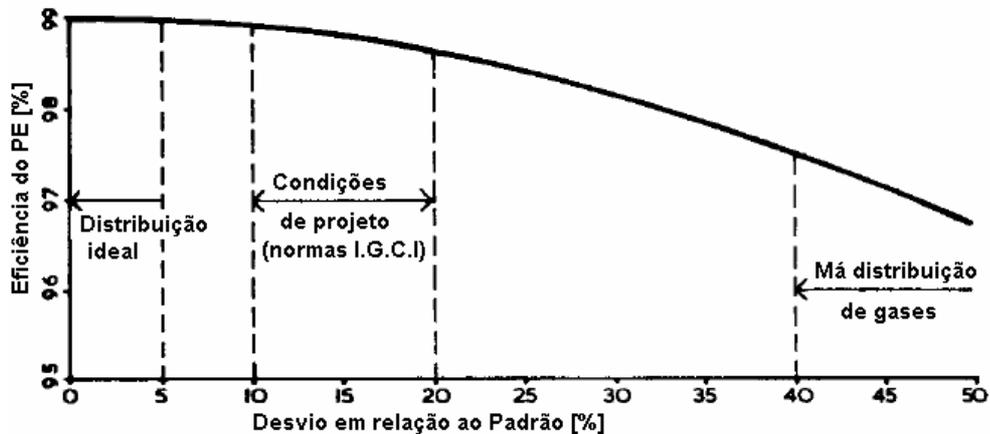


Figura 10. Variação de eficiência do precipitador, assumindo-se 99% de eficiência sob condições ideais (DARBY, 1981) .

De forma a se obter uma descrição quantitativa dos efeitos de distribuição de gás na eficiência de um precipitador eletrostático, Groves & Smith (1980) sugeriram uma metodologia de cálculo. Segundo esta publicação, pode-se dividir o precipitador em N seguimentos de iguais áreas transversais. Considerando cada seguimento como um pequeno precipitador independente, o precipitador completo compreende N pequenos PEs operando em paralelo. Considerando-se a **Equação 1** (Equação de Deutsch), a eficiência total (η_T) é dada por:

$$\eta_T = 1 - e^{-\left(\frac{\omega A}{Q}\right)} \quad (7)$$

A eficiência de um pequeno seguimento (η_i),

$$\eta_i = 1 - e^{-\left(\frac{\omega A}{NQ_i}\right)} \quad (8)$$

Onde, i indica o seguimento particular e varia de 1 a N ; Q_i é a vazão de gás em um seguimento particular.

É evidente que a eficiência de coleta total calculada (η_s) tem que ser igual à soma ponderada pela contribuição de vazão de cada seguimento, ou seja:

$$\eta_s = \frac{(\eta_1 Q_1 + \eta_2 Q_2 + \eta_3 Q_3 \dots)}{Q} \quad (9)$$

Para Groves & Smith (1980) podem-se resolver as equações acima para qualquer número de seguimentos. Na prática, o número de seguimentos selecionado pode ser igual ao número de pontos medidos durante a inspeção de campo, com tubo de *Pitot* ou anemômetro.

Groves & Smith (1980) consideram ainda que o valor de η_s calculado pela **Equação 9**, será, de forma inevitável, menor que o valor η_T da **Equação 7**. Na verdade, o valor só converge se a distribuição de gases é perfeita, ou seja $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q/N$. se a eficiência η_T representa a performance em condições ideais, o valor calculado η_s é uma medição direta da redução devido a uma distribuição de gases imperfeita.

Se a velocidade de migração em qualquer aplicação for considerada independente destas variações de fluxo de gases, então a perda de desempenho pode ser expressa por meio de uma redução de área de coleta do valor instalado A para o valor efetivo A_e :

$$\eta_S = 1 - e^{-\left(\frac{\omega A_e}{Q}\right)} \quad (10)$$

$$\frac{(A - A_e)}{A} = \frac{\ln(1 - \eta_T) - \ln(1 - \eta_S)}{\ln(1 - \eta_T)} \quad (11)$$

Como concluído por Groves & Smith (1980), nota-se que este simples cálculo não pode representar de forma completa todos os diversos e complexos mecanismos que podem ocorrer em um precipitador em escala industrial. Algumas considerações feitas são difíceis de checar na prática. Por exemplo, a concentração de particulado pode não ser constante ao longo da seção transversal do precipitador e pode sofrer re-entrada em regiões de alta velocidade. O gás é confinado horizontalmente por placas de coleta, porém poderá haver movimento vertical significativo entre as passagens. Também é necessário aceitar que valores empíricos e históricos de velocidade de migração irão se manter constantes, aceitando de forma não especificada, condições de má distribuição de velocidades.

Com relação ao desvio de fluxo da zona de tratamento, verifica-se que, na prática, uma distribuição perfeita de velocidades não é possível, sobretudo nas regiões do teto e tremonhas. A **Figura 11**, apresentada por Darby (1981), mostra, com a variação de eficiência e porcentagem de gás desviado da zona de tratamento (*bypass*), o efeito na velocidade de migração efetiva. Observa-se pelo gráfico que quanto menor o percentual da vazão de gás que é desviado da zona de tratamento, maior a velocidade de migração efetiva e maior a eficiência do PE. A velocidade de migração efetiva é obtida pelos dados dimensionais de um determinado precipitador e pelos testes de eficiência obtidos durante a operação.

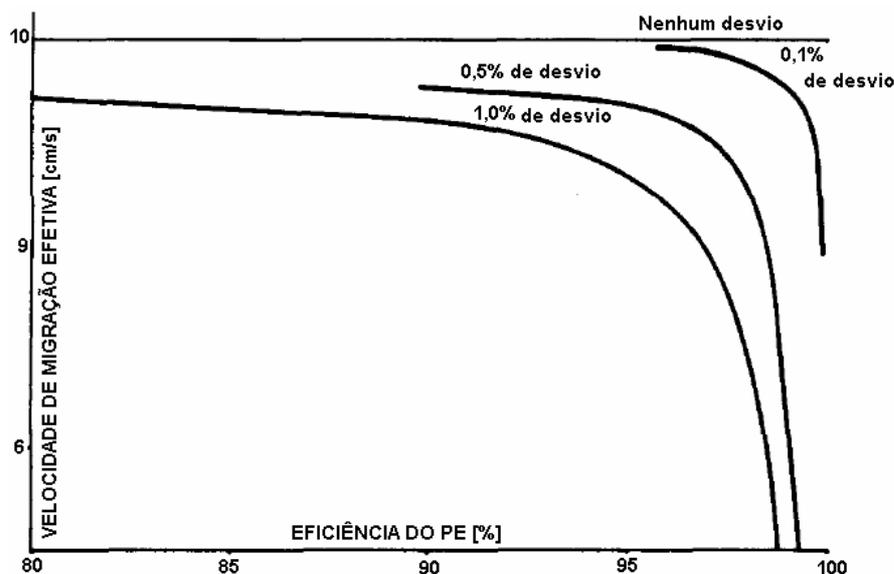


Figura 11. Velocidade de migração efetiva e eficiência de coleta do precipitador, variando-se as porcentagens de vazão desviada da área de tratamento (DARBY, 1981).

Nas plantas atuais, portanto, onde altas eficiências de remoção são garantidas, a quantidade de desvio de fluxo permitida, deve ser considerada menor que 0,1%. Esta condição é obtida pela instalação de placas defletoras no interior do precipitador, como já dito anteriormente (DARBY, 1981).

2.2 Placas perfuradas: cálculo de perda de carga e porosidade

A perda de carga através de placas perfuradas vem sendo estudada de forma ampla por meios experimentais e teóricos. Ao passar por um orifício, o fluxo sofre uma contração formando uma *vena contracta* a jusante, onde a velocidade é máxima e a pressão estática é mínima. Após este ponto, o fluxo sofre expansão e a velocidade aumenta até atingir a velocidade média no duto. Esta conversão de um tipo de energia em outro, ao longo da linha de fluxo, pode ser ilustrada pela Equação de Bernoulli (**Equação 12**) e pela **Figura 12** (BAINES;PETERSON, 1951).

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} + y + h_L = \text{constante} \quad (12)$$

onde p é a pressão estática; u a velocidade do fluido; y a altura (coordenada vertical); h_L a mudança de energia interna (*head loss*), g a constante gravitacional e ρ a densidade do fluido.

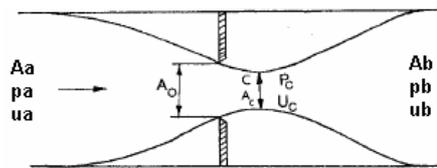


Figura 12. Placa de orifício em um duto. Observação da *vena contracta* (SAHIN, 1988).

A perda de carga de uma placa (perfurada ou de orifício) é usualmente expressa pelo coeficiente de perda de carga K , que é um número adimensional dado pela **Equação 13**:

$$K = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho u_m^2} \quad (13)$$

onde Δp é a diferença de pressão entre os pontos antes e depois da placa; u_m é a velocidade média do gás no duto a montante da placa.

Como uma placa perfurada é composta de um conjunto de orifícios, é importante o estabelecimento do conceito de porosidade ou fração de área aberta da placa. A porosidade de uma placa perfurada β é a razão entre a área livre projetada pela placa pela área transversal do duto onde a placa está inserida. Se todos os furos da placa apresentam o mesmo diâmetro d , então a porosidade β é dada pela **Equação 14**:

$$\beta = \frac{n \cdot \pi \cdot d^2}{4A_d} \quad (14)$$

onde n é o número de orifícios; d o diâmetro dos orifícios e A_d a área transversal total do duto ou difusor onde a placa está inserida.

Correlacionando-se a porosidade β , com o coeficiente de perda de carga K , algumas equações teóricas foram estabelecidas. Baines & Perterson (1951), por exemplo, consideraram que as placas perfuradas produzem uma série de jatos que coalescem gradualmente a jusante da placa. Desta forma, o fluxo através de cada placa perfurada pode ser visto como um movimento através de um orifício único de porosidade β . Finalmente, Baines & Perterson (1951) estabeleceram o coeficiente de perda de carga como mostrado nas **Equações 15 e 16**:

$$\frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho u_m^2} = \left[\frac{1 - \phi\beta}{\phi\beta} \right]^2 \quad (15)$$

$$\phi = \left[\frac{A_c}{A_o} \right] \quad (16)$$

onde A_c é a área transversal mínima na *vena contracta*; A_o é a área transversal do orifício e ϕ é o coeficiente de contração.

Ward-Smith (1980) fizeram uma correlação entre diversos trabalhos já publicados e estabeleceram relações para os coeficientes de perda de carga de acordo com tipo de regime, diferentes faixas de porosidade, espessura e diâmetro dos orifícios, como mostradas nas **Equações 17 e 18**. Por meio destas equações não é necessário o cálculo do coeficiente de contração como estabelecido por Baines & Perterson (1951):

a) para $0,006 < \beta < 0,75$ e $t_p/d < 0,8$, onde t_p é a espessura da placa perfurada

$$K = \left[\frac{1}{0,609\beta(1 - \beta^{2,6})[1 + (t_p/d)^{3,5}] + \beta^{3,6}} - 1 \right]^2 \quad (17)$$

b) para $0,002 < \beta < 0,53$ e $0,8 < t_p/d < 7,1$

$$K = \{ \beta[0,872 - 0,0149(t_p/d) - 0,08(t/d)](1 - \beta^{3,3}) + \beta^{4,3}[1 + 0,134(t_p/d)^{0,5}]^{-1} - 1 \}^2 \quad (18)$$

Um gráfico mostrando as correlações acima (**Equações 15 a 18**) e valores experimentais de K para diferentes porosidades foram consolidados no trabalho de Sahin (1988), como pode ser visto na **Figura 13**.

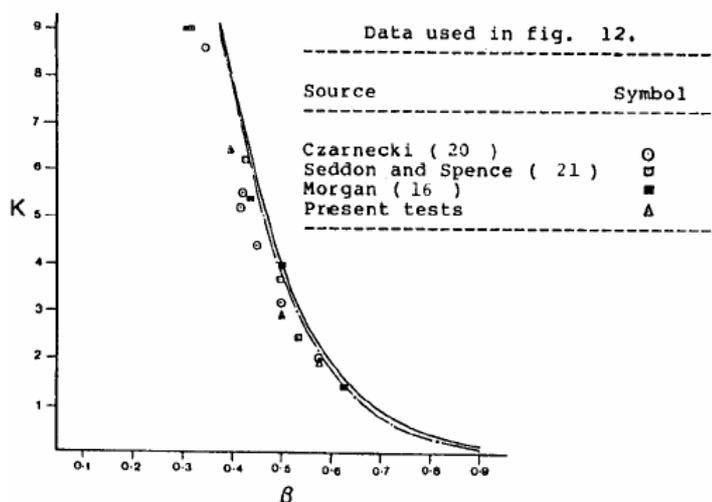


Figura 13. Coeficiente de perda de carga K pela porosidade β de placas perfuradas (SAHIN; WARD-SMITH, 1989).

Sahin (1988) apresentou ainda a variação de K com o número de Reynolds para placas de porosidades 0,4, 0,5 e 0,58 e $t_p/d = 0,25$, como pode ser visualizado na **Figura 14**.

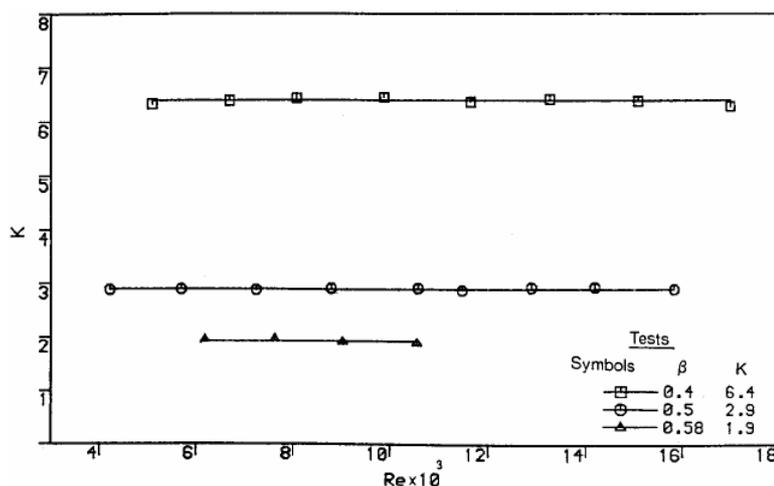


Figura 14. Variação do coeficiente de perda de carga, K , em função do número de Reynolds (SAHIN, 1988).

2.3 Experimentos na área de distribuição de gases – Modelos Físicos

Uma das primeiras investigações experimentais, sobre baixas velocidades através de difusores com maior ângulo de abertura, foi desenvolvida por Schubauer & Spangenberg (1948). Este trabalho se concentrou em um difusor de seção circular, e relação entre área de entrada e saída igual a 4 (*apud* SAHIN; WARD-SMITH, 1987).

Em seguida, Mehta (1977) apresentou extenso trabalho de pesquisa e coletou uma série de informações úteis sobre o projeto de difusores com grandes ângulos de abertura contendo telas ou placas perfuradas. A maior parte do trabalho desenvolvido se concentrou no projeto de túneis de vento. O trabalho de Mehta, juntamente com o de Schubauer & Spangenberg (1948) fornecem bons métodos

para obtenção de fluxos uniformes na saída de difusores. Ao final do trabalho, estes autores concluem que quatro placas perfuradas podem prover uma boa distribuição de gases para difusores com relações entre as áreas de entrada e saída igual a 5.

No entanto, no contexto de precipitadores eletrostáticos, as informações fornecidas por estas fontes são incompletas. Primeiramente, dados para relações de área acima de 5 são insuficientes. Segundo, o critério sobre grau de uniformidade do perfil de velocidades a ser utilizado não foi levado em consideração de forma expressiva. Estes fatores são importantes no caso de precipitadores eletrostáticos que, abaixo de certos limites de uniformidade, têm sua eficiência reduzida (SAHIN; WARD-SMITH, 1987).

Sahin & Ward-Smith (1987) trabalharam no uso de placas perfuradas como método de controle de fluxo na saída de difusores de maior ângulo de abertura, com aplicação em projetos de precipitadores eletrostáticos. O difusor utilizado por eles tinha uma relação entre as áreas de saída e entrada no difusor de 6,8 e ângulos de divergência de 97° no plano horizontal e 67° no plano vertical. Este modelo se baseou em um precipitador eletrostático utilizado na área de siderurgia. Foi observado que os principais fatores que influenciam a distribuição de velocidades em difusores com maior ângulo de abertura são: localização da placa perfurada, porosidade e número de placas instaladas no difusor. A seleção adequada destes três fatores pode eliminar a separação de fluxo, atingindo-se, de forma satisfatória, a uniformidade de fluxo na saída do difusor.

Sahin & Ward-Smith (1990) realizaram estudos experimentais de forma sistemática no mesmo modelo (geometria), para mostrar, por exemplo, que bons perfis de velocidade de saída podem ser atingidos utilizando-se apenas duas placas. Além disso, com placas de baixa porosidade, o fluxo de gases é direcionado da posição central para a região próxima à parede, à jusante da saída do difusor.

Sahin & Ward-Smith (1993) estudaram o fluxo no difusor e estabeleceram a geometria da região de separação de fluxo, distribuição de velocidades e ângulos de fluxo, ao longo do difusor. O perfil de velocidades no plano de saída de difusores pode ser ainda controlado utilizando-se placas perfuradas com porosidade distribuída de forma não uniforme.

De forma a investigar conclusões prévias publicadas em 1987 e 1990 por Sahin & Ward-Smith, Sahin (1991) investigou a utilização de três placas perfuradas; duas de porosidade de 0,58 e a última placa com porosidade 0,5. Além disso, foram aplicadas técnicas de distribuição de porosidade com o bloqueio de regiões da última placa e verificação seu efeito nos diversos arranjos de difusores. No mesmo ano, Ward-Smith *et al.* (2004) reportaram um estudo sistemático do padrão de fluxo e regimes em difusores com relação de 10 entre as áreas de saída e entrada de difusores piramidais, com ângulos internos de 45° e 60° .

Derbunivich e colaboradores (1993) publicaram uma investigação experimental sobre a supressão de turbulência, em túneis de vento, utilizando-se um conjunto de telas. Foram listadas recomendações sobre a escolha do número de telas, parâmetros geométricos e sua localização, de forma a garantir a redução de turbulência.

Mais recentemente, Noui-Mehidi e colaboradores (2005) verificaram a necessidade de adição de mais uma placa perfurada (três placas no total) para aperfeiçoamento da distribuição de fluxo em difusores assimétricos e com maior ângulo de abertura

(relação entre áreas de entrada e saída igual a 7). Neste trabalho, um difusor que equivale à metade de um difusor convencional foi utilizado: um dos lados é plano, paralelo ao fluxo, e outro possui uma abertura de 45° . O fluido de teste foi água e as placas utilizadas apresentavam porosidade igual a 0,45. Esta forma de controle se mostrou eficiente para uso em difusores assimétricos de precipitadores eletrostáticos.

2.3.1 Metodologia e principais conclusões de experimentos físicos pesquisados

Entre os trabalhos desenvolvidos por Sahin & Ward-Smith, alguns dos que mais se destacam pela riqueza de dados e conclusões são os desenvolvidos em 1987 e 1990. Busca-se agora descrever de forma mais detalhada a metodologia aplicada e as principais conclusões apresentadas por estes autores. Este resumo serve de base para o presente trabalho.

A representação esquemática do equipamento utilizado na investigação é mostrada na **Figura 15**. O equipamento foi operado em circuito semi-fechado, uma pequena quantidade de ar entrava continuamente pelo sistema.

A maior velocidade média do fluxo de ar medida foi aproximadamente 3,7 m/s na saída do difusor, correspondendo a um número de Reynolds, baseado no diâmetro equivalente de $Re = 2,6 \times 10^5$.

A seção de trabalho sob investigação, que compreendia as combinações de difusor e placas perfuradas, consistia em um difusor piramidal com ângulo aberto, com duto de entrada quadrado (0,46m X 0,46m) e uma saída retangular (1,02m X 1,42m) como mostrado nas **Figuras 15 e 16**. O comprimento do duto retangular era 1,30 m. O ângulo de divergência total era $2\gamma = 97^\circ$ na direção horizontal $2\alpha = 67^\circ$ na direção vertical, e o comprimento do difusor era $L_D = 0,425$ m. As placas perfuradas apresentavam furos de diâmetro $d = 0,006$ m e espessura $t_p = 0,0015$ m. As porosidades β de 0,4 e 0,5 foram investigadas. Uma terceira placa com furos de diâmetro $d = 6,35$ mm, espessura $t_p = 0,0015$ m e porosidade β de 0,58 também foi investigada.

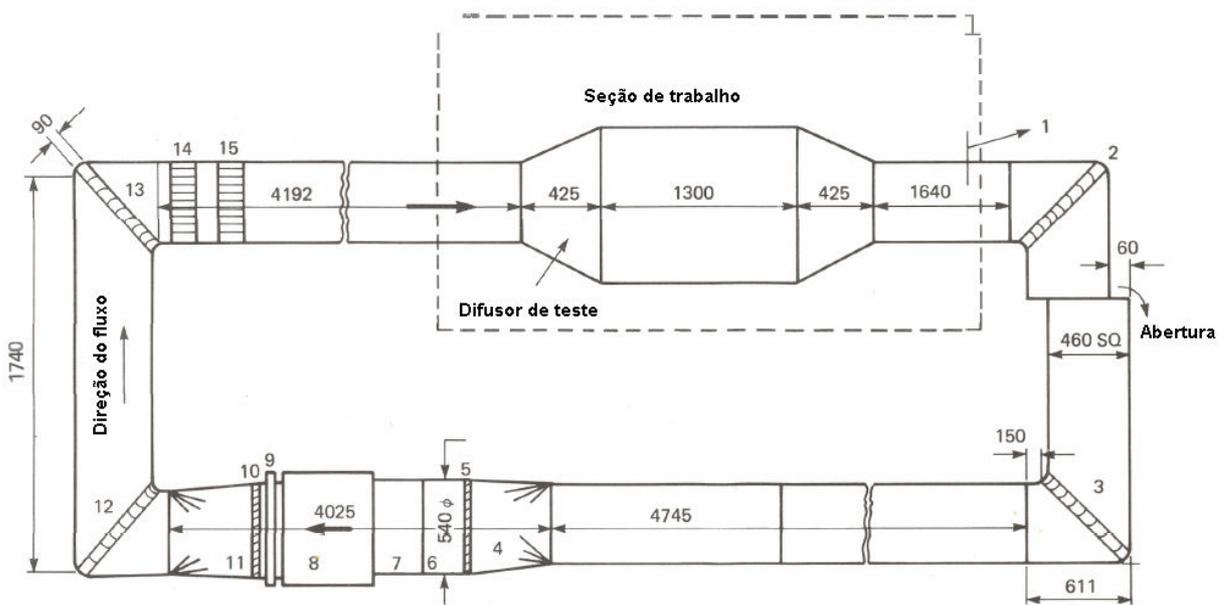


Figura 15. Representação esquemática (fora de escala) do modelo de teste utilizado por Sahin & Ward-Smith (1987). Dimensões em milímetros.

A placa a montante é denominada BB e a jusante, AA. Nesta investigação, nenhuma placa coletora foi instalada na zona de tratamento, permitindo que toda a atenção fosse concentrada na característica do fluxo que emergia do difusor, de acordo com as combinações de placas. Medições de velocidade foram feitas em uma malha de 361 pontos (19 X 19) nas seções S2, S3 e S4 (ver **Figura 16**), utilizando um tubo de Pitot padrão.

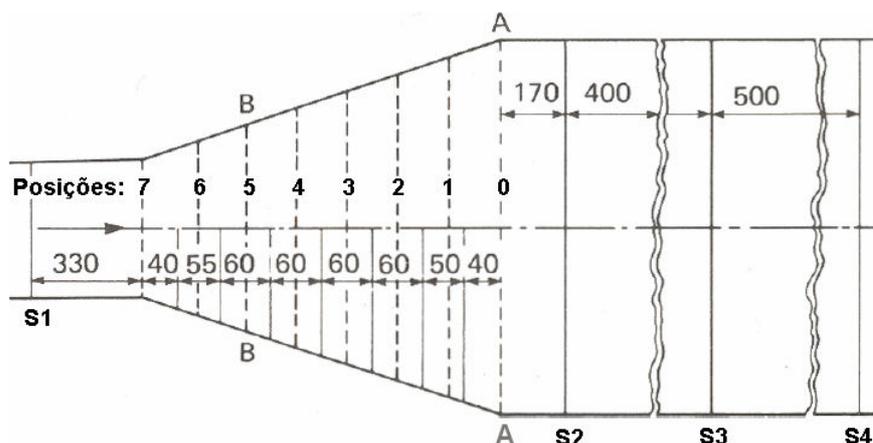


Figura 16. Seções de medição (S1, S2, S3 e S4) e posições das placas perfuradas; dimensões em [mm] (SAHIN; WARD-SMITH, 1987).

Neste estudo foram feitas estimativas de perda de carga dos arranjos de placas e difusor por meio de medições físicas e modelos matemáticos. Os pontos de medição de pressão (p) são apresentados na **Figura 17**. As áreas nas diversas posições são representadas pela letra A e a velocidade pela letra u .

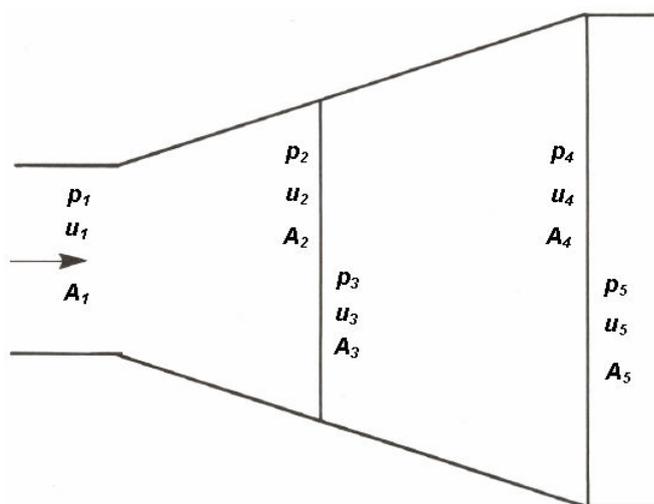


Figura 17. Fluxo unidimensional no difusor e denominação dos locais de medição de pressão (SAHIN; WARD-SMITH, 1987).

A resistência à passagem do gás oferecida pelo conjunto placas perfuradas e difusor pode ser estimada utilizando-se métodos baseados no fluxo unidimensional, somando-se as perdas nos dois componentes. Duas formas de cálculo desta

resistência, ou coeficiente de perda de carga global, foram identificadas e referenciadas como Modelo Empírico I e Modelo Empírico II. Nos dois modelos empíricos são levadas em consideração as perdas de carga nas placas perfuradas. A diferença entre os dois modelos está na forma de tratamento do fluxo através do difusor. Os dois modelos foram desenvolvidos para o uso de apenas duas placas para controle de fluxo.

a) Modelo Empírico I: assume que o difusor contribui para a perda de carga total através das diversas combinações de arranjos de placas. O coeficiente de recuperação de pressão global (C_p) é dado pela **Equação 19**.

$$C_p = (C_{p2} - K) \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 + (C_{p1} - K) \left(\frac{A_1}{A_4} \right)^2 = \frac{p_5 - p_1}{\frac{1}{2} \rho u_1^2} \quad (19)$$

$$C_{p1} = \frac{p_2 - p_1}{\frac{1}{2} \rho u_1^2}$$

$$C_{p2} = \frac{p_4 - p_3}{\frac{1}{2} \rho u_3^2}$$

Onde C_p é o coeficiente de recuperação de pressão global do conjunto placas e difusor; C_{p1} é o coeficiente de recuperação de pressão global do da placa BB; C_{p2} é o coeficiente de recuperação de pressão global do da placa AA; K é o coeficiente de perda de carga; A_1 é a área da seção transversal do duto de entrada; A_2 é a área da seção transversal da placa BB; A_4 é a área da seção transversal da placa AA; p_1 é a pressão estática no duto de entrada; p_2 é a pressão estática antes da placa BB; p_3 é a pressão estática depois da placa BB; p_4 é a pressão estática antes da placa AA; p_5 é a pressão estática depois da placa AA; u_1 é a velocidade do gás no duto de entrada; u_3 é a velocidade do gás depois da placa BB; ρ é a densidade do gás.

b) Modelo Empírico II: assume fluxo ideal e, portanto, nenhuma perda de carga irrecuperável é atribuída ao difusor. Por este modelo, o coeficiente de recuperação de pressão global (C_p) é dado pela **Equação 20**.

$$C_p = 1 - K \left[\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 + \left(\frac{A_1}{A_4} \right)^2 \right] - \left(\frac{A_1}{A_4} \right)^2 = \frac{p_5 - p_1}{\frac{1}{2} \rho u_1^2} \quad (20)$$

Como reportado por Sahin (1985), valores experimentais de coeficientes de perda de carga K de 6,4, 2,9 e 1,9 foram determinados para placas de porosidades iguais a $\beta = 0,4, 0,5$ e $0,58$ respectivamente (*apud* SAHIN; WARD-SMITH, 1987).

Os resultados das medições bem como dos cálculos pelos dois modelos empíricos para placas de $\beta = 0,5$ são apresentados na **Tabela 1** e **Figura 18**.

Tabela 1 - Dados de geometria e coeficiente de perda de carga para modelo físico; $\beta = 0,5$ (SAHIN; WARD-SMITH, 1987)

Posição Placa AA	Posição Placa BB	Arranjo	A1 [m ²]	A2 [m ²]	A4 [m ²]	L1/D1	Cp1	Cp2	Cp Modelo Empírico I	Cp Modelo Empírico II	Cp Experimento (Leitura do gráfico)
0	1	01	0,21	1,2	1,45	0,79	0,24	0,35	0,10	0,83	-0,10
0	2	02	0,21	0,98	1,45	0,66	0,26	0,43	0,08	0,78	-0,15
0	3	03	0,21	0,79	1,45	0,53	0,32	0,4	0,08	0,71	-0,20
0	4	04	0,21	0,62	1,45	0,4	0,38	0,37	0,02	0,58	-0,25
0	5	05	0,21	0,46	1,45	0,27	0,42	0,36	-0,18	0,30	-0,40
0	6	06	0,21	0,33	1,45	0,14	0,43	0,27	-0,71	-0,28	-0,90
0	7	07	0,21	0,21	1,45	0	0	0,23	-2,77	-2,03	-2,50

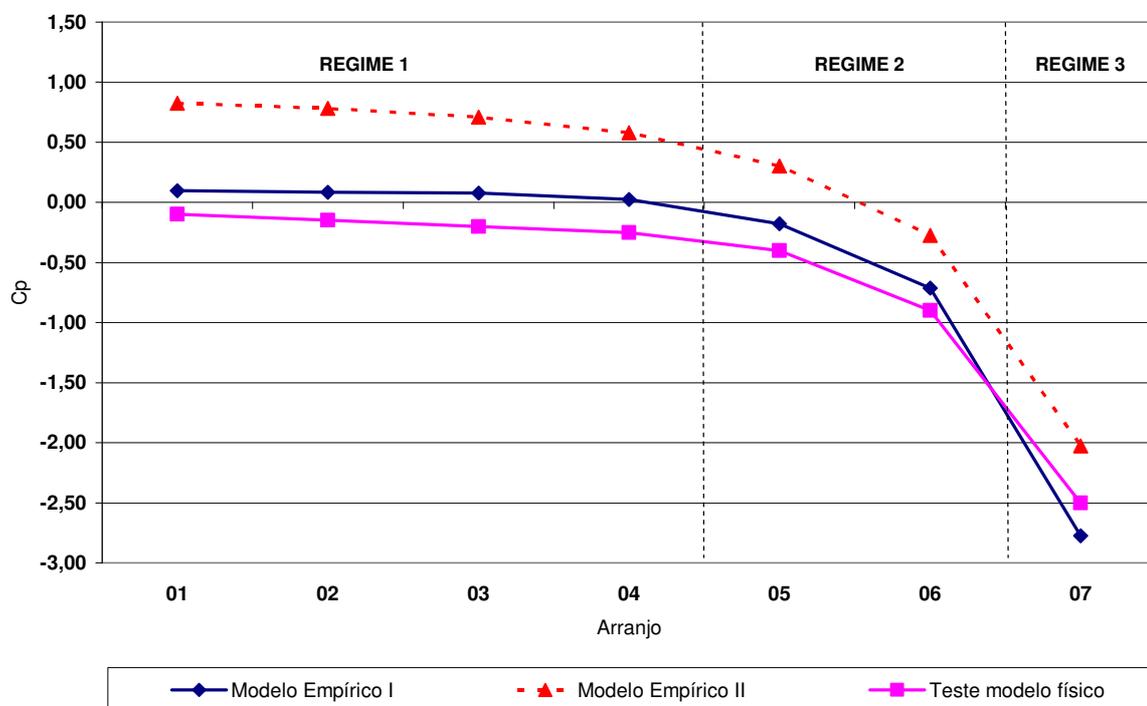


Figura 18. Coeficiente de perda de carga através de combinações de posições de placas. Placa AA em posição fixa e placa BB em posição variável. Porosidade (β) igual a 0,5. (SAHIN; WARD-SMITH, 1987).

As principais conclusões apresentadas nesta publicação, que descreve a execução de modelos físicos (SAHIN; WARD-SMITH, 1987), são:

- a) a uniformidade do fluxo é função da porosidade das placas e localização das mesmas;
- b) o arranjo que permitiu maior uniformidade de fluxo foi feito com placas de porosidade 0,5 localizadas nas posições 1 (placa AA uma posição antes do final do difusor ou $L1/D1 = 0,79$) e 6 (placa BB uma posição após o início do difusor $L1/D1 = 0,14$), portanto denominado arranjo 16; nesta posição os valores de C.V. encontrados em cada posição de medição foram 15%, 16,8%, e 13% em S2, S3 e S4 respectivamente;

- c) os valores do coeficientes de perda de carga C_p medidos e encontrados pelo Modelo Empírico I para diversas combinações de placas apresentam valores mais próximos se comparados com os valores obtidos pelo Modelo Empírico II;
- d) pelo gráfico de C_p (**Figura 18**), pelas medições realizadas e pelos valores de $C.V.$ encontrados, pôde-se classificar o regime de fluxo de saída do difusor em três regimes:
- **Regime 1**, onde a perda de carga é mínima; a velocidade é maior próximo à parede; e os valores de $C.V.$ não são satisfatórios; este tipo de regime foi encontrado nos arranjos 01, 02, 03 e 04;
 - **Regime 2**, onde a perda de carga é maior que no Regime 1, porém perfis mais uniformes são encontrados na saída do difusor; este tipo de regime foi encontrado nos arranjos 05 e 06 bem como no arranjo ótimo 16, com placas de porosidade 0,5 localizadas nas posições 1 (placa AA) e 6 (placa BB);
 - **Regime 3**, onde a perda de carga aumenta muito sem nenhum ganho em uniformidade; este tipo de regime foi encontrado no arranjo 07;
- e) observou-se que, para uma maior uniformidade de fluxo, a placa maior (AA) deve ser posicionada antes do final do difusor (posição 1);
- f) com a variação de porosidade, foram feitas as seguintes observações:
- o uso de placas com porosidade 0,58 levou a altas velocidades no centro; não importando a posição em que foram colocadas, a resistência K oferecida era muito baixa para distribuir uniformemente o fluxo no final do difusor;
 - o uso de placas com porosidade 0,4 levou a altas velocidades nas paredes devido à alta resistência e aos altos ângulos de divergência encontrados;
 - verificou-se que quanto menor a porosidade, maior a capacidade de mudança de direção do fluxo; quanto maior o ângulo do difusor, menor a porosidade necessária para mudança de direção; quanto menor o ângulo do difusor, placas de maior porosidade, ou menor resistência, são apropriadas para obtenção de uma boa distribuição de gases;
- g) observou-se a ocorrência de separação de fluxo (recirculação) na entrada do difusor quando a placa BB era posicionada mais a jusante; este efeito é diminuído quando se afasta a placa BB da placa AA para região a montante.

Diagramas esquemáticos dos perfis de velocidade observados em Sahin & Ward-Smith (1987) são mostrados na **Figura 19**.

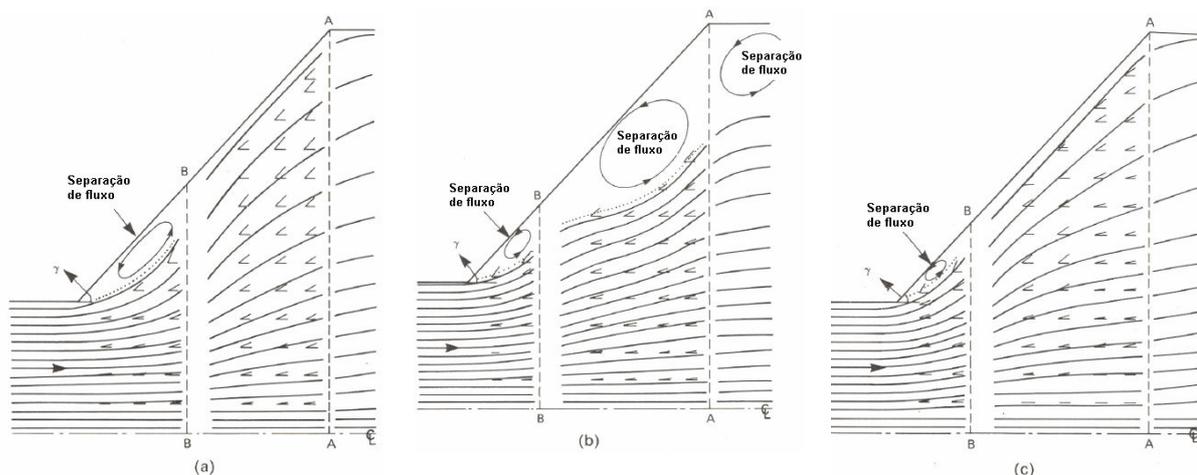
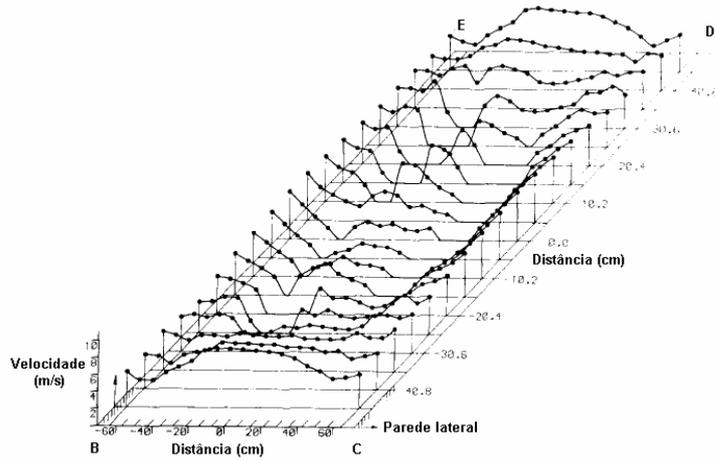
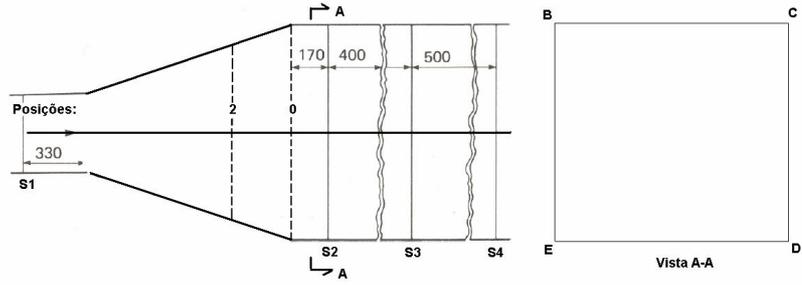


Figura 19. Diagramas esquemáticos do perfil de fluxo no plano horizontal. Ângulo de abertura do difusor (2γ) igual a 97° ; (a) $\beta = 0,5$; (b) $\beta = 0,58$; (c) $\beta = 0,4$ (SAHIN; WARD-SMITH, 1987).

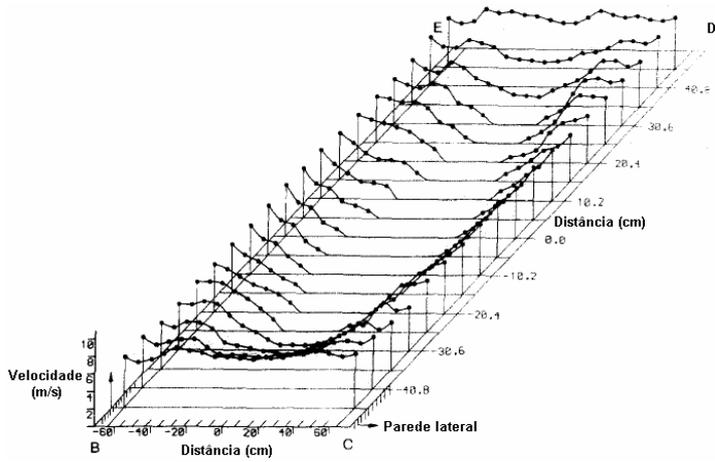
Na publicação de Sahin & Ward-Smith (1990), experimentos semelhantes aos relatados previamente em Sahin & Ward-Smith (1987) foram executados, porém com o foco no estudo do perfil de velocidades na zona de tratamento. Gráficos das medições físicas foram criados, dando uma melhor idéia do desenvolvimento do fluxo no interior do precipitador, de acordo com os diversos arranjos das placas perfuradas.

As principais conclusões apresentadas neste artigo foram:

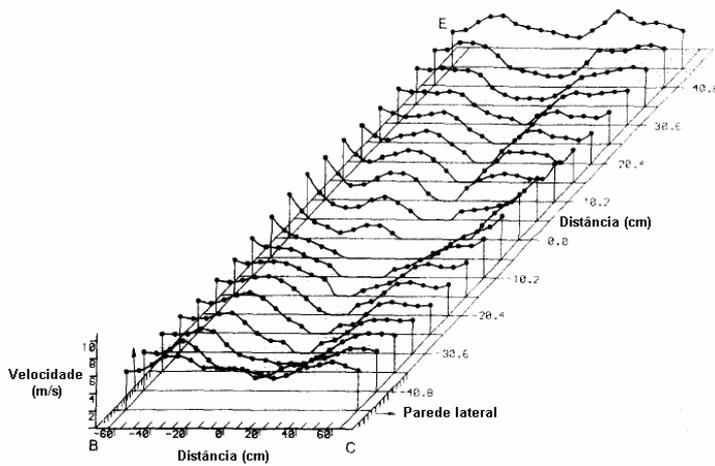
- a) observou-se que na posição S1, apresentada na **Figura 16** no duto de entrada reto, a velocidade é uniforme, independente da posição das placas;
- b) resultados com apenas uma placa perfurada colocada no difusor são insatisfatórios; observou-se presença de baixas velocidades nos cantos do precipitador (zona de tratamento), o que levou à instalação da segunda placa para novos testes;
- c) para o arranjo 02 (placa AA fixa no final do difusor e placa BB duas posições antes do final do difusor), foi relatado um comparativo entre os perfis de velocidade nos locais S2, S3 e S4 indicados na **Figura 16** como início, meio e saída da zona de tratamento respectivamente, ver **Figura 20**:
 - em S2, observou-se maior velocidade no centro;
 - em S3 há redução de velocidade no centro e maiores velocidades próximo às paredes;
 - em S4 observa-se a diminuição da região de baixas velocidades no centro.
- d) observou-se que, conservando-se a placa AA fixa no final do difusor, à medida em que a placa BB era deslocada para montante, ocorria a eliminação de baixa velocidade no centro da zona de tratamento como pode ser visualizado na **Figura 21**;



(a) Posição S2

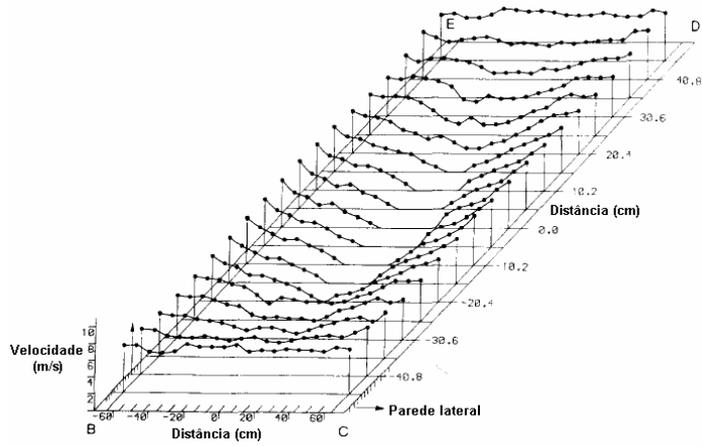
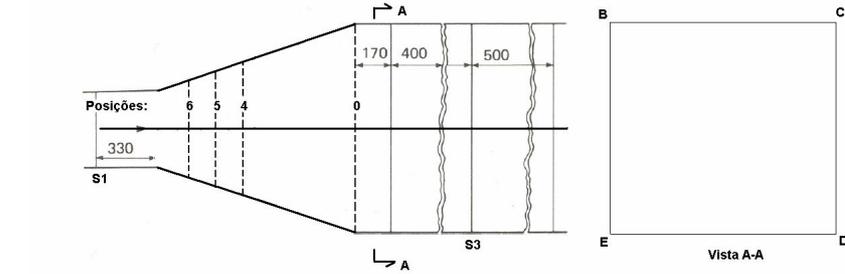


(b) Posição S3

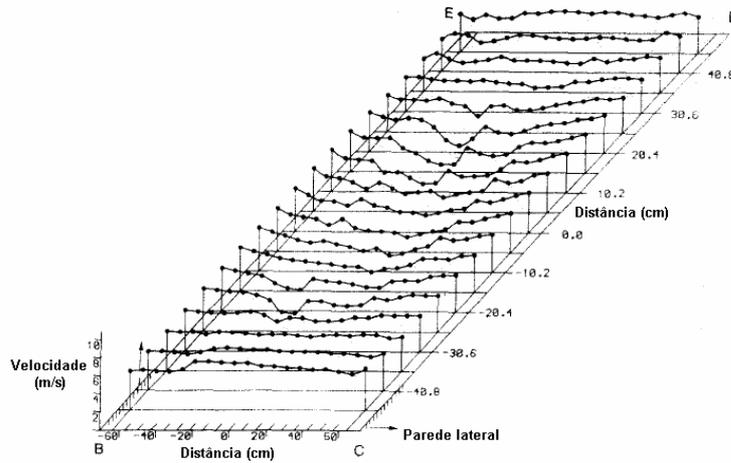


(c) Posição S4

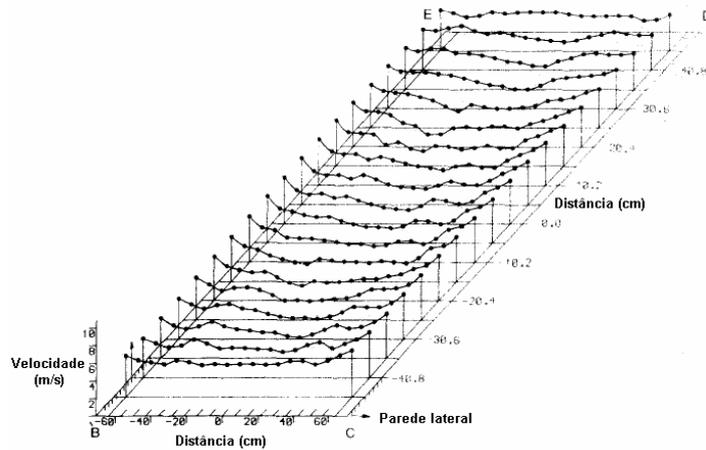
Figura 20. Distribuição de velocidades para o arranjo 02 medidos nas posições S2 (a); S3 (b); S4 (c) (SAHIN; WARD-SMITH, 1990).



(a) Arranjo 04



(b) Arranjo 05



(c) Arranjo 06

Figura 21. Distribuição de velocidades para arranjos 04 (a), 05 (b) e 06 (c) na posição S3 (SAHIN; WARD-SMITH, 1990).

- e) verificou-se que o perfil de velocidades conseguido com o arranjo 07 (placa AA fixa no final do difusor e placa BB no início do difusor) é semelhante ao perfil observado com o uso de uma única placa perfurada no final do difusor;
- f) os ângulos de deflexão do fluxo após a passagem pelas placas são maiores quanto maior o ângulo do difusor; na direção horizontal, que apresenta maior ângulo interno ($2\gamma = 97^\circ$), o ângulo de deflexão é maior e é influenciado pela posição das placas.

2.4 Fluidodinâmica computacional

O uso de modelos matemáticos para solução de complexos problemas da engenharia e da física é hoje uma realidade, graças ao desenvolvimento de computadores de alta velocidade e de grande capacidade de armazenamento (MALISKA, 1995). O termo Fluidodinâmica Computacional é uma tradução literal do inglês *Computational Fluid Dynamics* (CFD) e é empregado à combinação de computadores digitais de alta velocidade e modelagem matemática por métodos numéricos, pelo desenvolvimento de algoritmos de alta precisão (ANDERSON JR., 1981), para solução de problemas físicos ou físico-químicos que apresentam escoamento. A predição dos campos de concentração, velocidades, pressão, temperaturas e propriedades turbulentas é efetuada através de modelos diferenciais baseados nos princípios gerais da conservação de massa, energia e quantidade de movimento, no domínio do espaço e do tempo (EMIN, 2006).

Tudo em CFD, de uma forma ou de outra, é baseado nas equações fluidodinâmicas fundamentais de continuidade, conservação de energia e quantidade de movimento (ANDERSON JR., 1981). Os conceitos matemáticos básicos são:

- a) a massa se conserva;
- b) a quantidade de movimento se conserva (segunda lei de Newton);
- c) a energia se conserva (primeira lei da Termodinâmica).

As equações que descrevem estes conceitos são equações diferenciais que não podem ser resolvidas analiticamente. Desta forma, os balanços são resolvidos numericamente, em geral, por meio do método de volumes finitos. Para isso, divide-se o domínio num certo número de volumes, e ao conjunto destes volumes dá-se o nome de malha. Os elementos dessa malha possuem uma geometria onde seja fácil resolver os balanços, como tetraedros ou prismas.

Assim, gera-se um sistema de n equações lineares, com n incógnitas, onde n é o número de elementos da malha. Quanto maior o valor de n , mais preciso é o resultado obtido, porém mais tempo e capacidade de processamento computacional são necessários (EMIN, 2006). Na busca por resultados mais precisos, há a necessidade, cada dia mais, de alta capacidade de cálculo e poderosas ferramentas computacionais. As equações e modelos envolvidos no presente trabalho são descritos nos próximos itens.

2.4.1 Modelos fluidodinâmicos

Como já dito, os conceitos de conservação de massa, energia e quantidade de movimento regem a fluidodinâmica.

A **Equação 21** apresenta a equação da continuidade, ou seja, define a conservação de massa em coordenadas cartesianas (x , y e z):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (21)$$

onde v é a velocidade de fluxo nas coordenadas x , y e z e t é o tempo.

A **Equação 22** define a conservação de energia em coordenadas cartesianas:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \dot{g} + k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (22)$$

onde T é a temperatura \dot{g} é a quantidade de energia gerada; k_c o coeficiente de condutividade térmica e c_p o calor específico a pressão constante.

As equações de Navier Stokes para conservação da quantidade de movimento, representadas nas três direções cartesianas (x , y e z), são definidas pelas **Equações 23, 24 e 25**.

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \quad (23)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \quad (24)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \quad (25)$$

$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_1 \quad \underbrace{\hspace{3.5cm}}_2 \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_3 \quad \underbrace{\hspace{3.5cm}}_4$

Os termos nas posições 1, 2, 3 e 4 representam o acúmulo, o fluxo convectivo, a geração e o fluxo molecular da quantidade de movimento respectivamente.

As equações de Navier-Stokes descrevem o fenômeno básico de transporte de massa e quantidade de movimento. Estas equações podem ser utilizadas para simulações de fluxo turbulento, embora uma malha com grande número de elementos precise ser gerada para capturar toda a dinâmica do fluxo. Uma alternativa é considerar equações médias, resultantes de uma hierarquia de equações e conhecimento estatístico, como faz o modelo k -epsilon ou simplesmente k - ϵ descrito a seguir (COMSOL, 2005).

Uma das mais antigas observações sobre a natureza da turbulência e as pequenas zonas de recirculação (*eddies*) que se formam, foi descrita em analogia com o movimento caótico de uma molécula em um volume de gás. Como resultados desta analogia, foram elaborados modelos de natureza difusiva (COMSOL, 2005).

Nos primeiros modelos, o transporte por pequenas zonas de recirculação (*eddies*) foi modelado por uma constante de viscosidade adicional. Isto implica que o transporte de quantidade de movimento por pequenas zonas de recirculação (*eddies*) é transformado em transporte por atrito, chamado de viscosidade turbulenta. Esta constante viscosidade turbulenta foi substituída mais tarde por funções de espaço para as quais as equações de transporte estavam definidas. O número de equações, em adição à continuidade de momento e massa, geralmente classifica o modelo (COMSOL, 2005).

Para modelagem da turbulência foi adotado o modelo $k-\varepsilon$ no presente trabalho. O modelo $k-\varepsilon$ é um dos modelos de turbulência mais utilizados atualmente e utiliza duas equações, uma para energia cinética turbulenta (k), e outra para a taxa de dissipação de energia (ε). Por energia cinética turbulenta, entende-se a variância das flutuações na velocidade, e por dissipação de energia, a taxa com a qual as flutuações na velocidade se dissipam (WILCOX, 2000).

Uma das representações publicadas por Wilcox (2000) que descrevem este modelo são apresentadas a seguir:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_j k)}{\partial x_j} = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \varepsilon \quad (26)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_j \varepsilon)}{\partial x_j} = -C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (27)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (28)$$

onde ν_t é a viscosidade turbulenta dada pela **Equação 28**; \bar{u} é a velocidade média do escoamento e u' a velocidade flutuante e $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, C_μ , σ_k , σ_ε são constantes empíricas.

O modelo $k-\varepsilon$ é válido para transporte de quantidade de movimento em fluxos com altos valores de Reynolds. Esta é uma forma atrativa para estudar fluxos turbulentos, sabendo-se que este adiciona apenas duas equações ao modelo original de Navier-Stokes (COMSOL, 2005). O número de Reynolds turbulento é dado por:

$$\text{Re}_T = \frac{k^2}{\varepsilon \nu} \quad (29)$$

O modelo $k-\varepsilon$ apresenta a oportunidade de levar em consideração o transporte turbulento em estados próximos ao isotrópico. De qualquer forma, próximo às paredes sólidas, o transporte turbulento não é mais isotrópico, já que as flutuações resultando em turbulência variam bastante em magnitude e direção. O número de Reynolds turbulento se aproxima de zero na sub-camada viscosa (WILCOX, 2000). Nestas regiões, desvios da isotropia não são mais desprezíveis e precisam ser levados em consideração por um modelo próprio (COMSOL, 2005).

2.4.2 Experimentos na área de distribuição de gases utilizando-se Modelos Computacionais

Uma das primeiras publicações que revelam o uso de modelos computacionais para estudo de placas perfuradas foi elaborada por Gan & Riffat (1997). Este estudo foi conduzido para obtenção das características de perda de carga de placas de orifício e placas perfuradas. Testes físicos foram realizados para determinação de coeficientes de perda de carga para placas finas em dutos quadrados para diversos números de Reynolds. A fluidodinâmica computacional (CFD) foi utilizada para previsão de coeficientes de perda de carga e o resultado foi comparado como os dados experimentais medidos. Nesta época, com a capacidade computacional disponível (Silicon Graphics, Indy LC, 32 MB de memória) e devido ao grande número de elementos requeridos para representação da geometria de placas

perfuradas com orifícios circulares, não foi possível modelar o duto inteiro. Desta forma, a previsão em CFD foi simplificada com a utilização de orifícios quadrados, com a mesma área livre (ou porosidade) da placa de teste. Esta simplificação foi considerada razoável, pois, o coeficiente de perda de carga medido para uma placa com orifícios circulares pode ser aplicado para uma placa com orifícios quadrados, desde que possua a mesma porosidade, segundo Miller (1990). Por fim, neste estudo observou-se que CFD pode ser usada para previsão de coeficientes de perda de carga e que a geometria dos orifícios pode ser simplificada para as placas perfuradas.

Considerando-se a aplicação direta de modelos numéricos ou computacionais à operação e estudo de eficiência de precipitadores eletrostáticos, muitos artigos vêm sendo publicados. A maioria destas publicações, porém, é dedicada à descrição de modelagem do campo elétrico aplicado juntamente com fenômenos de transporte no interior do precipitador. Publicações relativas apenas à simulação distribuição de gases na entrada de precipitadores eletrostáticos são mais difíceis de serem encontradas.

Bernstein & Crowe (1981) publicaram a descrição de um trabalho experimental e um modelo numérico para descrever os efeitos da interação entre fluidodinâmica, eletrostática e dinâmica da partícula em precipitadores eletrostáticos. A investigação numérica relatada foi conduzida por métodos computacionais e apresentou, de forma qualitativa, resultados semelhantes aos encontrados experimentalmente. A **Figura 22** mostra resultados computacionais do perfil de velocidades próximo a uma placa coletora com (a) e sem (b) a ação do campo elétrico.

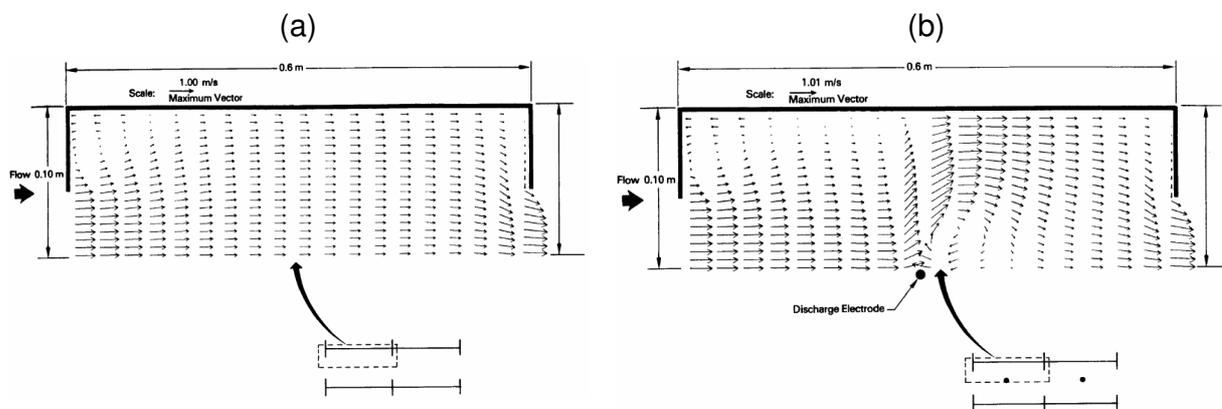


Figura 22. (a) Velocidade do fluxo de gases próximo ao eletrodo de coleta. (b) Velocidade do fluxo de gases próximo ao eletrodo de coleta, com a presença um eletrodo de descarga rígido. Tensão média 70kV e densidade de carga iônica $30 \mu\text{C}/\text{m}^2$ (BERNSTEIN; CROWE, 1981).

Gallimberti (1998) publicou um modelo matemático para simulação das condições operacionais em precipitadores eletrostáticos de grande escala. O modelo, completamente modular, habilita a resolução de simulações envolvendo fenômenos de precipitação eletrostática, levando em consideração processos elétricos e de transporte importantes, que ocorrem dentro do equipamento. Cada processo específico (por exemplo, a descarga de energia, a ionização de partículas, a coleta de partículas, o batimento, o fenômeno de reentrada, etc.) é representado por um modelo matemático robusto, em separado, baseado inteiramente nas leis físicas mais relevantes. Medições de laboratório em células sob condições controladas

foram utilizadas tanto para obter as informações básicas necessárias como para validação de cada módulo do modelo. O modelo de Gallimberti (1998) é organizado em quatro seções, como mostrado na **Figura 23**: a vazão e gases; o campo elétrico e os processos de descarga; a ionização de partículas e migração; a coleta de partículas.

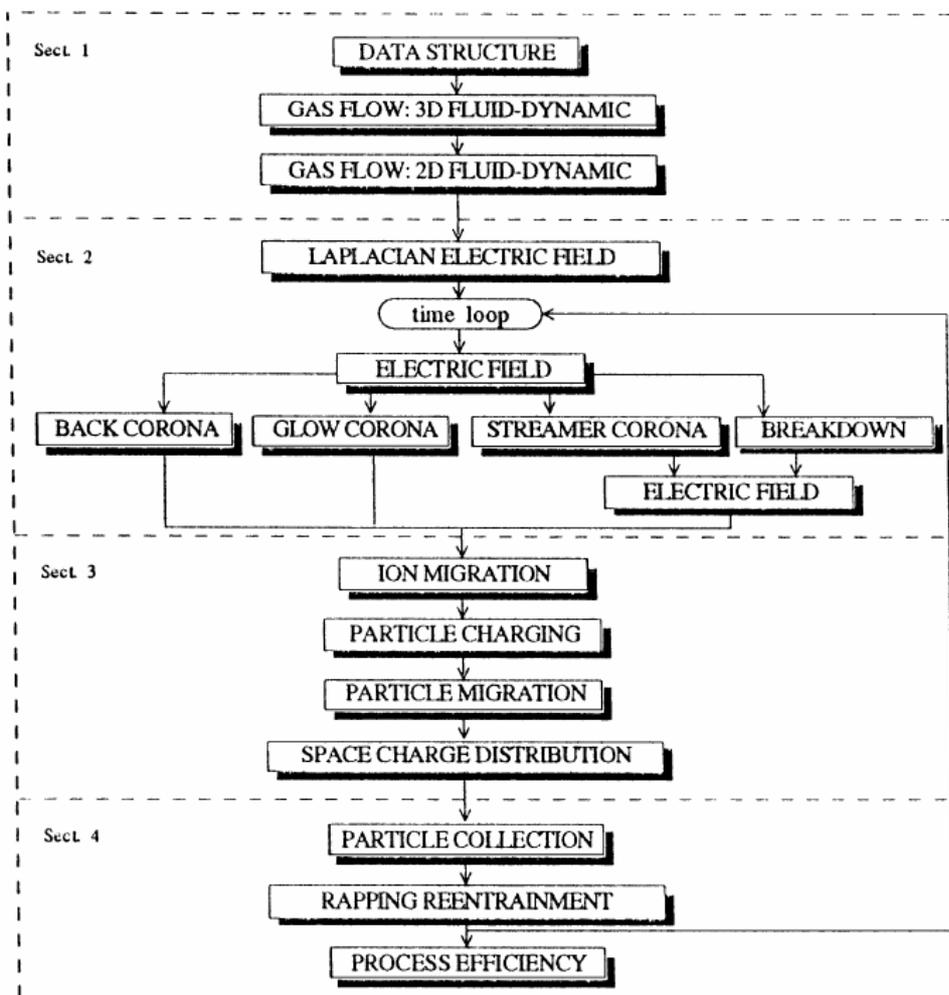


Figura 23. Diagrama esquemático do modelo matemático para PE (GALLIMBERTI, 1998).

Para estudo do fluxo, a estrutura completa do precipitador foi considerada por Gallimberti (1998), que a dividiu em células elementares e efetuou o cálculo computacional em duas etapas: na primeira etapa uma malha grosseira de células elementares foi utilizada para estudo tridimensional e definição do transporte de grandezas entre elas; na segunda etapa a solução foi recalculada em uma malha mais fina, bidimensional, onde cada célula tem suas condições de contorno apropriadas.

Para o modelo computacional Gallimberti (1998) assumiu as seguintes simplificações:

- o fluido não é compressível pois a velocidade média do fluido é menor que a velocidade do som no fluido;
- o fluxo é estacionário em escalas de tempo mais longas que a escala de tempo característica de turbulência;

- c) o processo é isotérmico pois as perdas viscosas e elétricas são desprezíveis em relação à entalpia inicial do gás;
- d) o fluxo de gás não é influenciado pelo movimento das partículas (nenhuma quantidade de movimento é transferida das partículas de pó para o fluido) pois sua concentração é desprezível;
- e) a turbulência é considerada isotrópica e descrita pelo modelo de primeira ordem $k-\varepsilon$.

Gallimberti (1998) realizou diferentes cálculos de fluxo, alternando as posições de três placas de distribuição de fluxo localizadas no funil de entrada. Estas placas foram utilizadas para controle de turbulência e recirculação. O melhor resultado é mostrado na **Figura 24(b)**, que apresenta a distribuição de velocidades nos primeiros dois campos. Após a realização da modificação prática do posicionamento das placas, o desempenho do precipitador melhorou.

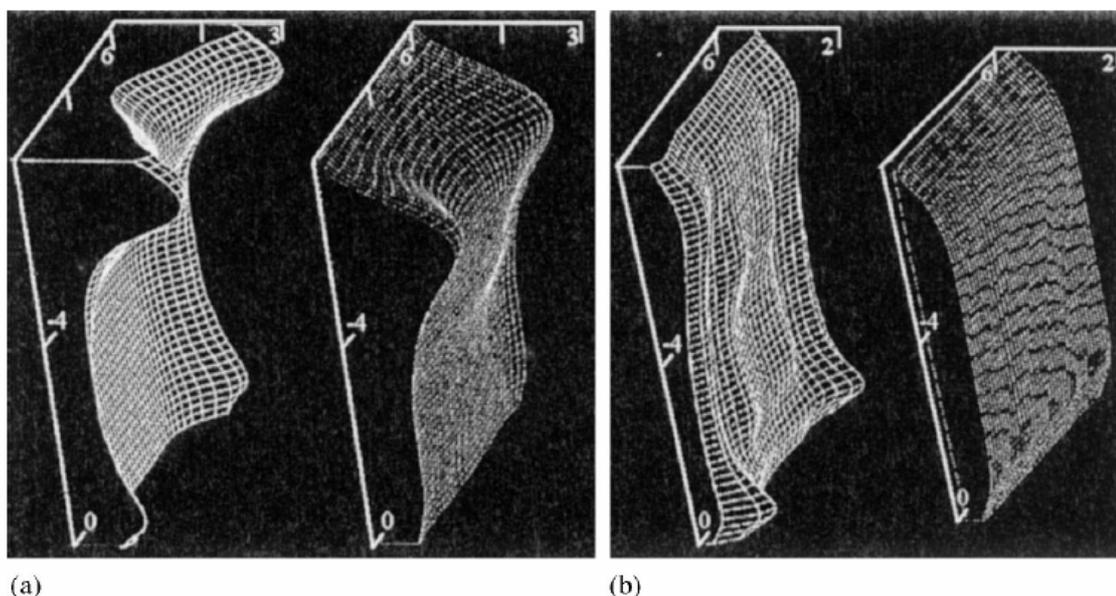


Figura 24. Distribuição de velocidades na saída do primeiro e segundo campos do precipitador eletrostático ENEL S. com o projeto de placas de distribuição original (a) e com projeto modificado (b).

Varonos e colaboradores (2002) publicaram extenso trabalho que descreve o desenvolvimento de um projeto completo e método para melhoria da eficiência de um precipitador eletrostático levando-se em consideração a uniformidade de fluxo, as partículas e propriedades do campo elétrico aplicado. O método numérico utilizado de divisão por volumes finitos, utilizando-se modelo de fluxo turbulento e tridimensional $k-\varepsilon$, sem influência do campo elétrico ou distribuição de partículas. Buscou-se a melhoria do perfil de velocidades na entrada da seção de coleta do precipitador adicionando-se placas perfuradas e defletoras no funil de entrada.

No estudo desenvolvido por Skodras (2006) um modelo em CFD para descrição da operação de precipitadores eletrostáticos foi desenvolvido. O modelo se baseia na análise teórica, com foco em vários aspectos: no fluxo de gases pelas equações conservação de massa e momento; no fluxo e ionização de partículas; no campo elétrico e equações de fluxo de corrente. O modelo leva em consideração todos os processos que acontecem no interior de um PE industrial, ou seja, os três aspectos

de fluxo de gases, dinâmica da partícula e eletrostática. O modelo foi aplicado de forma intensiva a uma geometria 2D, que pôde prover em detalhes:

- a) o perfil de velocidade dos gases (pressão, velocidades, turbulência);
- b) o histórico da partícula (trajetórias, carga, velocidade, tempo de residência, etc.), assim como variáveis Eulerianas associadas à partícula (concentração, densidade de carga, etc.);
- c) parâmetros eletrostáticos (potencial, força, densidade de corrente do íon).

O modelo de Skodras (2006) foi criado no contexto do código comercial disponível para CFD FLUENT 6.1, através da capacidade do software de funções definidas pelo usuário (*User Defined Functions* ou UDFs).

Segundo a norma ICAC (2004) os modelos CFD, assim como os modelos físicos, podem ser utilizados para estudos de distribuição de gases. De forma diferente dos modelos físicos em escala reduzida, os modelos CFD podem ser executados, definidas a geometria e condições de contorno, na escala e condições de processo reais e, por isso, atingem números de Reynolds e de desenvolvimento de turbulência reais. O modelo criado por método computacional deve ser analisado para que se encontrem regiões de separação ou recirculação de fluxo, onde a retirada ou deposição material particulado pode ser um problema. As velocidades, no modelo CFD, podem ser examinadas através de contornos coloridos ou linhas e vetores de fluxo (ICAC, 2004).

2.4.3 Ferramentas computacionais

A utilização de ferramentas computacionais passa pelos passos listados a seguir (COMSOL, 2005):

- definição da geometria: com ou sem interface com programas de desenho gráfico, é criada a geometria do sistema de estudo que pode ser feita em duas ou três dimensões;
- escolha do modo de aplicação: neste passo, o tipo de processo físico e equações utilizadas são escolhidos; valores ou expressões para variáveis como viscosidade e densidade podem, por exemplo, ser incluídos nos modelos escolhidos;
- definição de propriedades e condições de contorno: são inseridas as propriedades do material e condições de contorno em cada campo da interface gráfica ou desenho;
- geração de malha de elementos finitos: o objeto de estudo é dividido em pequenas partes ou elementos, onde as equações serão resolvidas. Esta malha pode ser mais “fina” ou mais “grosseira” de acordo com a exatidão dos resultados que se deseja obter;
- obtenção de resultados: a solução do problema é calculada de forma iterativa e os resultados podem ser visualizados de diversas formas no objeto de estudo como padrões coloridos de velocidade, temperatura ou pressão, gráficos na seção transversal, vetores, linhas de fluxo ou até pequenos “filmes” onde é mostrada a variação dos padrões com o tempo.

3 MÉTODOS

3.1 Modelagem computacional

O presente trabalho foi desenvolvido em computador tipo PC, com os *softwares* COMSOL Multiphysics, versão 3.2, da empresa COMSOL AB, para modelagem em 2D e CFX, versão 10.0, da empresa ANSYS Inc., para modelagem em 3D.

As geometrias em 2D e 3D foram elaboradas de modo a representar os modelos físicos descritos por Sahin & Ward-Smith (1987) e Sahin & Ward-Smith (1990). Os modelos apresentam em sua maioria combinações de duas placas perfuradas em oito diferentes posições em um difusor de elevado ângulo de abertura. Além das posições das placas, variou-se também o tamanho dos orifícios e a porosidade, como descrito nos artigos e na seqüência de experimentos descrita a seguir.

O estudo foi iniciado com modelos 2D mais simples, com menor quantidade de elementos e resolução mais rápida, e prosseguiu para modelos mais complexos em 3D. Inicialmente foram executados modelos em 3D levando-se em consideração 2 eixos de simetria, ou seja, modelando-se apenas a quarta parte do sistema completo. Após a execução destes modelos 3D parciais, foram também executados modelos com a geometria completa, com maior número de elementos e que demandaram maior esforço computacional.

3.2 Modelagem em 2D

3.2.1 Definições de geometria e seqüência de experimentos em 2D

A **Figura 25** descreve a geometria básica 2D em cotas e apresenta as posições ocupadas pelas placas perfuradas. A **Tabela 2** apresenta os principais dados das geometrias utilizadas no modelo, bem como um comparativo com os dados fornecidos pelos artigos Sahin & Ward-Smith (1987) e Sahin & Ward-Smith (1990). Como descrito nas publicações estudadas, a geometria utilizada apresenta simetria em relação ao eixo horizontal. Desta forma, para tornar o modelo mais simples, utilizou-se um eixo (ou linha) de simetria como mostrado na **Figura 25**. Com esta consideração, o fluxo é zero através da linha de simetria.

As combinações de posicionamento de placas no difusor de entrada são dispostas na **Tabela 3**. As combinações de placas foram agrupadas em arranjos, de acordo com o número de placas e posições das placas AA (placa maior) e BB (placa menor). A letra N no arranjo significa inexistência de placa e o número, que varia de 0 a 7, indica a posição da placa. Na identificação do arranjo, o primeiro número ou letra representa a posição ou inexistência da placa AA (placa maior), e o segundo número ou letra representa a posição ou inexistência da placa BB (placa menor).

A seqüência de experimentos de modelagem computacional em 2D é apresentada na **Tabela 4**. Esta tabela também identifica os arranjos, porosidade das placas e tamanho dos orifícios utilizados em cada teste.

A porosidade para os modelos 2D foi calculada por meio de uma modificação da **Equação 14**, representada na **Equação 30**:

$$\beta = \frac{n \cdot d}{D} \quad (30)$$

onde D é a dimensão linear da placa perfurada e d , o diâmetro linear do orifício.

Os experimentos foram iniciados com o difusor vazio, sem nenhuma placa perfurada (arranjo NN, Teste 0). Depois disso foram testados arranjos com apenas uma placa perfurada AA no final do difusor (arranjo 0N), com porosidade 0,5 e tamanhos de orifícios variando de 0,006 m a 0,04 m (Testes 1a, 1b, 1c, 1d). Os Testes 1 objetivaram verificar a influência do tamanho de orifício na distribuição de velocidades.

O Teste 2 foi realizado com duas placas perfuradas de porosidade 0,5, sendo a placa AA fixa nas posições 0, 1 e 2 e a placa BB variando nas posições 1 a 7. Os Testes 3 e 4 seguiram os mesmos arranjos utilizados no Teste 2, porém com porosidades de 0,4 e 0,58. Os Testes 2 a 4 foram realizados com orifícios de tamanho 0,02 m, maiores que o tamanho descrito na literatura, para que o tempo de processamento dos modelos fosse reduzido.

No Teste 5 duas placas perfuradas de porosidade 0,5 e orifícios de 0,02 m foram utilizadas com a placa AA fixa na posição 1 e a placa BB nas posições 5,5 e 6,5, posições estas intermediárias às posições de placa testadas em modelos físicos descritos na literatura. O Teste 5 objetivou refinamento de resultados em posições intermediárias.

O Testes 6 (6a e 6b), foram executados com os melhores arranjos obtidos nos testes 2 e 4, porém, com os tamanhos de orifícios menores, conforme descritos na literatura. Os arranjos testados foram o 15 e 16, com a placa AA na posição 1 e a placa BB nas posições 5 e 6 respectivamente. O arranjo 15 deste teste apresenta porosidade 0,58, enquanto o arranjo 16 apresenta porosidade 0,5. Estes testes objetivaram o refinamento final dos melhores resultados, tornando a geometria o mais semelhante possível aos modelos físicos publicados.

De forma diferente às publicações estudadas, também foi realizada uma seqüência de testes com a presença de uma placa no difusor de saída (Teste 07), no intuito de verificar a influência desta terceira placa na melhoria do fluxo no último campo, quando o fluxo sofre uma contração no difusor de saída.

É importante observar que tanto nas publicações estudadas quanto nos modelos computacionais construídos no presente trabalho, as tremonhas de descarga de pó, presentes na base de precipitadores reais, não foram consideradas. Desta forma, assume-se que o gás está totalmente direcionado para a zona de tratamento. Com esta consideração, tornou-se possível a modelagem com eixo de simetria.

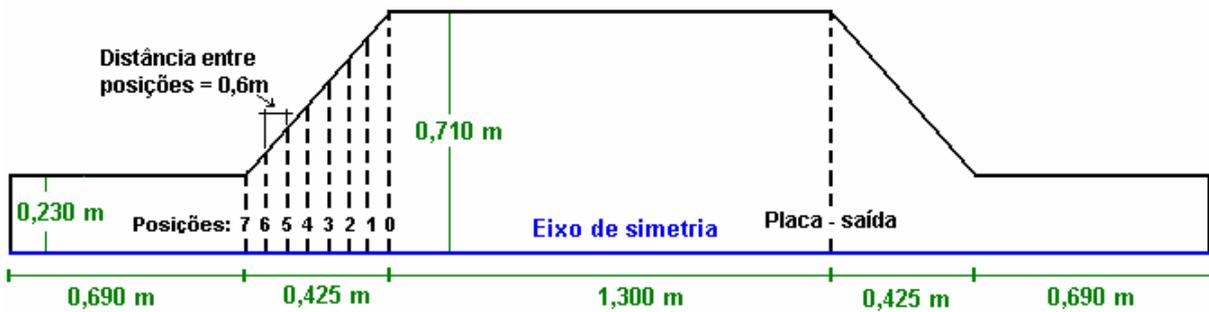


Figura 25. Geometria básica e posições das placas em 2D.

Para os diversos arranjos foram definidas constantes globais que são as mesmas e apresentam o mesmo valor para todas as geometrias e subdomínios. São elas: a temperatura do fluido (T) e a velocidade no duto de entrada (u_i), ver **Tabela 2**.

Tabela 2 - Dados de geometria em 2D.

Descrição	Variável	Unidade	Experimento físico publicado (*)	CFD – 2D
Dimensões do duto quadrado de entrada no difusor	$D1$	m	0,46 x 0,46	0,23
Altura do precipitador	H	m	1,02	-
Largura do Precipitador	W	m	1,42	0,710
Comprimento da zona de tratamento do Precipitador	L	m	1,3	1,3
Comprimento do difusor (entrada e saída)	L_d	m	0,425	0,425
Ângulo de abertura do difusor - direção horizontal (entrada e saída)	γ	°	48,5	48,5
Porosidades testadas	β	-	0,4, 0,5 e 0,58	0,4, 0,5 e 0,59
Espessura das placas perfuradas	t	m	0,0015	0,0015
Diâmetro dos orifícios para porosidades 0,4	d	m	0,006	0,02
Diâmetro dos orifícios para porosidades 0,5		m	0,006	variável, ver Tabela 4
Diâmetro dos orifícios para porosidade 0,58		m	0,00635	variável, ver Tabela 5
Velocidade no duto de entrada	u_i	m/s	25,3	25,3
Velocidade na zona de tratamento do PE	v_m	m/s	3,7	8,20
Número de Reynolds no duto de entrada	Re	m/s	$2,6 \times 10^5$	$7,75 \times 10^5$
Número de Reynolds na zona de tratamento do PE	Re	m/s	$7,75 \times 10^5$	$7,75 \times 10^5$

(*)(SAHIN; WARD-SMITH, 1987)

Tabela 3 - Arranjos de placas perfuradas estudados em 2D.

Arranjo	Número	Posição Placa AA	Posição Placa BB
Arranjo NN - Difusor sem nenhuma placa perfurada	NN	não existe	não existe
Arranjo 0N – Uma placa perfurada no final do difusor (posição 0)	0N	0	não existe
Arranjos 0 - Duas placas perfuradas com placa AA fixa na posição 0 e a placa BB variando nas posições 1 a 7.	01	0	1
	02	0	2
	03	0	3
	04	0	4
	05	0	5
	06	0	6
	07	0	7
Arranjos 1 - Duas placas perfuradas com placa AA fixa na posição 1 e a placa BB variando nas posições 2 a 7.	12	1	2
	13	1	3
	14	1	4
	15	1	5
	16	1	6
	17	1	7
Arranjos 2 - Duas placas perfuradas com placa AA fixa na posição 2 e a placa BB variando nas posições 3 a 7.	23	2	3
	24	2	4
	25	2	5
	26	2	6
	27	2	7
Arranjos 3 - Duas placas perfuradas com placa AA fixa na posição 1 e a placa BB variando nas posições 5,5 e 6,5.	15,5	1	5,5
	16,5	1	6,5

Tabela 4 - Seqüência de experimentos realizados em 2D.

Seqüência de experimentos	Arranjos	Porosidade	Tamanho dos orifícios 2D [m]
Teste 0	NN	não aplicável	não aplicável
Teste 1a	0N	0,5	0,006
Teste 1b	0N	0,5	0,01
Teste 1c	0N	0,5	0,02
Teste 1d	0N	0,5	0,03
Teste 1e	0N	0,5	0,04
Teste 2	0, 1 e 2	0,5	0,02
Teste 3	0, 1 e 2	0,4	0,02
Teste 4	0, 1 e 2	0,58	0,02
Teste 5	3	0,5	0,02
Teste 6a	15	0,58	0,00635
Teste 6b	16	0,5	0,006
Teste 7	0, 1 e 2 + uma placa introduzida no início do difusor de saída.	0,5	0,02

Em relação aos modelos físicos de Sahin & Ward-Smith (1987) e Sahin & Ward-Smith (1990), as geometrias 2D utilizadas apresentaram as seguintes limitações:

- a) geometria em 2D pode ser considerada como um difusor de projeção infinita no eixo z, ou seja, os furos apresentam o formato de fenda e não um formato redondo como o utilizado nos modelos físicos;
- b) as porosidades consideradas nos modelos 2D ($\beta = 0,5; 0,4$ e $0,58$) correspondem ao percentual de abertura das placas perfuradas considerando-se sua dimensão linear;
- c) somente o maior ângulo de divergência (horizontal) dos modelos físicos foi testado ($2\gamma=97^\circ$). O ângulo vertical ($2\alpha=67^\circ$) não foi testado;
- d) observa-se que a velocidade no interior do precipitador é maior no modelo computacional, pois a expansão ocorre somente em uma direção.

Todas as geometrias geradas em 2D foram desenhadas utilizando-se as ferramentas de desenho do próprio COMSOL Multiphysics. Durante a geração das geometrias, cuidado especial foi tomado para eliminação de contornos internos, pequenas falhas, contornos pontiagudos ou pontas que pudessem gerar malhas muito grandes ou elementos excessivamente pequenos, como recomendado por COMSOL (2005).

3.2.2 Definições do modelo fluidodinâmico em 2D

Dentre os módulos oferecidos pelo COMSOL Multiphysics, o ambiente utilizado foi o do Módulo de Engenharia Química (*Chemical Engineering Module*) com aplicação em Balanços de Quantidade de Movimento (*Momentum Balances*). O regime de escoamento, considerado turbulento, de acordo valores de número de Reynolds (Re) já apresentados na **Tabela 2**, foi modelado utilizando-se o modelo $k-\varepsilon$ para regime estacionário.

Nesta modelagem, as constantes empíricas $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, C_{μ} , σ_k , σ_ε , são valores determinados experimentalmente por Wilcox (2000) e valem:

$$C_{\varepsilon 1} = 0,1256$$

$$C_{\varepsilon 2} = 1,92;$$

$$C_{\mu} = 0,09;$$

$$\sigma_k = 1,0;$$

$$\sigma_\varepsilon = 1,3$$

Efeitos de transferência de energia não foram modelados, visto que os modelos físicos foram executados à temperatura ambiente (constante).

3.2.3 Definição das propriedades físicas dos modelos 2D

Conforme dados fornecidos pelos artigos Sahin & Ward-Smith (1987) e Sahin & Ward-Smith (1990), e considerações feitas para modelagem computacional, as propriedades físicas do fluido adotadas são listadas na **Tabela 5**.

Tabela 5 - Propriedades físicas do fluido – modelos 2D.

Descrição	Variável	Unidade	Valor
Substância	-	-	ar
Temperatura assumida	T	°C / K	25 / 298,15
Pressão atmosférica	p	atm	1
Densidade	ρ	kg/m ³	1,18; constante, fluido incompressível
Viscosidade dinâmica	μ	Pa.s	$1,77 \times 10^{-5}$

Com relação aos dados físicos, é importante observar:

- não foi considerada a presença de material particulado na corrente gasosa para determinação das propriedades físicas;
- nos artigos Sahin & Ward-Smith (1987) e Sahin & Ward-Smith (1990), não foi fornecido o valor da temperatura do fluido, portanto o valor de 25°C foi assumido para realização da modelagem;
- a densidade do fluido foi considerada constante e calculada para o fluido pela lei dos gases ideais, exibida na **Equação 31** e o valor de viscosidade dinâmica foi considerado conforme Welty, Wicks & Wilson (1983).

$$\rho = \frac{p \times 28,8 \cdot 10^{-3}}{8,314 \times T} \quad (31)$$

3.2.4 Definição de condições de contorno gerais em 2D

As condições de contorno definem a interface entre a geometria do modelo e o ambiente externo. Condições diferentes podem ser definidas para cada contorno ou interface da geometria (COMSOL, 2005). A **Figura 26** mostra um exemplo de geometria utilizada com as diferentes condições de contorno.

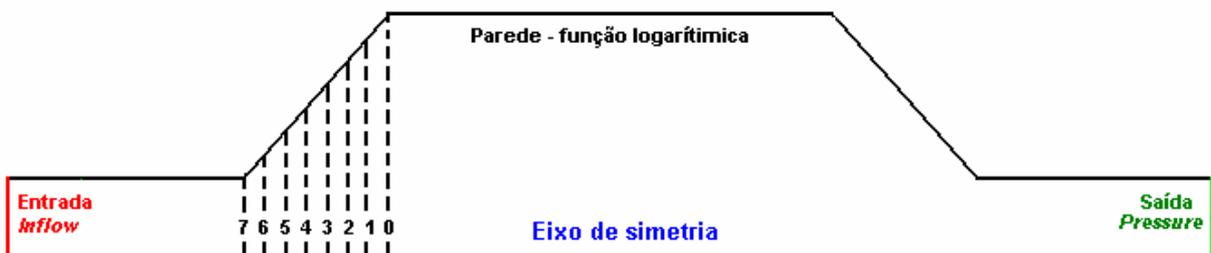


Figura 26. Representação das condições de contorno definidas em 2D.

No duto do difusor, foi definida a primeira condição de contorno: entrada (ou *inflow*). A entrada tem um valor constante de velocidade na direção x , u_1 , que foi definida como 25,3 m/s, enquanto a velocidade na direção y é zero.

No presente trabalho foi considerado fluxo uniforme na entrada, ou seja, efeitos de baixa eficiência do conjunto do difusor e placas perfuradas em função da má

distribuição de velocidades na entrada do mesmo, como citado também por Miller (1990), foram desprezados.

Nos contornos que representavam paredes sólidas de dutos e equipamentos, foi utilizada a função logarítmica de parede (*logarítmic wall function*). Neste caso adota-se a “lei da parede” (ou *law of the wall*), que é aplicável para o componente da velocidade paralelo à parede. É importante observar também que não foram consideradas perdas de calor e imperfeições das tubulações e paredes.

No eixo de simetria (parede inferior) a velocidade normal (ou perpendicular) é definida como zero e no contorno de saída (*pressure*), localizado do lado direito, a pressão é considerada zero.

3.2.5 Geração das malhas de elementos finitos em 2D

Uma malha é a divisão de um modelo geométrico em unidades menores de formato simples. No modo de geração de malhas oferecido COMSOL Multiphysics, é possível gerar uma malha de elementos triangulares, não estruturada, baseada no algoritmo de Delaunay (COMSOL, 2005). A **Figura 27** mostra um exemplo de malha criada neste software, para um dos arranjos modelados.

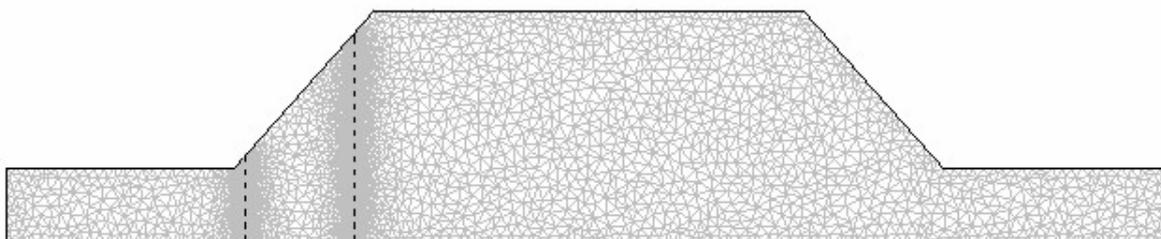


Figura 27. Representação de malha gerada em 2D para o arranjo 16, porosidade 0,5.

Em 2D, o método realiza a partição de subdomínios em triângulos, ou elementos de malha. Claro que esta é apenas uma aproximação, visto que o contorno pode ser curvo. Os lados dos triângulos são chamados de borda da malha e suas pontas, vértices da malha. Uma borda da malha não deve conter vértices em seu interior. De forma similar, os contornos definidos na geometria são divididos em bordas, chamadas elementos de contorno (COMSOL, 2005).

Durante a criação de uma malha não estruturada, o número de elementos é determinado pelo formato da geometria e diversos parâmetros de malha que podem ser controlados ou modificados como: tamanho dos elementos de malha e sua distribuição.

Alguns dos parâmetros controlados no presente trabalho foram:

- tamanho máximo dos elementos da malha;
- taxa de crescimento do elemento, que determina a taxa máxima a qual o tamanho do elemento pode crescer de uma região com pequenos elementos para uma região com elementos maiores; o fator de crescimento é um número maior que um; por exemplo, um fator de 1,3 implica em um crescimento de 30% de um elemento para o outro.

- o método de refinamento da malha utilizado foi o “regular”, ou seja, quando a malha é refinada em determinada região, isto implica que cada elemento se divide em 4 de mesmo formato.

As malhas geradas em 2D apresentaram uma quantidade de elementos variável com o posicionamento das placas e tamanho dos orifícios. O número de elementos variou de 2.214 a 25.047 elementos, como apresentado na **Tabela 11 – Anexo 1**, que mostra o resumo dos resultados.

Após a geração da malha de cada geometria, sua qualidade foi medida pelo próprio programa e analisada. A qualidade (q) medida no programa COMSOL (2005) está associada com a área e formato da malha e é dada pela **Equação 32**:

$$q = \frac{4\sqrt{3}A_m}{h_1^2 + h_2^2 + h_3^2} \quad (32)$$

onde A_m é a área do elemento; h_1 , h_2 e h_3 são os comprimentos dos lados dos triângulos.

A qualidade (q) é um número entre 0 e 1. Se $q > 0,3$, a qualidade da malha não deve afetar a qualidade da solução; $q = 1$ quando $h_1 = h_2 = h_3$. Todas as malhas geradas no presente trabalho apresentavam como qualidade mínima dos elementos valores maiores que 0,3.

3.2.6 Definições de resolução em 2D

Para resolução do modelo, foi utilizado algoritmo de solução de sistema não-linear e estado estacionário. O valor de tolerância relativa e número máximo de iterações estabelecem os critérios de convergência para o modelo. Para os modelos desenvolvidos no presente trabalho utilizou-se o valor de tolerância relativa de 1.10^{-6} e número máximo de iterações de 40.

O critério de convergência é o seguinte: sendo U a aproximação do verdadeiro vetor solução e E , o erro estimado neste vetor, o erro relativo é dado de forma ponderada pela norma Euclideana (COMSOL, 2005):

$$err = \left(\frac{1}{N_g} \sum_i (|E_i| / W_i)^2 \right)^{1/2} \quad (33)$$

$$W_i = \max(|U_i|, S_i) \quad (34)$$

Onde N_g é o número de graus de liberdade, W_i são fatores de ponderação e S_i são fatores de escala determinados pelo programa. O programa pára quando err é menor que a tolerância relativa. O algoritmo de solução não linear utilizado é descrito por Deuffhard (1984) (*apud* COMSOL, 2005).

3.3 Modelagem em 3D

3.3.1 Definições de geometria e seqüência de experimentos em 3D

A **Figura 28** apresenta as geometrias básicas utilizadas em 3D. Primeiramente foram elaborados modelos considerando-se a simetria da geometria, ou seja, o cálculo foi realizado em um quarto do modelo completo, como mostra a **Figura 28a**.

Após a execução destes modelos parciais, modelos com a geometria completa, como mostra a **Figura 28b** também foram estudados.

As dimensões gerais do difusor e zona de tratamento foram as mesmas dos modelos em 2D e indicadas pelas publicações estudadas. Para o modelo 3D completo, devido ao aumento da dimensão característica dos dutos (o dobro dos modelos com eixo de simetria), os dutos de entrada e saída foram alongados: ao invés de 0,690 m, foram utilizados 1,38 m (ver **Figura 28b**).

As posições ocupadas pelas placas perfuradas no difusor de entrada foram as mesmas dos modelos em 2D (**Figura 25**). Em 3D, não foi estudada a presença de uma placa no difusor de saída. A **Tabela 6** apresenta os principais dados das geometrias utilizadas no modelo, bem como um comparativo com os dados fornecidos pelos artigos Sahin & Ward-Smith (1987) e Sahin & Ward-Smith (1990).

Os arranjos testados em 3D, tanto para os modelos com simetria, agora denominado Teste 8, quanto para os modelos completos, seqüência denominada Teste 9, são dispostos na **Tabela 7**.

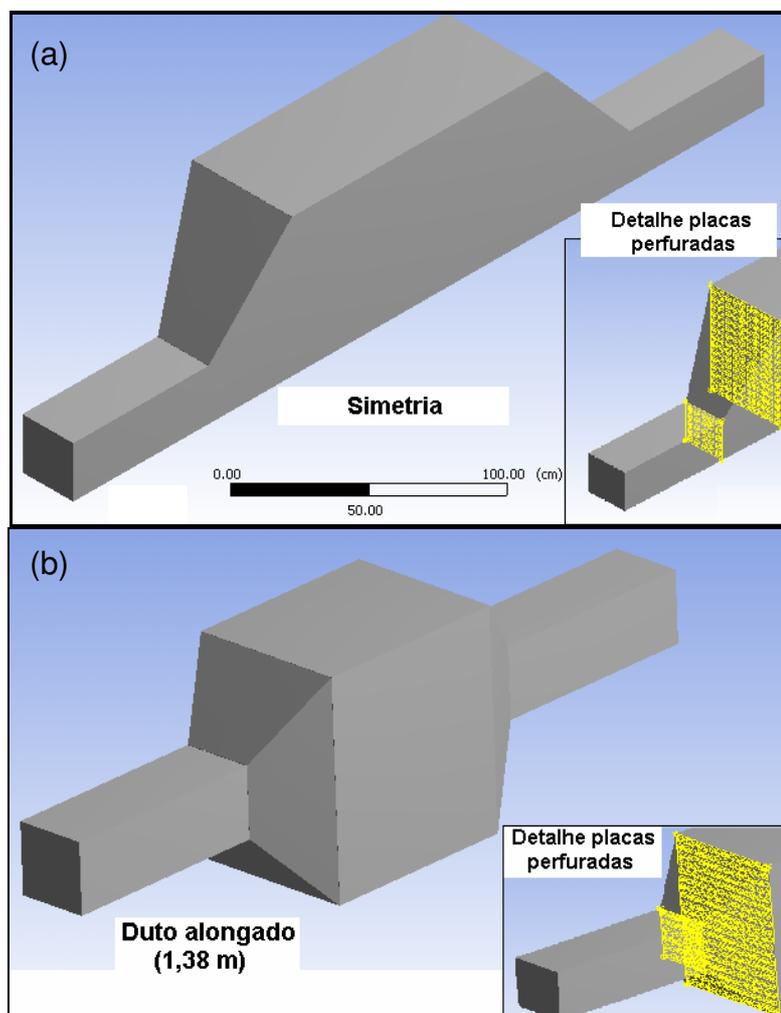


Figura 28. Geometria básica e posições das placas em 3D. (a) Geometria com eixo de simetria. (b) Geometria do modelo completo.

Tabela 6 - Dados de geometria em 3D.

Descrição	Variável	Unidade	Experimento físico publicado (*)	CFD – 3D (simetria) TESTE 8	CFD – 3D – (completa) TESTE 9
Dimensões do duto quadrado de entrada no difusor	$D1$	m	0,46 x 0,46	0,23 x 0,23	0,46 x 0,46
Altura do precipitador	H	m	1,02	0,51	1,02
Largura do Precipitador	W	m	1,42	0,71	1,42
Comprimento do Precipitador	L	m	1,3	1,3	1,3
Comprimento do difusor (entrada e saída)	L_d	m	0,425	0,425	0,425
Ângulo de abertura do difusor - direção vertical (entrada e saída)	α	°	33,5	33,5	33,5
Ângulo de abertura do difusor - direção horizontal (entrada e saída)	γ	°	48,5	48,5	48,5
Porosidades testadas	β	-	0,4, 0,5 e 0,58	0,5	0,5
Espessura das placas perfuradas	t	m	0,0015	0,0015	0,0015
Diâmetro dos orifícios para porosidades 0,4	d	m	0,006	não testado	não testado
Diâmetro dos orifícios para porosidades 0,5		m	0,006	ver Tabela 8	ver Tabela 8
Diâmetro dos orifícios para porosidade 0,58		m	0,00635	não testado	não testado

(*)(SAHIN; WARD-SMITH, 1987)

Todas as geometrias geradas em 3D foram desenhadas utilizando-se a ferramenta de desenho do próprio CFX, chamada *Design Modeler*.

Tabela 7 - Arranjos de placas perfuradas estudados em 3D.

Arranjo	Número	Posição Placa AA	Posição Placa BB
Arranjo NN - Difusor sem nenhuma placa perfurada	NN	não existe	não existe
Arranjo 0N – Uma placa perfurada no final do difusor (posição 0)	0N	0	não existe
Arranjos 0 - Duas placas perfuradas com placa AA fixa na posição 0 e a placa BB variando nas posições 1 a 7.	01	0	1
	02	0	2
	03	0	3
	04	0	4
	05	0	5
	06	0	6
	07	0	7
Arranjo 1 – Melhor resultado obtido em 2D: duas placas perfuradas, com placa AA fixa na posição 1 e a placa BB na posição 6	16	1	6

3.3.2 Definições do modelo fluidodinâmico em 3D

Da mesma forma como executado para os modelos em 2D, foram aplicadas as equações de conservação de quantidade de movimento e o regime de escoamento turbulento foi modelado utilizando-se o modelo $k-\epsilon$ para regime estacionário. Efeitos de transferência de energia não foram modelados, visto que os modelos físicos foram executados à temperatura ambiente (constante).

Nesta modelagem, de forma semelhante ao realizado em 2D, as constantes empíricas $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, C_{μ} , σ_k , σ_{ε} são valores determinados experimentalmente por Wilcox (2000) e valem:

$$C_{\varepsilon 1} = 1,44$$

$$C_{\varepsilon 2} = 1,92;$$

$$C_{\mu} = 0,09;$$

$$\sigma_k = 1,0;$$

$$\sigma_{\varepsilon} = 1,3$$

3.3.3 Definição das propriedades físicas dos modelos 3D

Conforme executado em 2D e de acordo com os dados fornecidos pelos artigos Sahin & Ward-Smith (1987) e Sahin & Ward-Smith (1990), o fluido escolhido para modelagem foi o ar, a 25 °C e 1 atm de pressão.

Utilizou-se a biblioteca de fluidos do *software* CFX para obtenção das propriedades físicas necessárias para os balanços de quantidade de movimento. Os valores de densidade e viscosidade utilizados nos modelos em 3D são próximos aos valores apresentados na **Tabela 5**, para os modelos em 2D: densidade (ρ) igual a 1,185 kg/m³ e viscosidade dinâmica (μ) igual a 1,83 x 10⁻⁵ Pa.s.

3.3.4 Definição de condições de contorno gerais em 3D

As condições de contorno dos modelos em 3D se mantiveram semelhantes aos modelos em 2D:

No duto do difusor de entrada, foi definida a primeira condição de contorno: entrada (ou *inlet*). A entrada tem um valor constante de velocidade média igual a 25,3 m/s, conforme publicações estudadas. A intensidade da turbulência foi definida como média (5%), valor padrão já pré-definido pelo *software*. No duto de saída, foi definida a superfície de saída (ou *outlet*), com pressão estática zero (relativa).

Nos contornos que representavam paredes sólidas de dutos e equipamentos, foi definida velocidade igual a zero e parede lisa (a altura da rugosidade é desprezível em relação às dimensões da zona de tratamento). Nestas superfícies é utilizada a função logarítmica de parede (*logarithmic wall function*). Deste modo, o *software* assume automaticamente que a distribuição de velocidades próxima à parede tem um perfil logarítmico e podem-se calcular numericamente as tensões de cisalhamento como função da velocidade a uma dada distância da parede.

Para o Teste 8, nas superfícies de simetria (parede inferior e parede lateral) o contorno é definido como *symmetry*, o que significa que a velocidade normal (ou perpendicular) a estas superfícies é zero.

3.3.5 Geração das malhas de elementos finitos em 3D

Para cada geometria estudada foi criada uma malha de elementos finitos, utilizando-se o *software* CFX-Mesh. Um exemplo das malhas geradas é apresentado nas **Figuras 29a e 29b**.

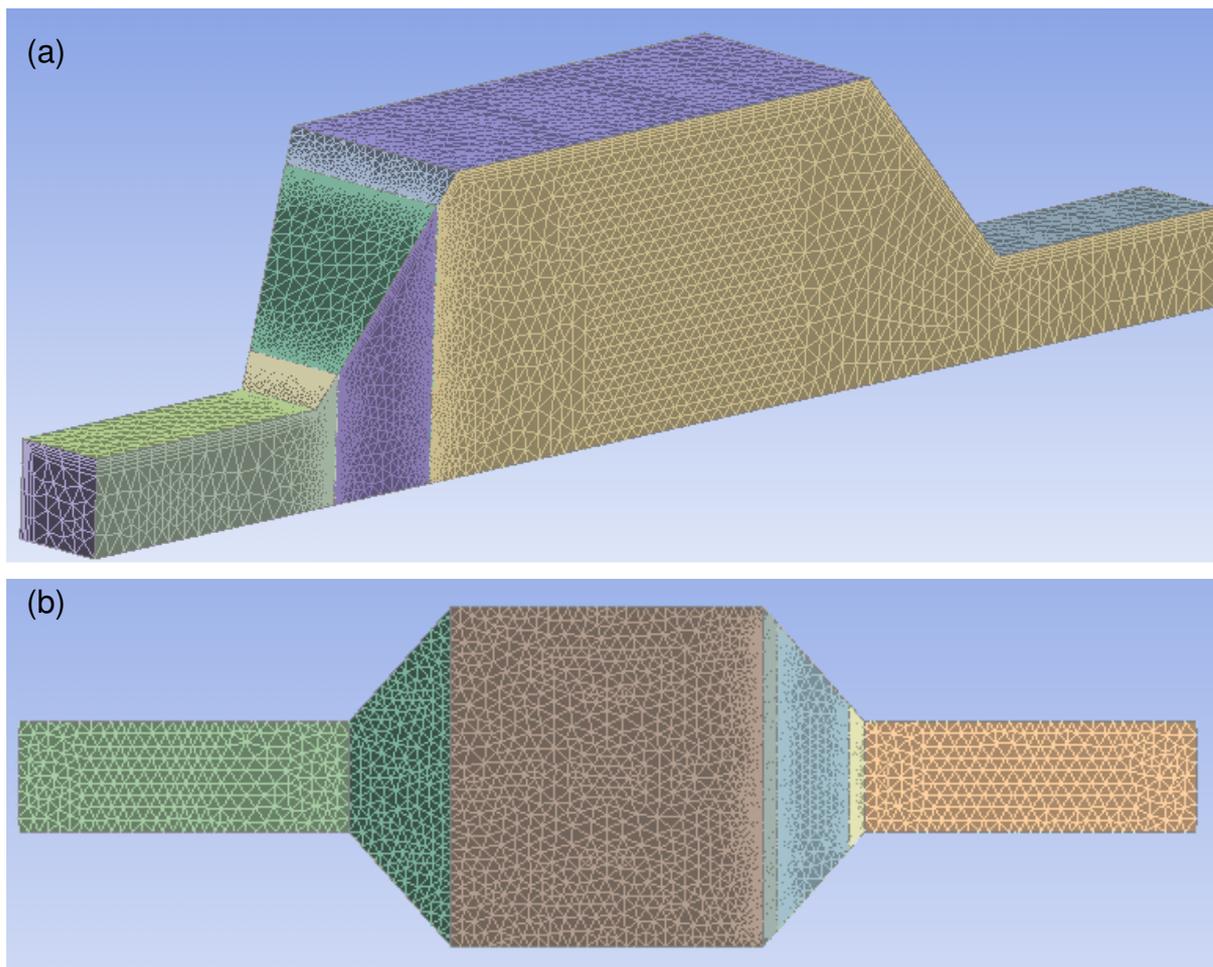


Figura 29. Exemplos de malha gerada em 3D. Arranjo 16, com porosidade 0,5 para Teste 8, com eixo de simetria (a) e Teste 9, modelo completo (b).

A dimensão reduzida dos furos das placas perfuradas em relação às dimensões do difusor e zona de tratamento, bem como a quantidade de furos, levaram a uma especial preocupação com dois aspectos:

- o refinamento necessário para maior precisão dos cálculos;
- o número de elementos e nós compatível com a capacidade de processamento e *hardware* disponível;

O balanço entre estes aspectos levou à utilização de uma malha mais grosseira nas regiões mais distantes do difusor, onde a variação de velocidade não é significativa. Além disso, tamanhos diferenciados de orifícios precisaram ser adotados de acordo com a complexidade da geometria. Em resumo, o número de nós e elementos das malhas variaram de acordo com o tamanho dos orifícios utilizado, posicionamento das placas e ajustes de parâmetros como: taxa de crescimento e tamanho máximo dos lados dos elementos. A **Tabela 8** apresenta o resumo estatístico das malhas geradas em 3D para cada arranjo e tipo de teste. Nesta tabela estão representados os arranjos estudados nos testes 8 e 9, número de elementos da malha, o número de nós (ponto de junção entre dois elementos de malha), tamanho dos orifícios das placas perfuradas e alguns dos parâmetros controlados na geração das malhas.

Tabela 8 - Resumo estatístico das geometrias e malhas geradas em 3D.

Teste-Arranjo	Número de nós na malha	Nr. de Elementos na malha	Tamanho do furo placa menor BB	Tamanho do furo placa maior AA	Taxa de crescimento da malha	Tamanho máximo dos lados dos elementos da malha
			[m]	[m]	-	[m]
8-NN	15.420	55.016	-	-	1,30	0,05
8-0N	316.209	1.698.769	-	0,041	1,30	0,05
8-01	399.085	2.141.786	0,041	0,041	1,30	0,05
8-02	422.813	2.292.665	0,038	0,041	1,30	0,05
8-03	492.823	2.750.137	0,038	0,041	1,30	0,05
8-04	474.506	2.583.871	0,040	0,041	1,30	0,05
8-05	360.720	1.938.105	0,042	0,041	1,30	0,05
8-06	348.065	1.863.228	0,038	0,041	1,30	0,05
8-07	312.780	1.666.313	0,037	0,041	1,30	0,05
8-16	295.158	1.542.122	0,041	0,038	1,20	0,04
9-NN	63.802	239.427	-	-	1,30	0,05
9-0N	578.354	3.083.788	-	0,059	1,30	0,10
9-01	490.972	2.510.992	0,059	0,059	1,50	0,12
9-02	468.763	2.410.201	0,059	0,059	1,50	0,12
9-03	492.579	2.546.632	0,060	0,059	1,50	0,12
9-04	533.021	2.832.832	0,070	0,069	1,50	0,12
9-05	488.432	2.536.758	0,061	0,059	1,50	0,12
9-06	526.617	2.750.258	0,061	0,059	1,40	0,10
9-07	558.060	2.942.914	0,061	0,059	1,40	0,10
9-16	361.278	1.717.774	0,061	0,059	1,30	0,05

Nas paredes externas ou carcaça do precipitador eletrostático, foi criada uma região de *inflation* de 5 camadas. Este recurso é utilizado para geração de elementos prismáticos a partir da superfície, “inflando” elementos triangulares para o interior do sólido. Como resultado, próximo aos contornos da parede são formadas camadas planas de elementos prismáticos que produzem uma malha de menor comprimento na direção perpendicular à parede, como mostra a **Figura 30**. Este recurso tem como principal objetivo a maior precisão de cálculo onde há formação de sub-camada viscosa.

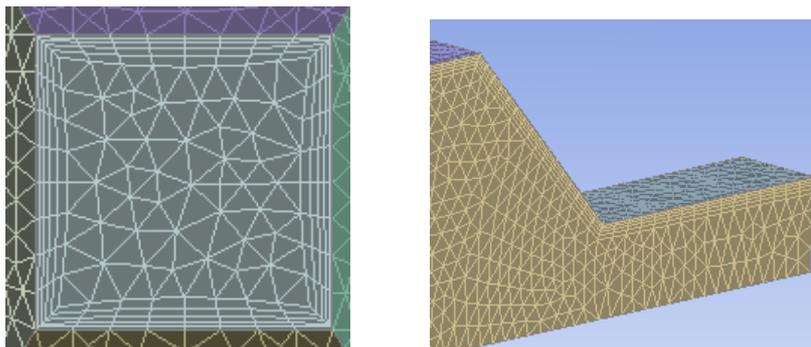


Figura 30. Detalhe do recurso *inflation* utilizado nas paredes externas do modelo.

Além de uma malha mais refinada na região das paredes, a superfície das placas perfuradas, bem como seus orifícios receberam uma configuração de malha diferenciada, com menor ângulo de resolução (θ) e, em consequência, elementos com vértices menores, em comparação com as demais superfícies. Desta forma a malha volumétrica criada próximo a estas superfícies apresentou-se mais refinada. O detalhe desta diferenciação é mostrado na **Figura 31**.

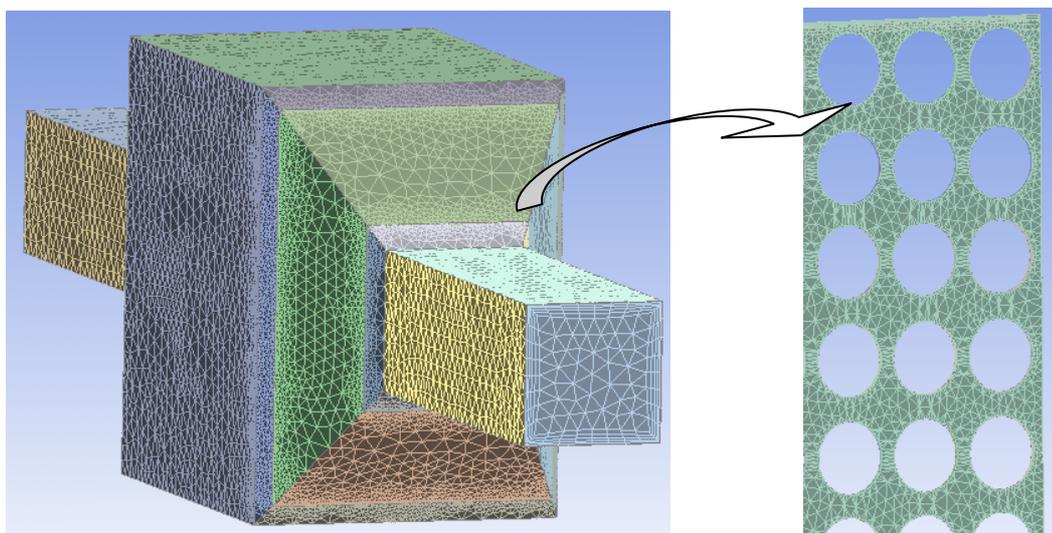


Figura 31. Detalhe da malha gerada na região das placas perfuradas.

A alteração do parâmetro de resolução angular ou ângulo de resolução (θ) permite a variação do comprimento dos lados dos elementos em determinadas superfícies, de acordo com a curvatura local. Desta forma, utiliza-se um menor comprimento onde a curvatura é maior e um maior comprimento onde a geometria é mais reta. O parâmetro de resolução angular é ilustrado na **Figura 32**. O ângulo de resolução utilizado para as placas perfuradas foi 18° enquanto que, para as demais superfícies, foi utilizado 30° .

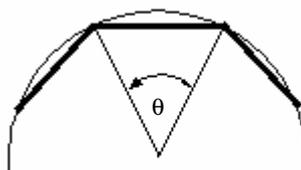


Figura 32. Resolução angular da malha gerada em 3D.

3.3.6 Definições de resolução

Para resolução do modelo em 3D, da mesma forma como aplicado à 2D, foi utilizado algoritmo de solução de sistema não-linear e estado estacionário.

Os valores de resíduo e número máximo de iterações estabelecem os critérios de convergência para o modelo. Para os modelos desenvolvidos no presente trabalho utilizou-se como meta o valor resíduo do cálculo numérico igual a 1.10^{-4} e número máximo de iterações igual a 100.

3.4 Medição da uniformidade do perfil de velocidades nos modelos 2D e 3D

De forma semelhante ao executado por Sahin & Ward-Smith (1987) e Sahin & Ward-Smith (1990), para avaliação da uniformidade do perfil de velocidades, foram calculados os coeficientes de variação de velocidade (C.V.) em quatro locais diferentes S1, S2, S3 e S4 em cada um dos modelos computacionais criados. Para tanto, utilizaram-se as equações 4 e 5, bem como os valores de velocidade exportados dos modelos computacionais. A média e o desvio padrão dos valores de velocidade foram calculados com base nos valores de velocidades obtidos pelos modelos ao longo da seção transversal das posições S1 (duto de entrada), S2 (entrada da zona de tratamento), S3 (meio da zona de tratamento) e S4 (saída da zona de tratamento).

A **Figura 33** ilustra a localização destas posições em 2D. Para as geometrias em 3D, os valores de velocidade foram obtidos nos nós dos planos transversais, nas mesmas posições indicadas na **Figura 33**.

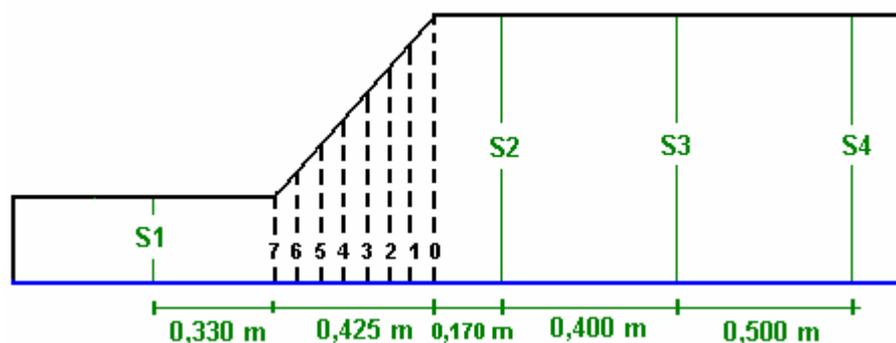


Figura 33. Pontos de medição de velocidades na entrada e no interior do precipitador.

Com base na prática e na norma, ICAC (2004), que recomenda medições de velocidade e determinação do coeficiente de variação na entrada e saída da zona de tratamento do PE, o critério de uniformidade adotado para comparação e análise dos diversos arranjos foi:

- **Critério de comparação:** quanto menor a média calculada com os valores de C.V. das posições S2 (entrada da zona de tratamento) e S4 (saída da zona de tratamento), mais uniforme o fluxo no interior da zona de tratamento é considerado e, portanto, melhor é o arranjo.

3.5 Medição da perda de carga nos modelos 2D e 3D

Para as diversas geometrias e modelos CFD em 2D gerados no presente trabalho, calculou-se o coeficiente de recuperação de pressão global do conjunto placas e difusor (C_p) de duas maneiras:

a) primeiramente pelo Modelo Empírico II, já apresentada no item 2.3.1 deste trabalho, porém, com a adaptação da **Equação 20** para a **Equação 35**; por tratar-se de um modelo 2D, onde as áreas transversais não podem ser determinadas, utilizaram-se as dimensões transversais das placas e dutos;

$$C_p = 1 - K \left[\left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 + \left(\frac{D_1}{D_4} \right)^2 \right] - \left(\frac{D_1}{D_4} \right)^2 \quad (35)$$

Onde D_1 é a dimensão linear do duto de entrada; D_2 é a dimensão linear da placa BB; D_4 é a dimensão linear da placa AA;

Utilizou-se os mesmos valores experimentais de coeficientes perda de carga K de 6,4, 2,9 e 1,9 reportados por Sahin (1985), para placas de porosidade 0,4, 0,5 e 0,58 respectivamente (*apud* SAHIN; WARD-SMITH, 1987).

b) em segundo lugar, pela diferença de pressão medida entre a entrada e a saída do difusor, para cada arranjo de placas estudado, como apresentado pela **Equação 36**.

$$C_p = \frac{p_5 - p_1}{\frac{1}{2} \rho u_1^2} \quad (36)$$

Para as geometrias em 3D, que apresentavam exatamente as mesmas dimensões dos modelos físicos publicados, a perda de carga do conjunto difusor e placas nos diversos arranjos foi determinada apenas pela **Equação 36**.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresentam-se agora os resultados obtidos para diversas geometrias criadas em 2D no programa COMSOL Multiphysics e 3D, criadas no programa CFX. Os resultados estão divididos em dados de uniformidade de fluxo e perda de carga, de acordo com a seqüência de testes realizada. A uniformidade de fluxo foi estudada em nove diferentes testes que compreenderam distintas combinações de localização de placas perfuradas, porosidades e tamanhos de orifícios (ver Tabela 4).

4.1 Teste 0

O **Teste 0** correspondeu à modelagem de um difusor de entrada, zona de tratamento do precipitador e difusor de saída sem a utilização de nenhuma placa perfurada para controle de uniformidade de fluxo. A **Figura 34** apresenta a geometria deste modelo com linhas de fluxo e indicação de valores de velocidade em cores. Observa-se a grande recirculação de fluxo no interior da zona de tratamento do precipitador devido à ausência de placas perfuradas ou qualquer elemento para controle de uniformidade de fluxo.

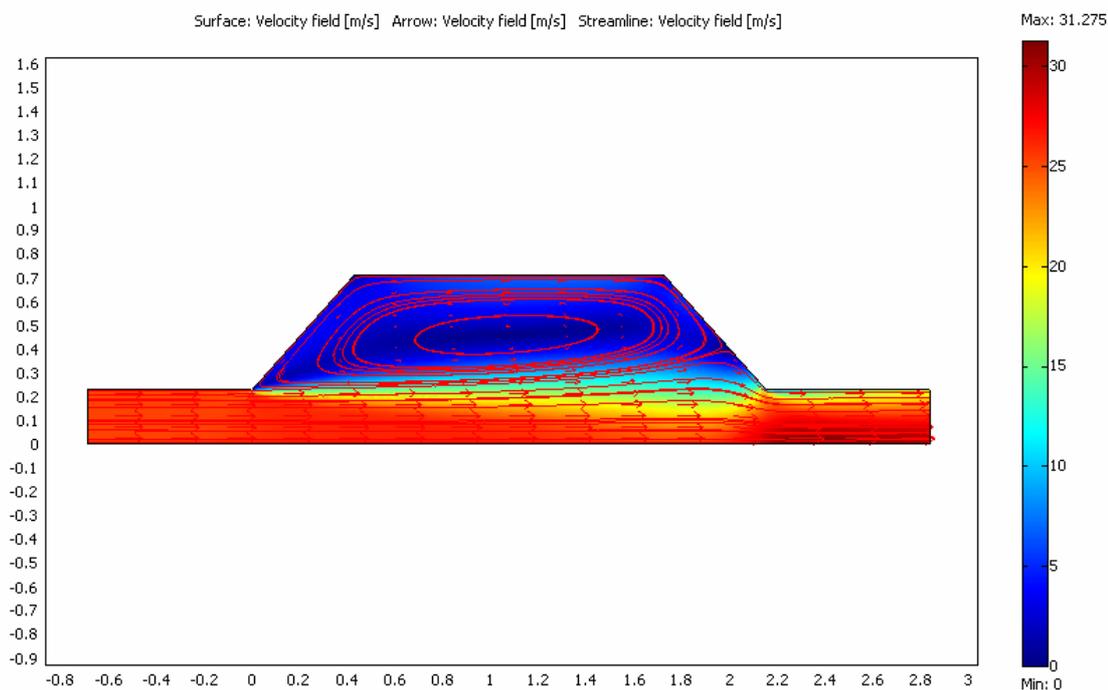


Figura 34. Geometria Teste 0 – Linhas de fluxo e velocidade.

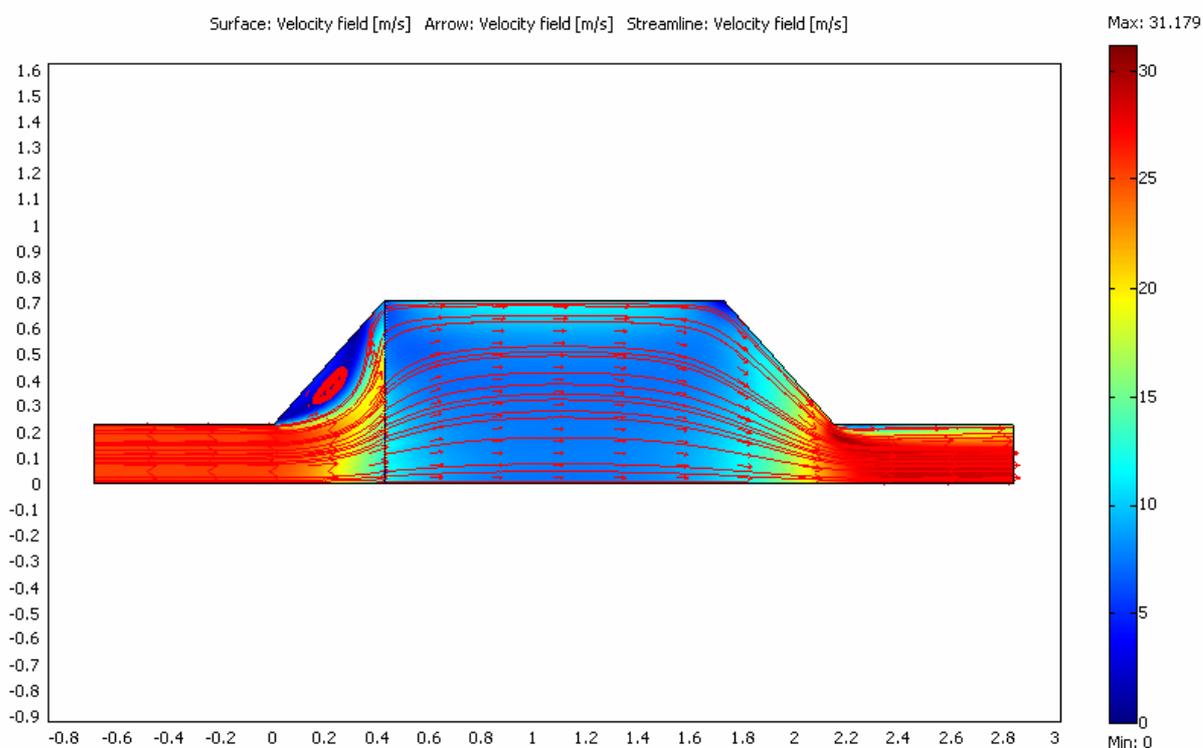
4.2 Teste 1

O **Teste 1** correspondeu à modelagem de um difusor de entrada de um PE, zona de tratamento e difusor de saída com a utilização de apenas uma placa perfurada de porosidade 0,5 para controle de uniformidade de fluxo no final do difusor. O Teste 1 foi subdividido em **a**, **b**, **c**, **d** e **e**, de acordo com o tamanho do orifício de abertura da placa perfurada.

A **Tabela 9** informa o tamanho dos orifícios em 2D utilizados para cada teste e a **Figura 35** mostra uma das geometrias desenvolvidas, com linhas de fluxo e indicação de valores de velocidade em cores.

Tabela 9 - Teste 1 (a - e) - tamanhos dos orifícios utilizados.

Seqüência de experimentos	Tamanho dos orifícios 2D [m]
Teste 1a	0,006
Teste 1b	0,01
Teste 1c	0,02
Teste 1d	0,03
Teste 1e	0,04

**Figura 35.** Geometria Teste 1a – Linhas de fluxo e velocidade.

As **Figuras 36 e 37** mostram o perfil de velocidades nas posições S2 e S4 respectivamente (no início e final da zona de tratamento) para os diversos tamanhos de orifícios. Observa-se visualmente que, para orifícios de tamanho superior a 0,02 m (Testes 1d e 1e), a variação do perfil de velocidades é significativa na posição S2, localizada próxima à placa perfurada (início da zona de tratamento). Esta maior variação é quantificada na **Tabela 11** do **Anexo 1** e na **Figura 39** que apresentam os valores de C.V. na posição S2 para cada teste: os maiores valores são atribuídos aos arranjos 1d e 1e.

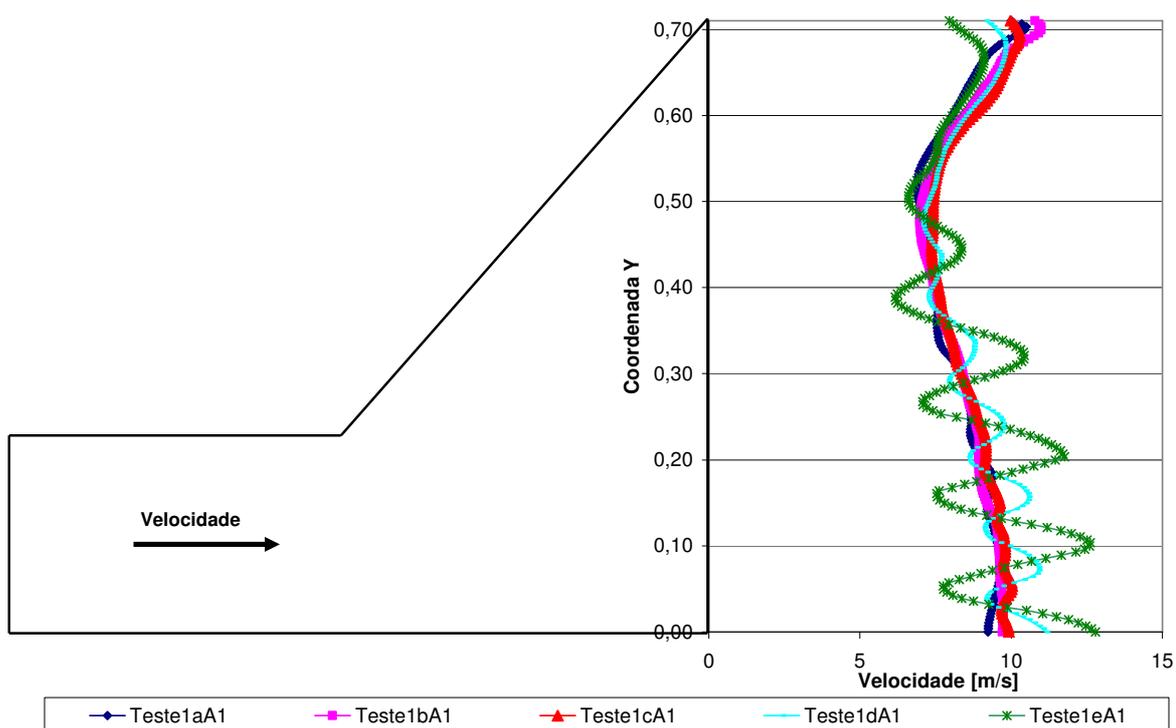


Figura 36. Perfil de velocidades em S2 para os Testes 1a, 1b, 1c, 1d e 1e.

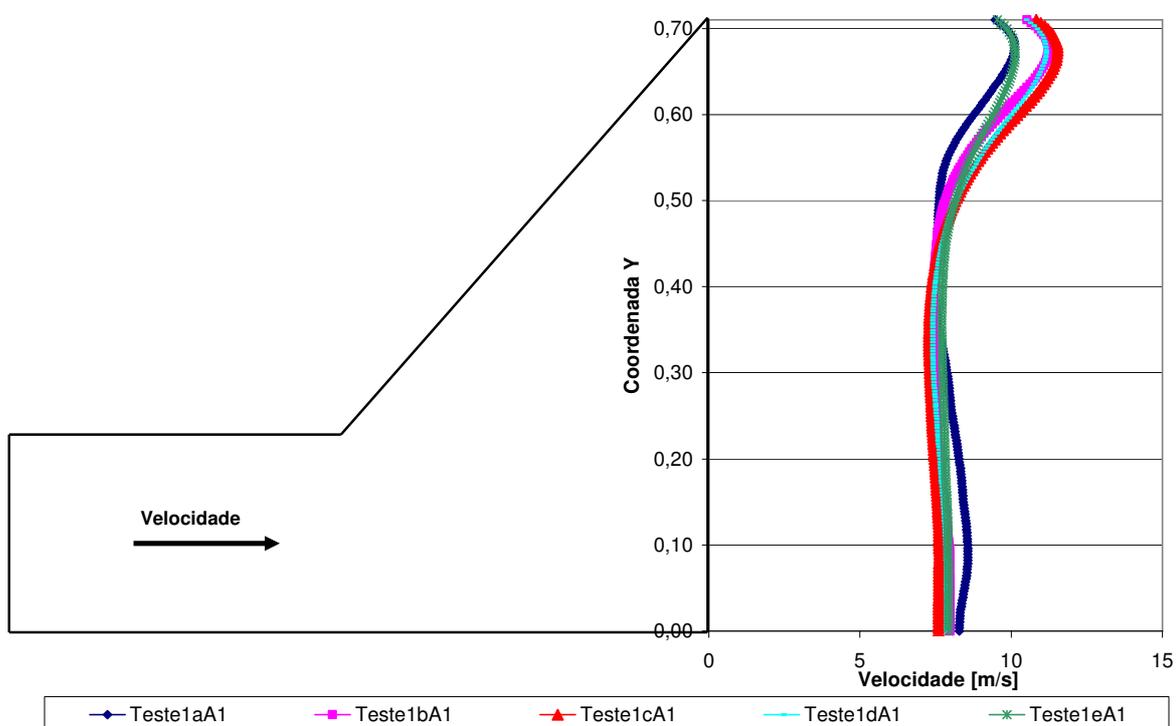


Figura 37. Perfil de velocidades em S4 para os Testes 1a, 1b, 1c, 1d e 1e.

A **Figura 38** mostra a variação do coeficiente de recuperação de pressão global do conjunto placas e difusor (C_p) em função do tamanho dos orifícios no Teste 1. Observa-se que, quanto maior o orifício, menor a perda de carga do arranjo, como já era esperado.

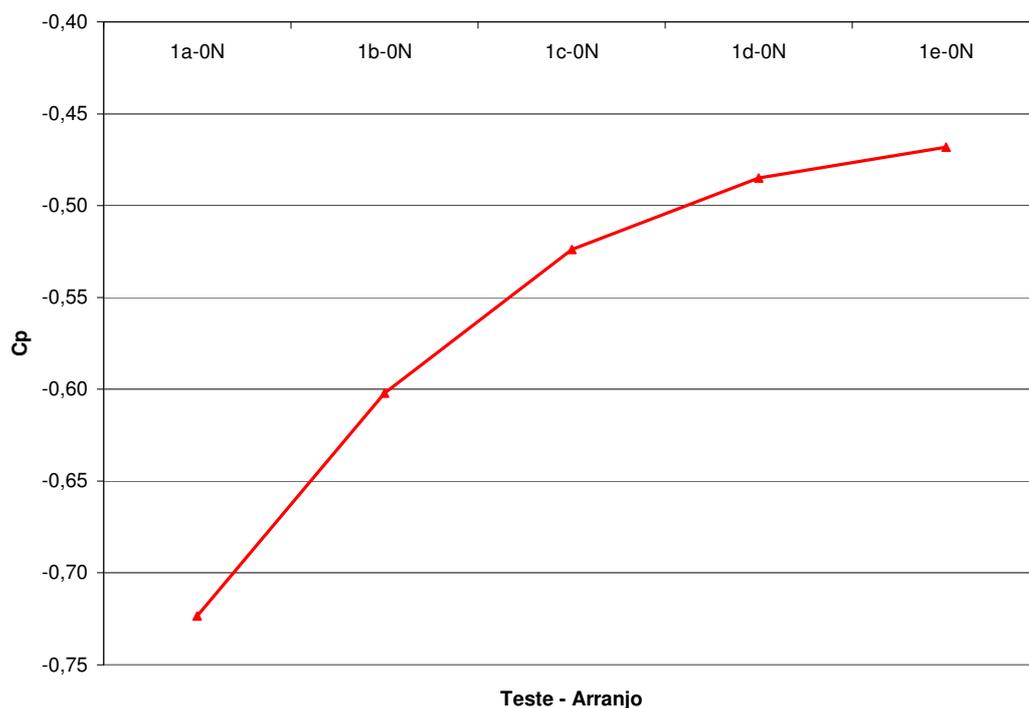


Figura 38. Valores de C_p para os Testes 1a, 1b, 1c, 1d e 1e.

A **Figura 39** mostra a variação do coeficiente de variação de velocidades, $C.V.$, na posição S2 (início da zona de tratamento), em função do tamanho dos orifícios no Teste 1. Observa-se que há uma tendência de quanto maior o orifício, menor a uniformidade de fluxo e maior o valor de $C.V.$ após a placa perfurada.

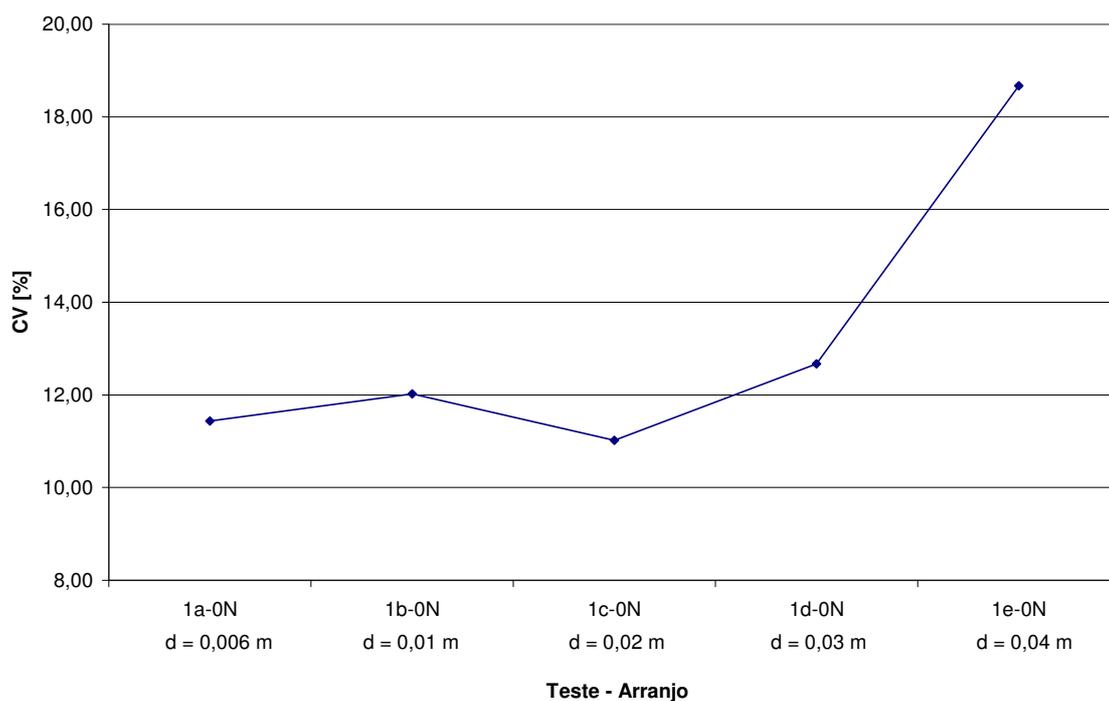


Figura 39. Valores de $C.V.$ em S2 para os Testes 1a, 1b, 1c, 1d e 1e.

4.3 Teste 2

O **Teste 2** correspondeu à modelagem de um difusor de entrada, zona de tratamento do precipitador e difusor de saída com a utilização de duas placas perfuradas de porosidade 0,5 (AA e BB) para controle de uniformidade fluxo. A placa AA localiza-se sempre a jusante da placa BB. O Teste 2 foi realizado com os arranjos de placas 0, 1 e 2, que apresentam combinações da placa AA, nas posições 0, 1 e 2 (última, penúltima e ante-penúltima posições antes do final do difusor), e da placa BB, que têm sua localização variável nas posições 1 a 7. As **Figuras 40 a 46** mostram como exemplo as diversas geometrias correspondentes aos arranjos 0, com a placa AA fixa no final do difusor e a placa BB variando nas posições 1 a 7, com linhas de fluxo e indicação de valores de velocidade em cores.

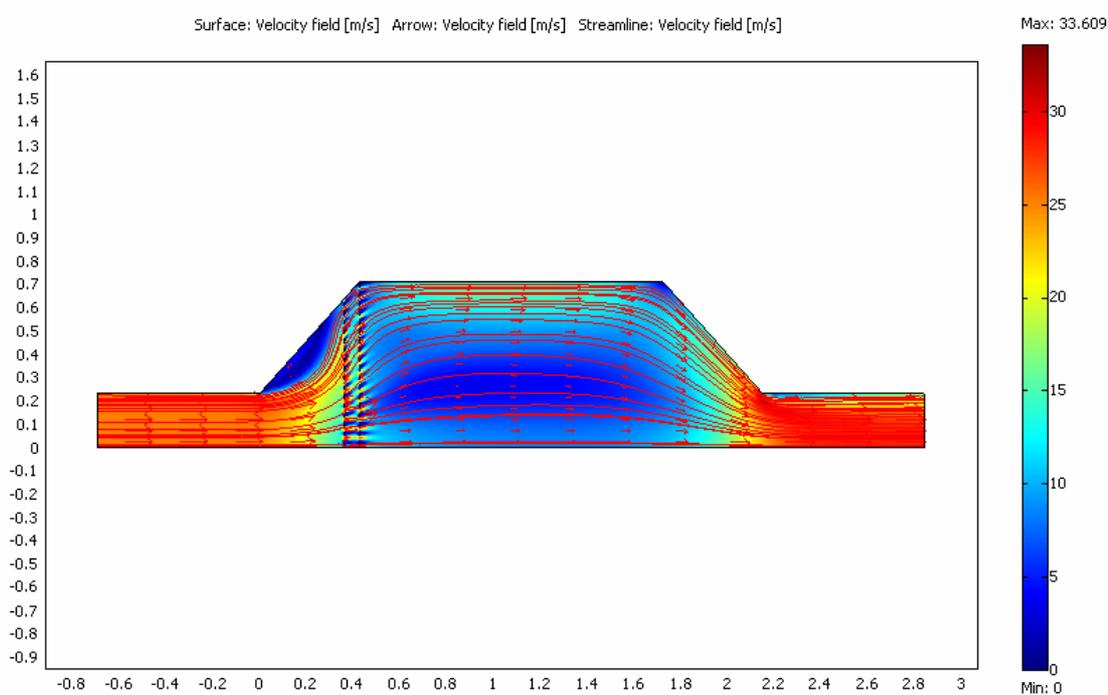


Figura 40. Geometria Teste 2, arranjo 01 – Linhas de fluxo e velocidade.

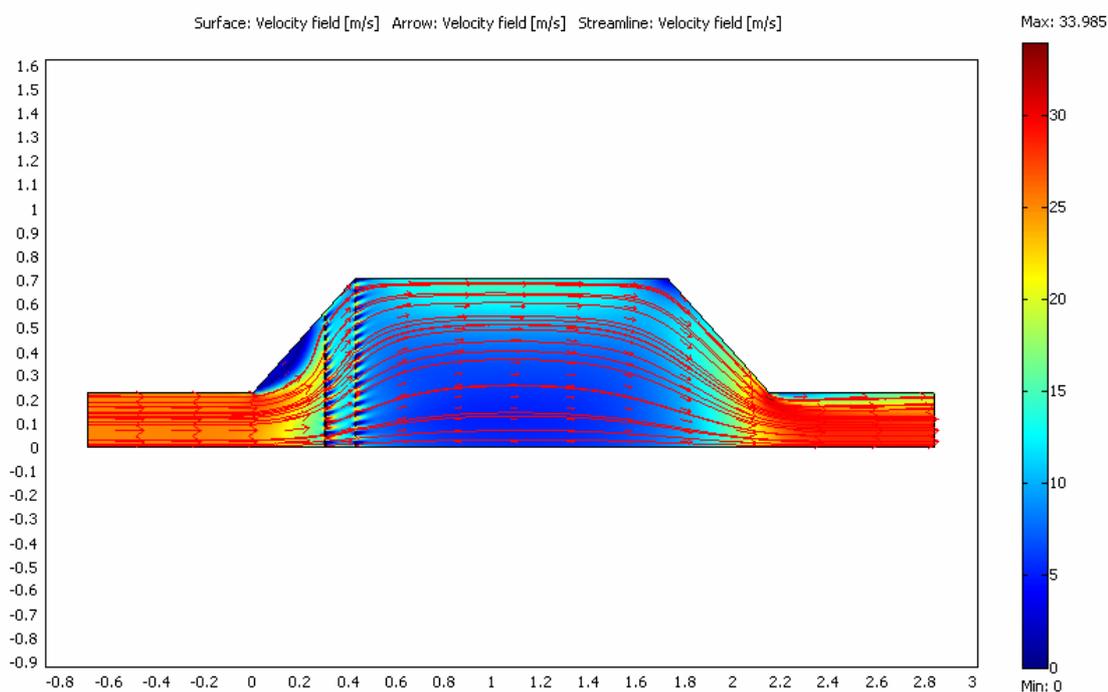


Figura 41. Geometria Teste 2, arranjo 02 – Linhas de fluxo e velocidade.

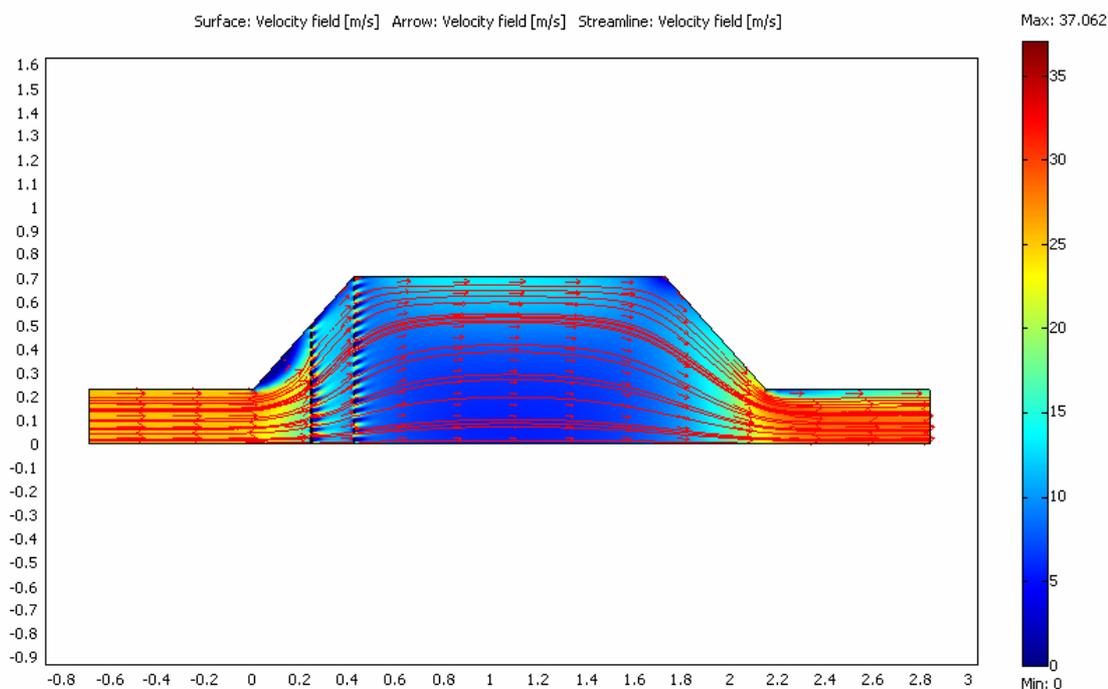


Figura 42. Geometria Teste 2, arranjo 03 – Linhas de fluxo e velocidade.

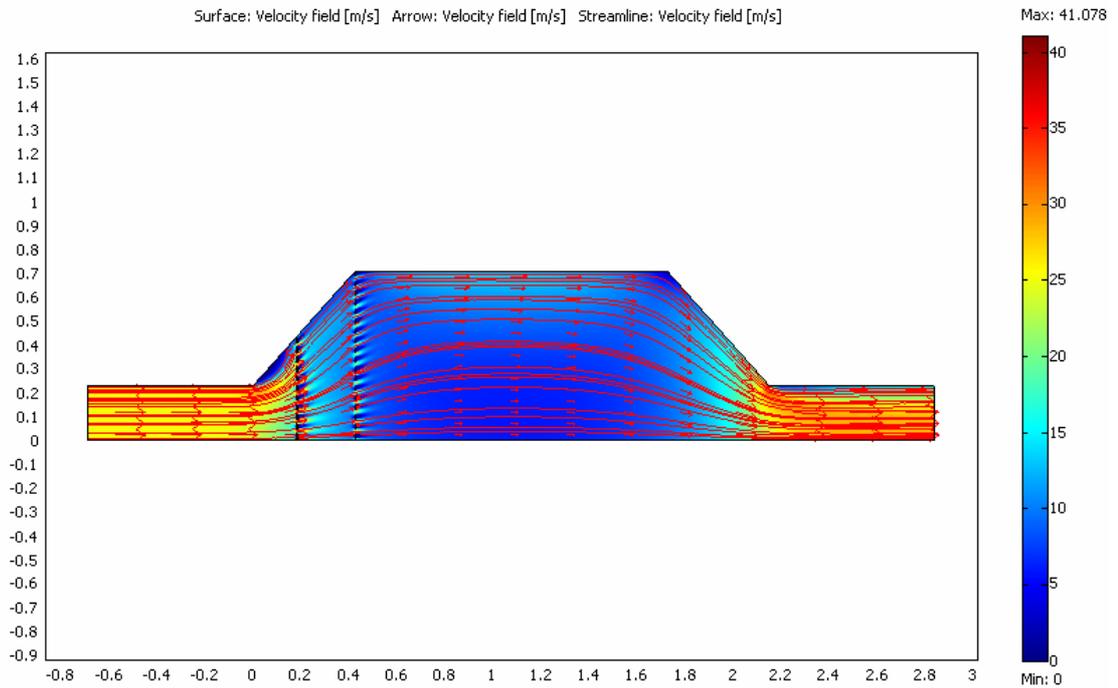


Figura 43. Geometria Teste 2, arranjo 04 – Linhas de fluxo e velocidade.

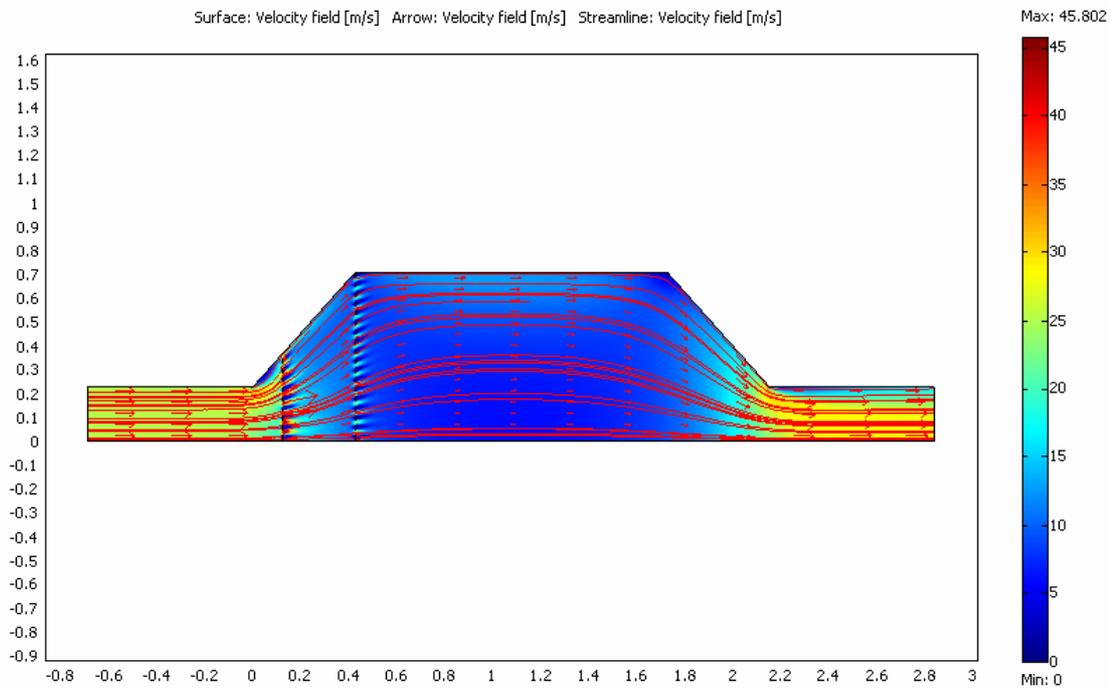


Figura 44. Geometria Teste 2, arranjo 05 – Linhas de fluxo e velocidade.

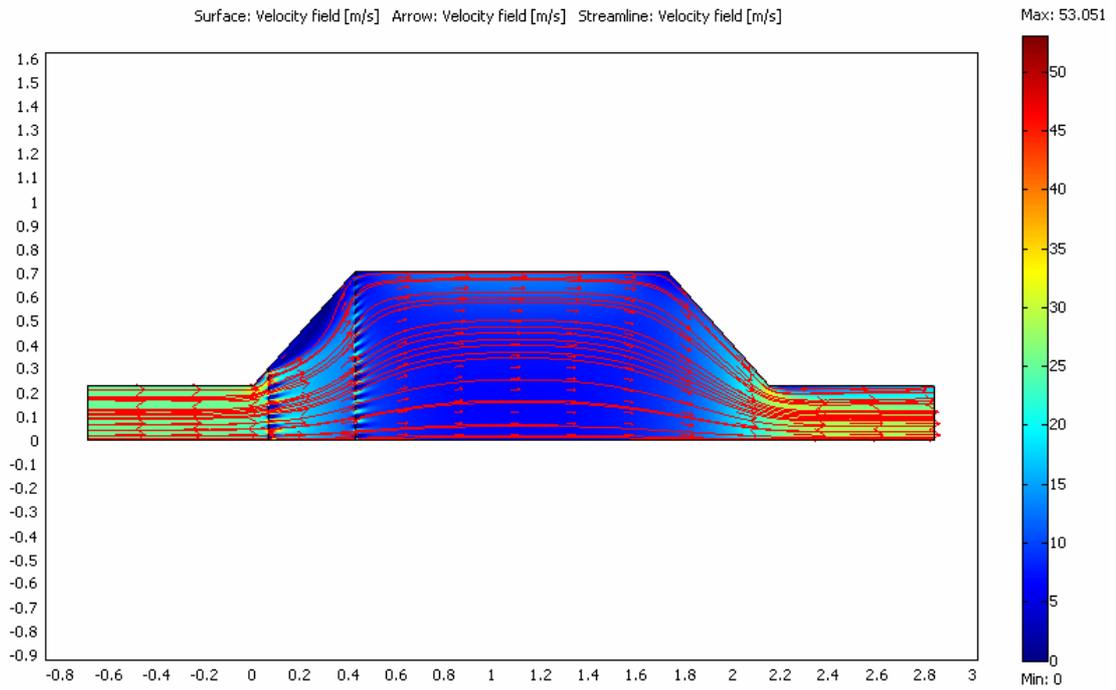


Figura 45. Geometria Teste 2, arranjo 06 – Linhas de fluxo e velocidade.

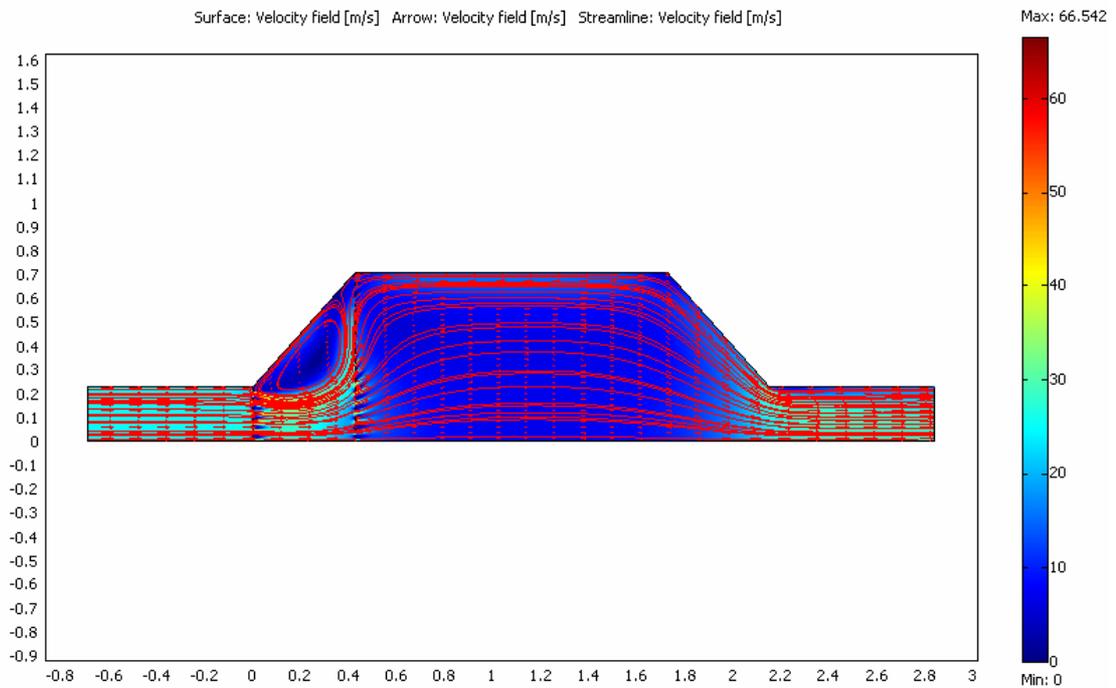


Figura 46. Geometria Teste 2, arranjo 07 – Linhas de fluxo e velocidade.

O tamanho de orifício adotado no Teste 2 foi 0,02 m, um valor maior que o tamanho de orifício descrito nos artigos de Sahin & Ward-Smith (1987) e Sahin & Ward-Smith (1990), que adotaram 0,006 m. Este tamanho maior de orifício foi utilizado de modo a gerar uma malha com menor número de elementos, reduzir a complexidade da geometria e o tempo de processamento dos resultados.

Foram calculados os valores de C_p para todos os arranjos estudados no Teste 2, por meio das **Equações 35**, Modelo Empírico II modificado, e **36**, baseada em valores de pressão obtidos do modelo computacional. A **Figura 47** mostra os dados de C_p dos modelos elaborados no presente trabalho com arranjo 0, placa AA fixa no final do difusor e placa BB variando nas posições 1 a 7. Na mesma figura são apresentados para comparação os dados dos modelos físicos e dos cálculos realizados por Sahin & Ward-Smith (1987) pelas **Equações 20 e 36** para os mesmos arranjos tipo 0.

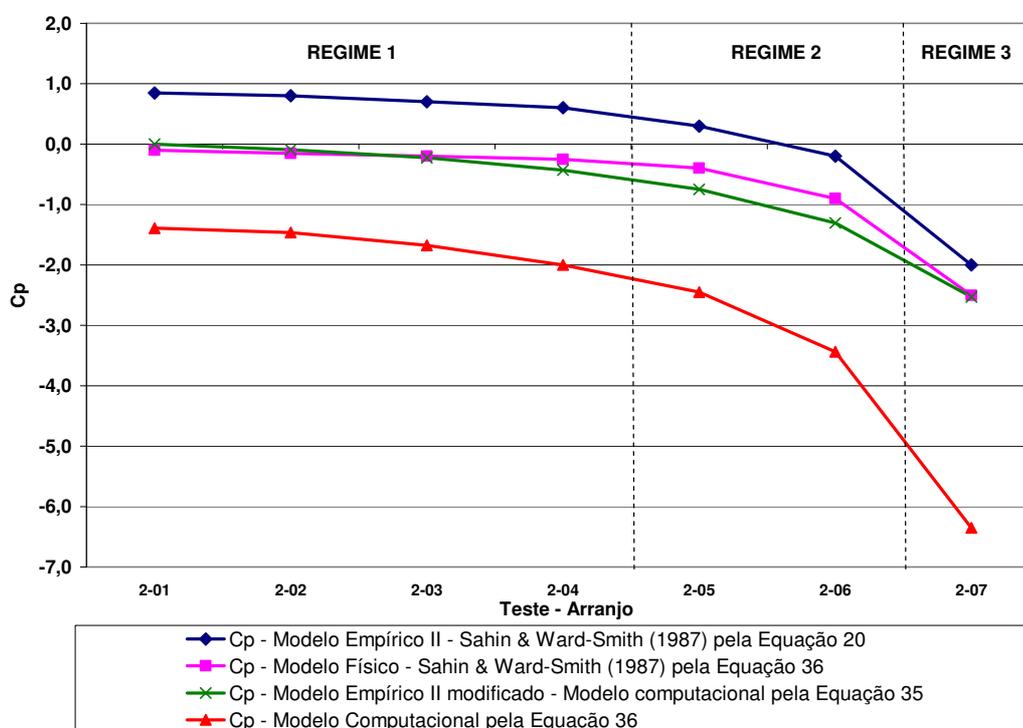


Figura 47. Valores C_p de para os arranjos tipo 0 e classificação dos tipos de regime – Teste 2.

Pela **Figura 47** observa-se que, da mesma forma como nos artigos de Sahin & Ward-Smith (1987), os valores de C_p apresentam o mesmo comportamento entre o modelo empírico e o medido nos modelos físicos e computacionais. Nota-se a boa precisão do cálculo pelo Modelo Empírico II, **Equação 36**, utilizando-se os dados do modelo computacional quando comparado com os dados do modelo físico publicado. Pode-se observar ainda que, os arranjos levam a 3 tipos de regime: com baixa, média e alta perda de carga.

A **Figura 48** mostra a variação de pressão entre entrada e saída do difusor para os arranjos tipo 0 (com placa AA fixa no final do difusor na posição 0 e placa BB variando nas posições 1 a 7). Este gráfico mostra o mesmo comportamento do gráfico de C_p já apresentado na **Figura 47**, as placas mais próximas no final do

difusor apresentam menor perda de carga e a diferença de pressão aumenta à medida em que a placa BB se afasta da placa AA em direção à montante.

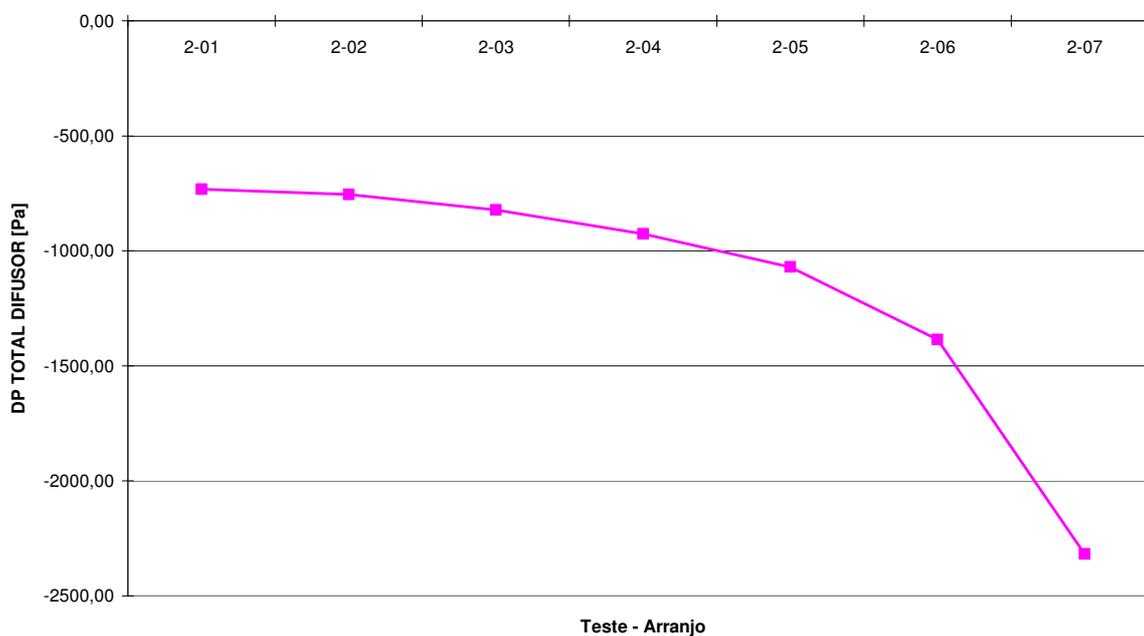


Figura 48. Valores de variação de pressão para os arranjos tipo 0.

Os valores de C.V. nas posições S1, S2, S3 e S4, para os mesmos arranjos tipo 0, são mostrados na **Figura 49**. Pode-se observar que os arranjos presentes no Regime 2, da mesma forma como apresentado por Sahin & Ward-Smith (1987), apresentam os melhores resultados em termos de uniformidade de fluxo. No Regime 1, quando as placas perfuradas encontram-se mais próximas umas das outras, a perda de carga imposta pelo conjunto não é suficiente para melhoria de uniformidade. Já no Regime 3, a perda de carga é significativamente maior, porém não leva a uma melhoria na distribuição dos gases, devido à recirculação observada entre as placas.

Nota-se ainda pela **Figura 49** que o perfil de velocidades na posição S1, no duto de entrada, encontra-se uniforme. Para melhor observação dos perfis de velocidade no início da zona de tratamento (posição S2), foram elaboradas as **Figuras 50 a 52**. Elas mostram como exemplo a distribuição de velocidades para os arranjos tipo 0 separadas por tipo de regime.

No Regime 1 observa-se maior velocidade próximo às paredes da zona de tratamento. No Regime 2, o perfil observado apresenta velocidades mais constantes ao longo da seção transversal. No Regime 3, há uma tendência de maior velocidade no centro e menor velocidade próximo às paredes da zona de tratamento. De forma semelhante ao apresentado em modelos físicos da literatura, nota-se que é possível eliminar a baixa velocidade no centro da zona de tratamento do precipitador, movimentando-se a placa BB para montante, ou seja, do Regime 1 para o Regime 3.

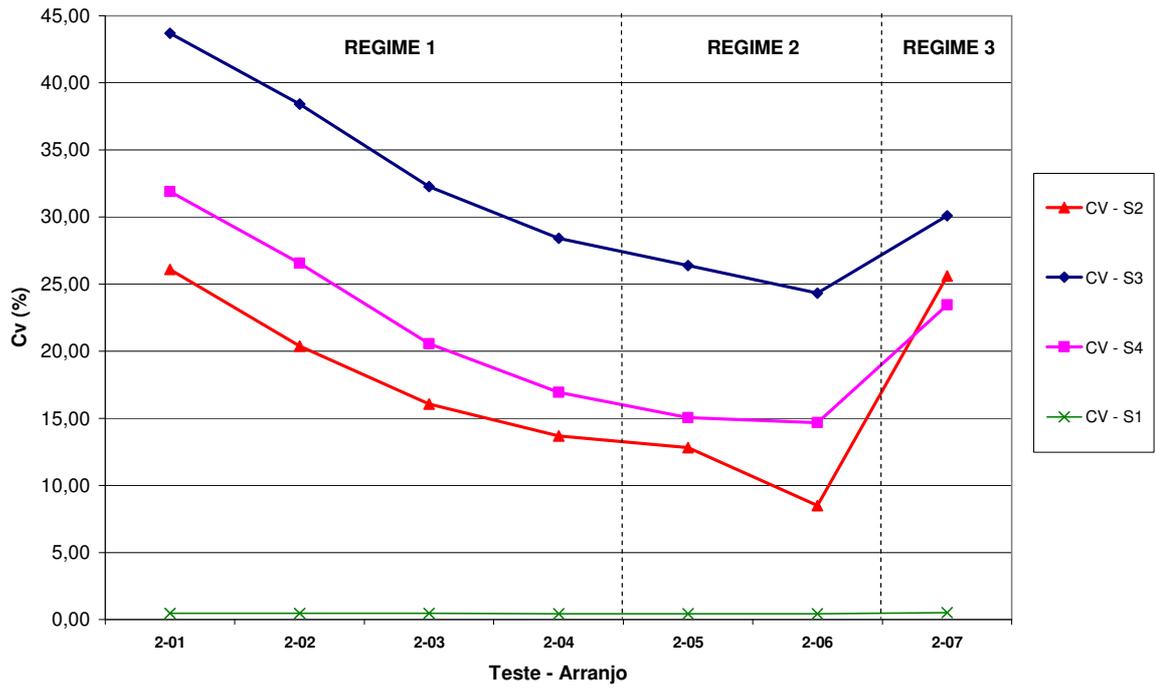


Figura 49. Valores de C.V. nas posições S1, S2, S3 e S4 para os arranjos tipo 0 – Teste 2.

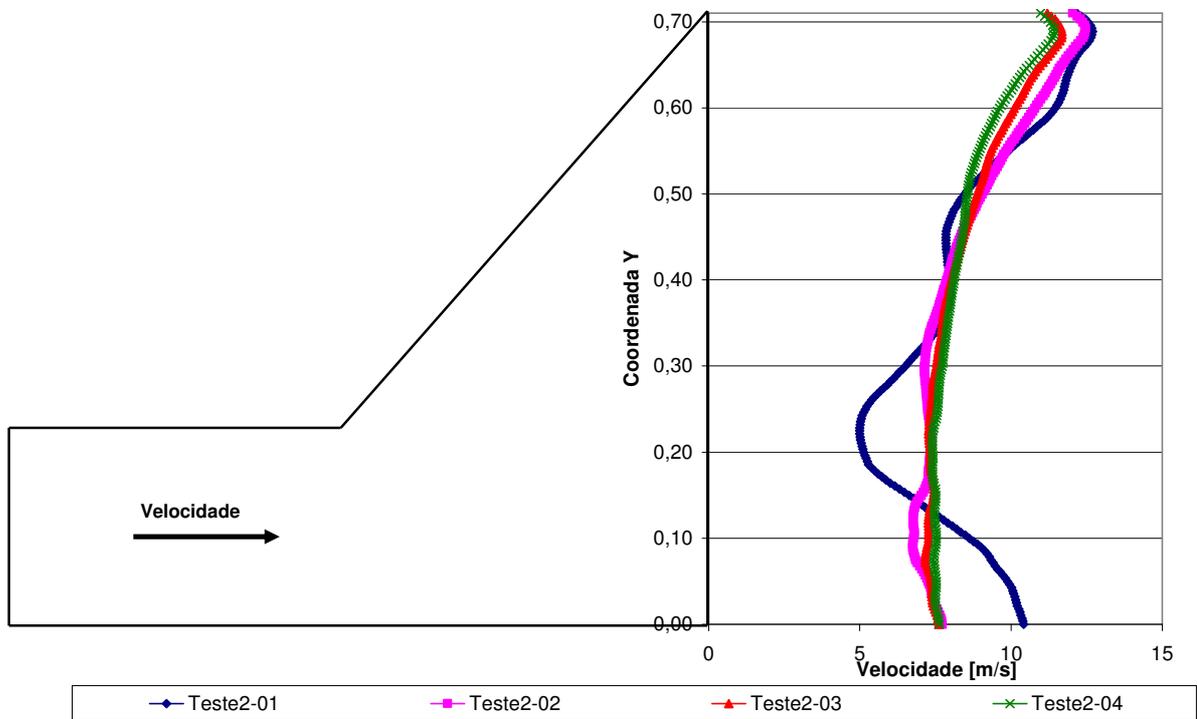


Figura 50. Perfil de velocidades em S2 – Regime 1 – arranjos tipo 0.

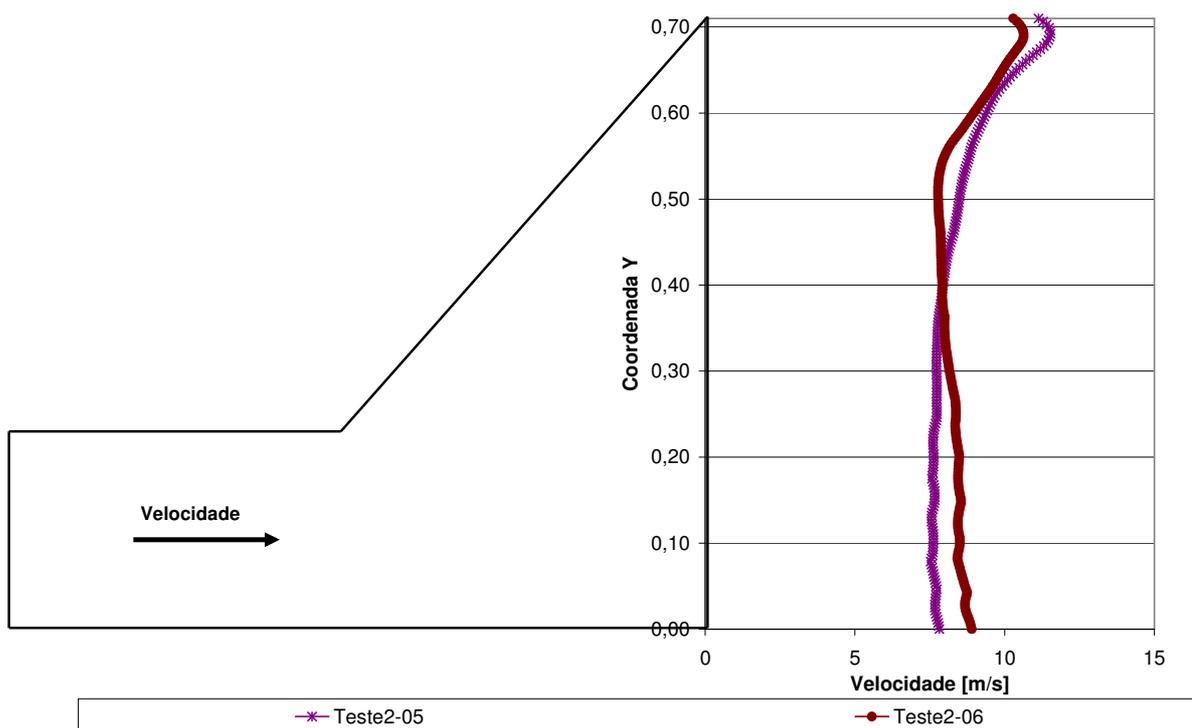


Figura 51. Perfil de velocidades em S2 – Regime 2 – arranjos tipo 0.

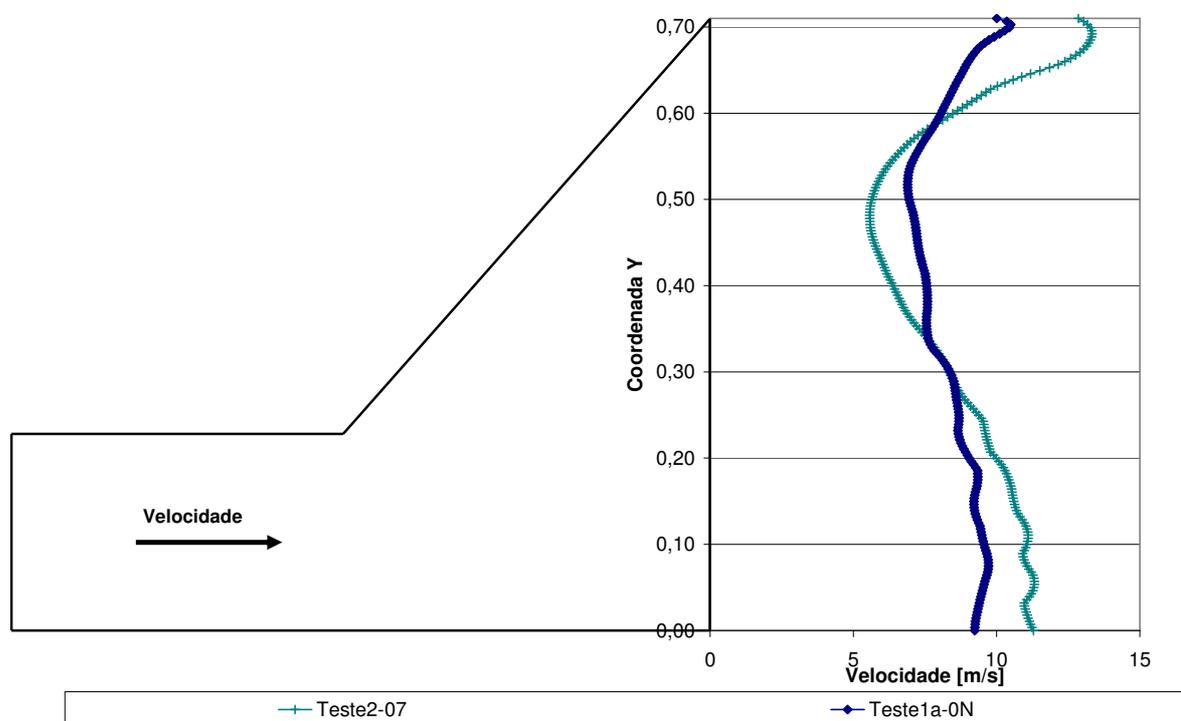


Figura 52. Perfil de velocidades em S2 – Regime 3 – arranjos tipo 0 e 0N.

Na **Figura 52** foi incluído o perfil de velocidades do arranjo 0N do Teste 1a, que apresenta apenas uma placa perfurada fixa no final do difusor. Observa-se a semelhança de perfil entre a colocação de apenas uma placa e o arranjo 07, cuja segunda placa (BB) está muito distante, no início do difusor e a placa AA esta fixa no

final do difusor, como no Teste1a. Isto indica que a placa BB no arranjo 07, pelo seu afastamento da placa 7, não exerce grande influência na melhoria da distribuição de velocidades.

Os resultados de uniformidade de fluxo (*C.V.*) nas posições S2, S4 e o valor médio entre estes dois números, para todos os modelos elaborados no Teste 2, são apresentados na **Figura 53**.

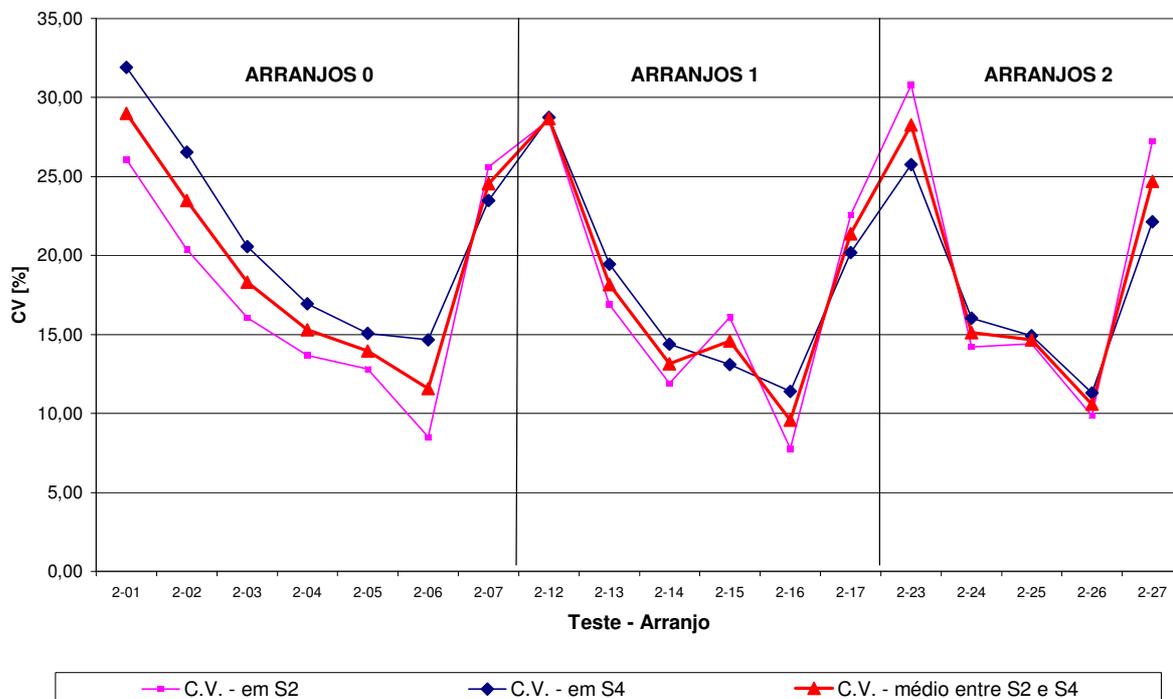


Figura 53. Valores de *C.V.* nas posições S1 e S4, e *C.V.* médio para estas duas posições, para todos os arranjos do Teste 2.

Nota-se que o melhor resultado de uniformidade foi apresentado pelo arranjo 16, por apresentar o menor valor de *C.V.* tanto em S2 quanto em S4. Com esta geometria os resultados de *C.V.* obtidos foram 7,8% em S2, 21,8% em S3 e 11,4% em S4. Dentre as geometrias estudadas por Sahin & Ward-Smith (1987), este arranjo foi também o que melhor resultado apresentou em termos de uniformidade de fluxo. Todavia, os resultados de *C.V.* encontrados nos modelos computacionais mostraram-se apenas qualitativamente parecidos com os obtidos de modelos físicos.

Sahin & Ward-Smith (1987), encontraram valores de *C.V.* iguais a 15% em S2, 16,8% em S3 e 13% em S4 para o arranjo 16. Os dados obtidos em CFD concordam com estes quanto aos menores valores em S2 e S4, quando comparados a S3.

Os valores de C_p medidos nos modelos CFD em 2D para todos os arranjos do Teste 2 são apresentados na **Figura 54**. Nota-se um mesmo perfil de aumento dos valores de C_p , à medida que a placa BB se afasta da placa AA.

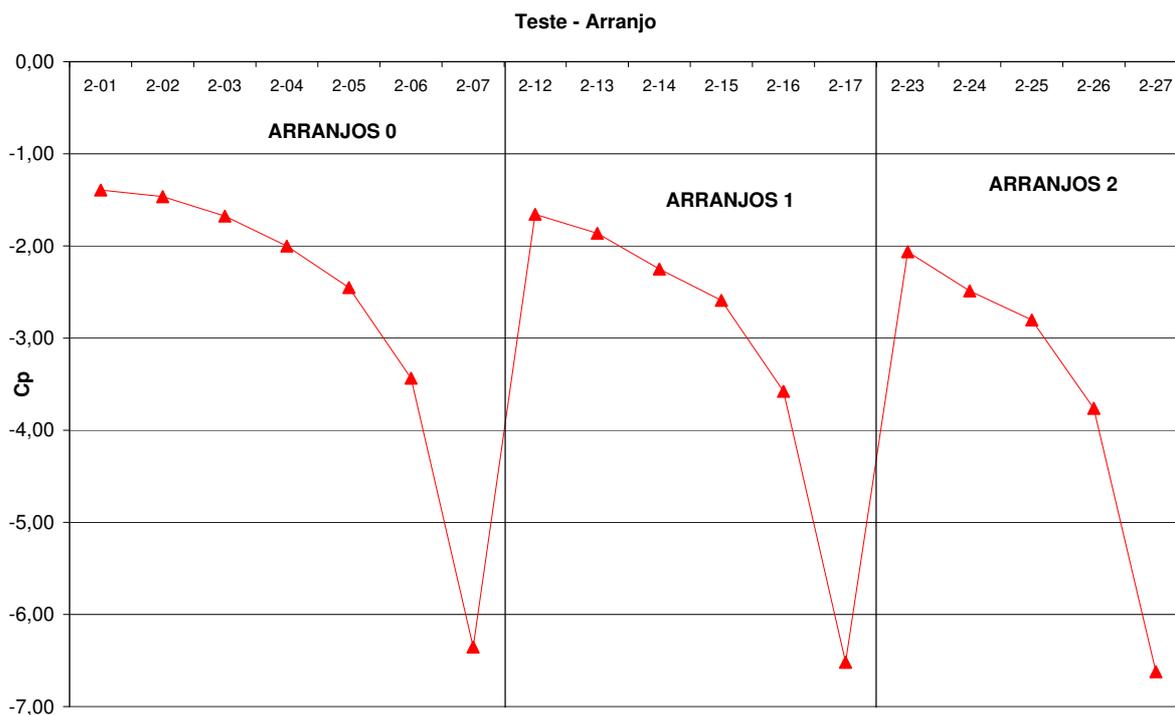


Figura 54. Valores C_p de para todos os arranjos do Teste 2.

4.4 Teste 3

Utilizando-se os mesmos arranjos do **Teste 2**, o **Teste 3** correspondeu à modelagem de um difusor de entrada, zona de tratamento do precipitador e difusor de saída com a utilização de duas placas perfuradas de porosidade 0,4 (AA e BB) para controle de uniformidade fluxo. O tamanho dos orifícios utilizado foi 0,02 m.

Foram calculados os valores de C_p para todos os arranjos estudados. A **Figura 55** mostra tanto os valores de C_p medidos nos modelos CFD e calculados pela **Equação 36**, quanto calculados pelo Modelo Empírico II (**Equação 35**). Observa-se que, devido à menor porosidade, a perda de carga global nestes arranjos foi maior que nos arranjos de porosidade 0,5. Nota-se que a perda de carga aumenta bastante já no arranjo 06, diferente do que acontece no Teste 2, onde o aumento brusco se dá no arranjo 07.

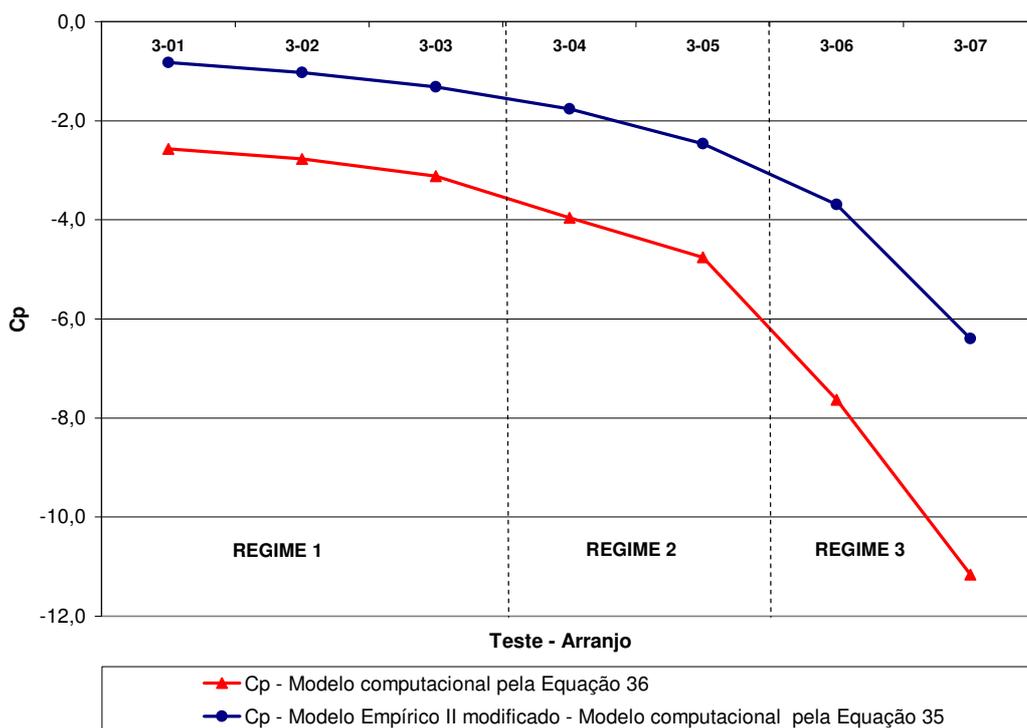


Figura 55. Valores C_p de para os arranjos tipo 0 e classificação dos tipos de regime – Teste 3.

Os valores de C.V. nas posições S2 e S4, bem como o valor médio entre estas duas posições, são mostrados na **Figura 56**.

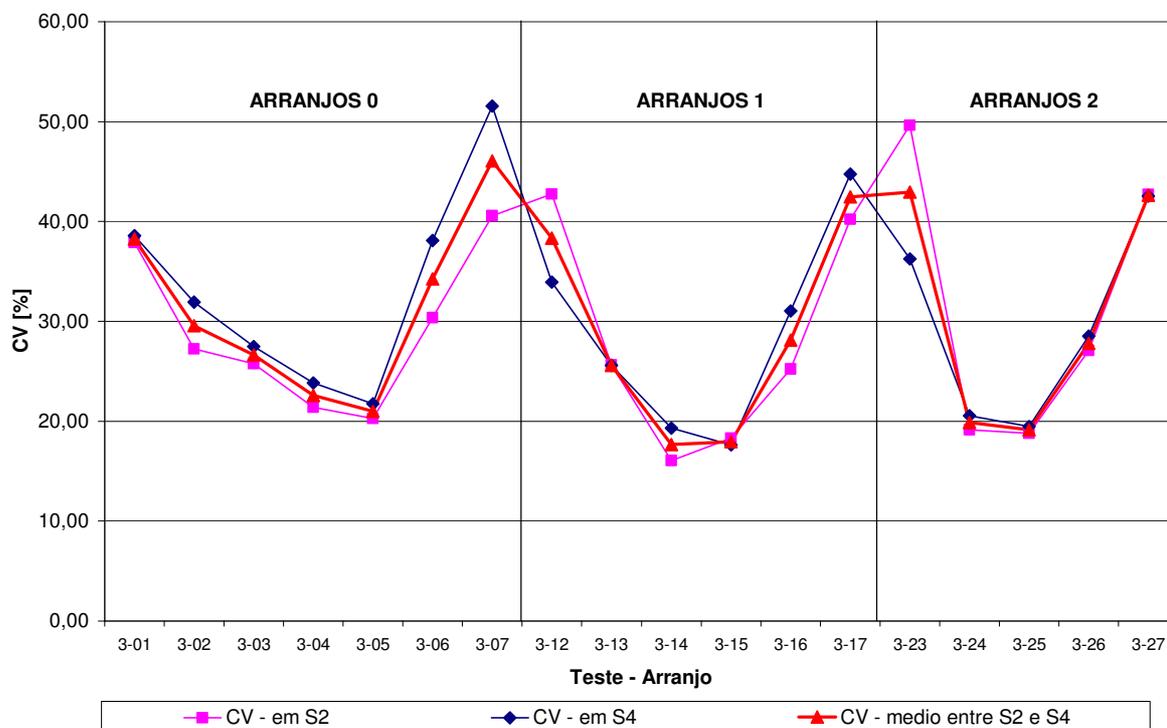


Figura 56. Valores de C.V. nas posições S2 e S4, e C.V. médio para estas duas posições, para todos os arranjos do Teste 3.

O melhor resultado de uniformidade de fluxo do **Teste 3** correspondeu ao arranjo 14, com a placa AA na posição 1 e a placa BB na posição 4. Observou-se que nenhum dos os valores de $C.V.$ médio das posições S2 e S4 encontrados no Teste 3 foi inferior ao melhor resultado obtido no Teste 2.

De forma semelhante ao observado por Sahin & Ward-Smith (1987), os arranjos com porosidade 0,4 apresentaram tendência de alta velocidade nas paredes devido à alta resistência e altos ângulos de divergência encontrados. A **Figura 57** mostra um exemplo de perfis de velocidade acentuados próximo à parede.

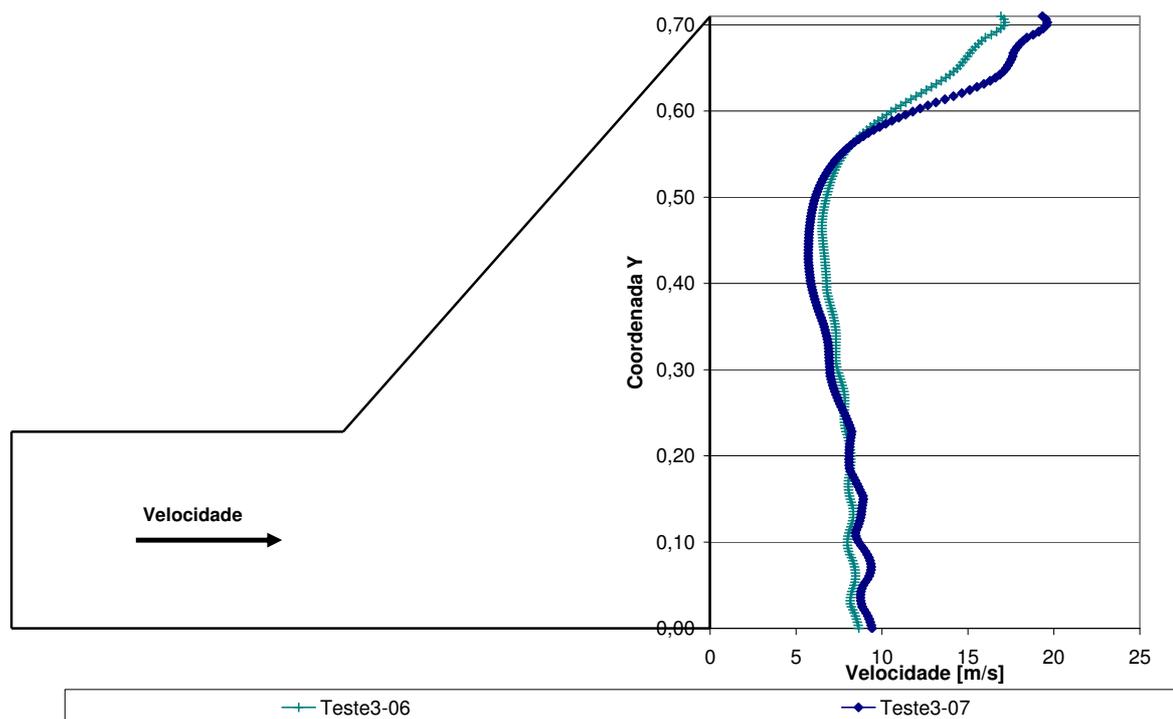


Figura 57. Perfil de velocidades – Regime 3 – arranjos tipo 0 – Teste 3.

4.5 Teste 4

O **Teste 4** correspondeu à modelagem de um difusor de entrada, zona de tratamento do precipitador e difusor de saída com a utilização de duas placas perfuradas de porosidade 0,58 (AA e BB) para controle de uniformidade fluxo. O tamanho dos orifícios utilizado foi 0,02 m.

Foram calculados os valores de C_p para todos os arranjos estudados. A **Figura 58** mostra tanto os valores de C_p medidos nos modelos CFD e calculados pela **Equação 36**, quanto calculados pelo Modelo Empírico II (**Equação 35**). Observa-se que, devido à maior porosidade, a perda de carga global nestes arranjos foi menor que nos arranjos de porosidade 0,5 e 0,4.

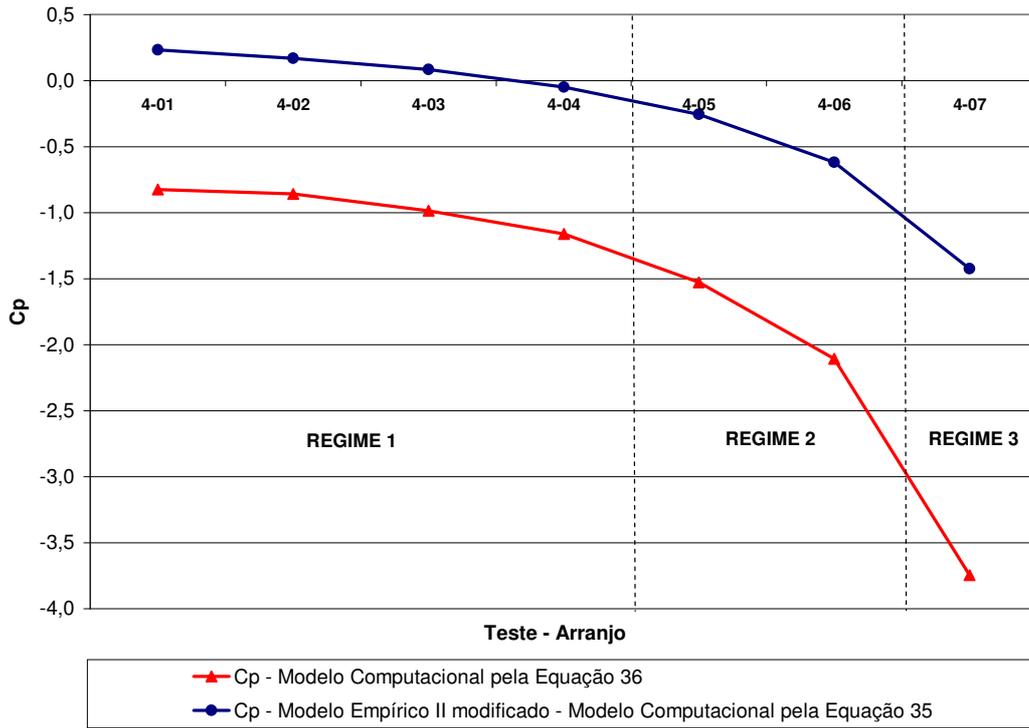


Figura 58. Valores C_p de para os arranjos tipo 0 e classificação dos tipos de regime – Teste 4.

Os valores de C.V. nas posições S2 e S4 (início e final da zona de tratamento), bem como o valor médio entre estas duas posições, são mostrados na **Figura 59**.

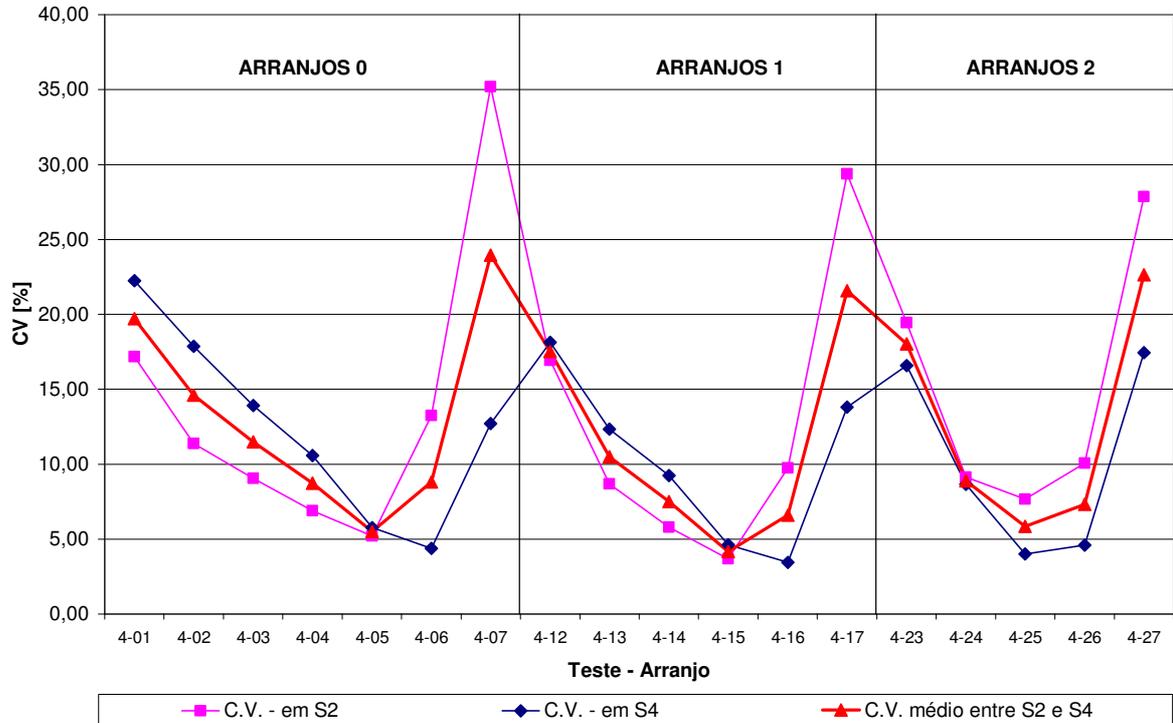


Figura 59. Valores de C.V. nas posições S2 e S4, e C.V. médio para estas duas posições, para todos os arranjos do Teste 4.

O melhor resultado de uniformidade de fluxo do Teste 4 correspondeu ao arranjo 15. Observou-se que os valores de $C.V.$ médio das posições S2 e S4 encontrados no Teste 4 foram menores que o melhor resultado obtido no Teste 2. Assim, de forma diferente do observado por Sahin & Ward-Smith (1987), os arranjos com porosidade 0,58 apresentaram bons resultados.

A **Figura 60** mostra um resultado também observado por Sahin & Ward-Smith (1987). As placas de porosidade 0,58 apresentam alta velocidade no centro. Porém isto não é observado de forma expressiva para todas as posições. Segundo Sahin & Ward-Smith (1987) esta situação era observada não importando a posição em que as placas foram colocadas; a resistência K oferecida era muito baixa para distribuir uniformemente o fluxo no final do difusor. Os modelos 2D elaborados não permitem ver de forma completa a concentração de fluxo no centro da zona de tratamento.

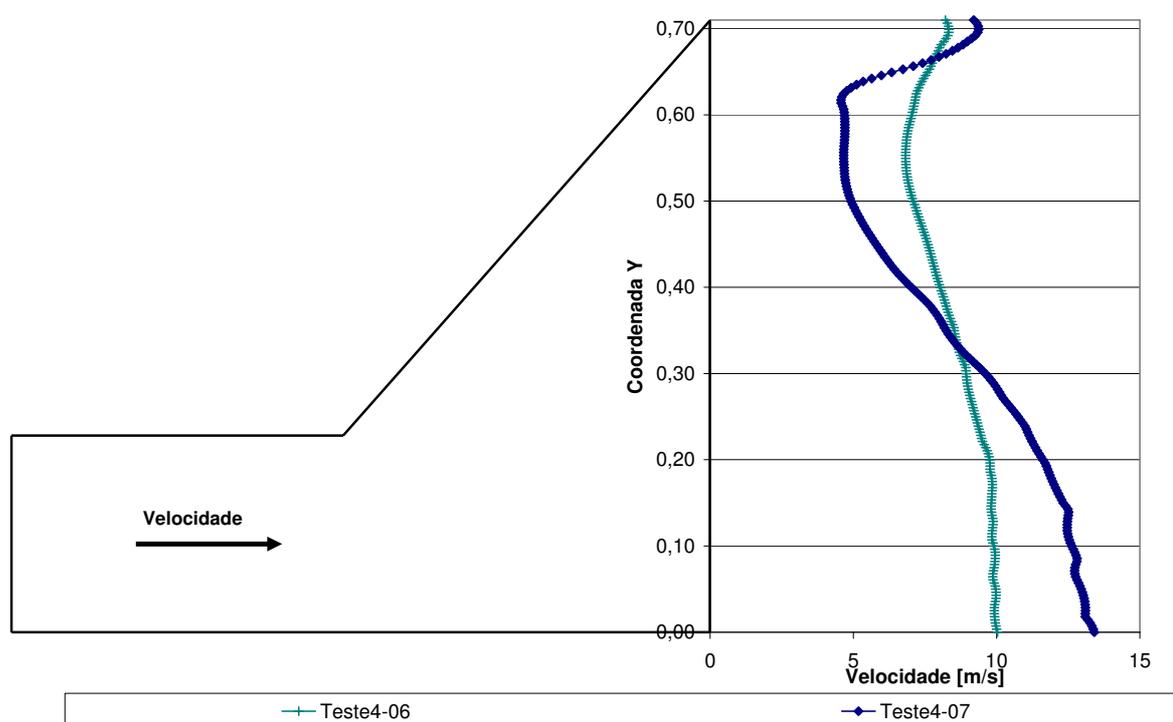


Figura 60. Perfil de velocidades – arranjos tipo 0 – Teste 4.

4.6 Teste 5

Após a análise dos resultados do Teste 2, foi elaborado o **Teste 5** com o intuito de analisar os resultados de uniformidade com os arranjos 15,5 e 16,5. Estes arranjos mantêm a placa AA na posição 1 e a placa BB próxima à posição 6, ou seja nas posições 5,5 e 6,5. Este teste buscou verificar possíveis pontos de menor $C.V.$ aos arredores do melhor arranjo obtido no Teste 2. O tamanho dos orifícios utilizado continuou a ser 0,02 m, como no Teste 2.

Foram calculados os valores de C_p para os arranjos 15,5 e 16,5 estudados. A **Figura 61**, mostra os valores de C_p pelos modelos CFD em comparação com os valores já obtidos dos arranjos 15 e 16 do Teste 2.

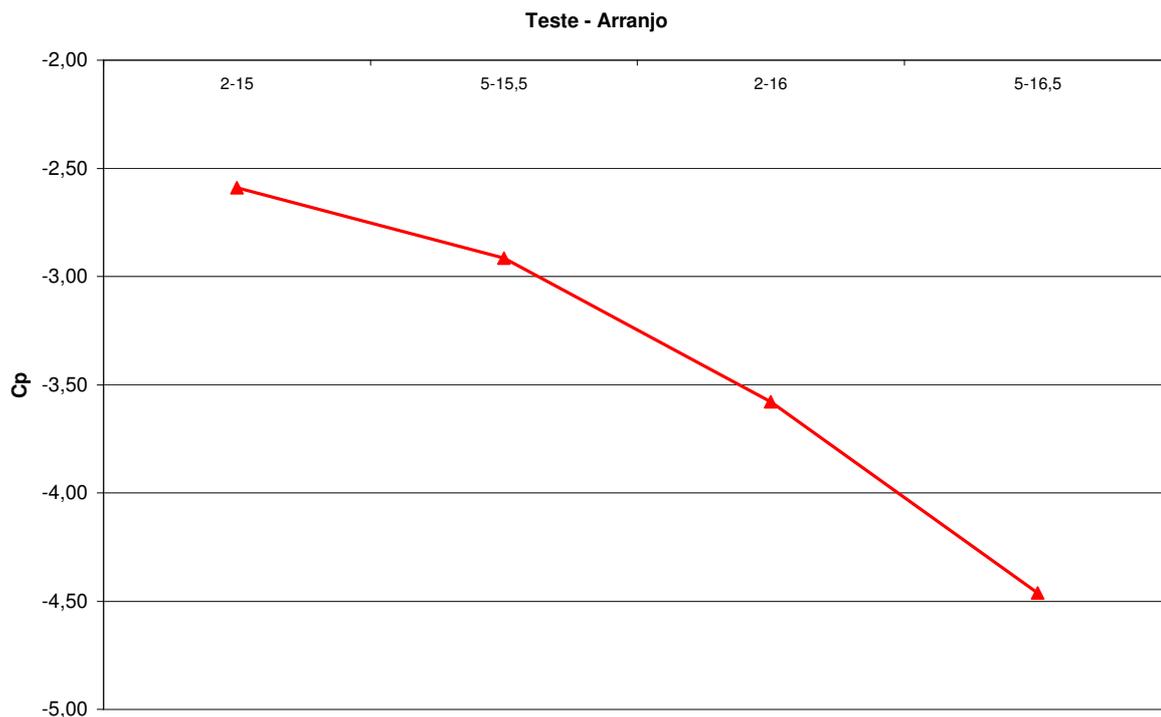


Figura 61. Valores C_p de para os arranjos 15,5 e 16,5 – Comparativo dos Testes 2 e 5.

Os valores de C.V. nas posições S2 e S4 (início e final da zona de tratamento), bem como o valor médio entre estas duas posições, são mostrados na **Figura 62**.

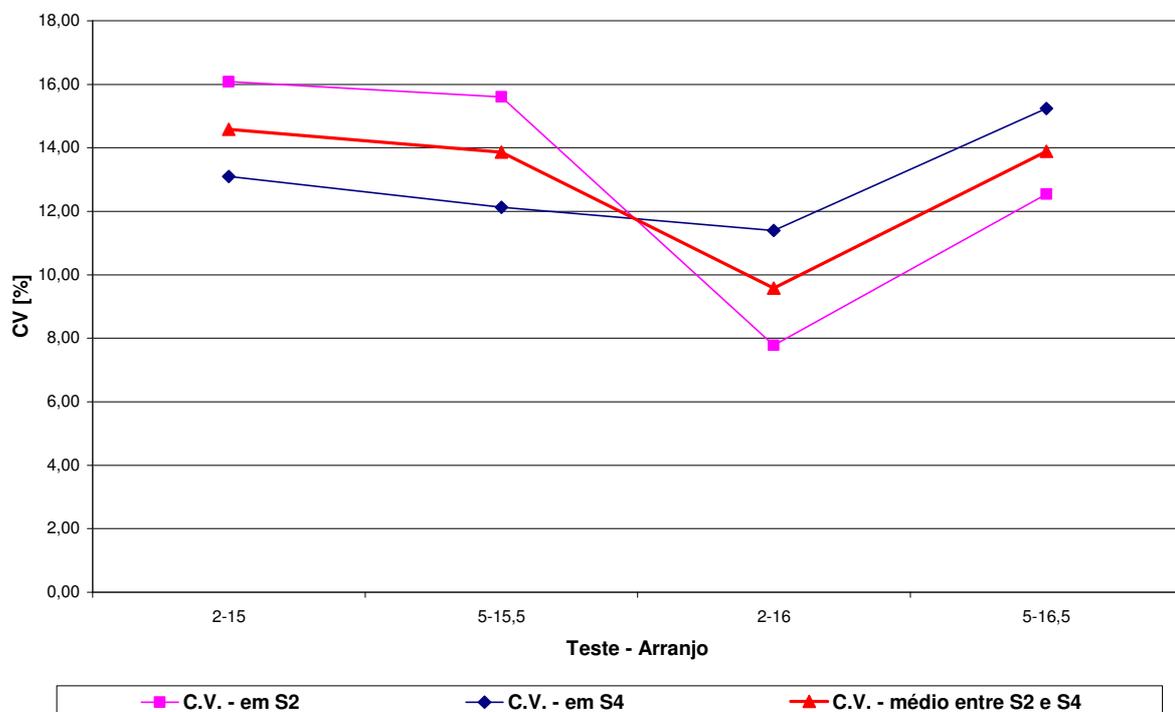


Figura 62. Valores de C.V. nas posições S2 e S4, e C.V. médio para estas duas posições - Comparativo dos Testes 2 e 5.

Observa-se pela **Figura 62** que o melhor arranjo, em termos de distribuição de gases, entre os quatro comparados, continua a ser o arranjo 16, como concluído no Teste 2. A **Figura 63** apresenta o perfil de velocidades dos quatro arranjos, todos pertencentes ao Regime 2, que apresenta melhores resultados de distribuição. Nota-se a velocidade mais constante pelo arranjo 16.

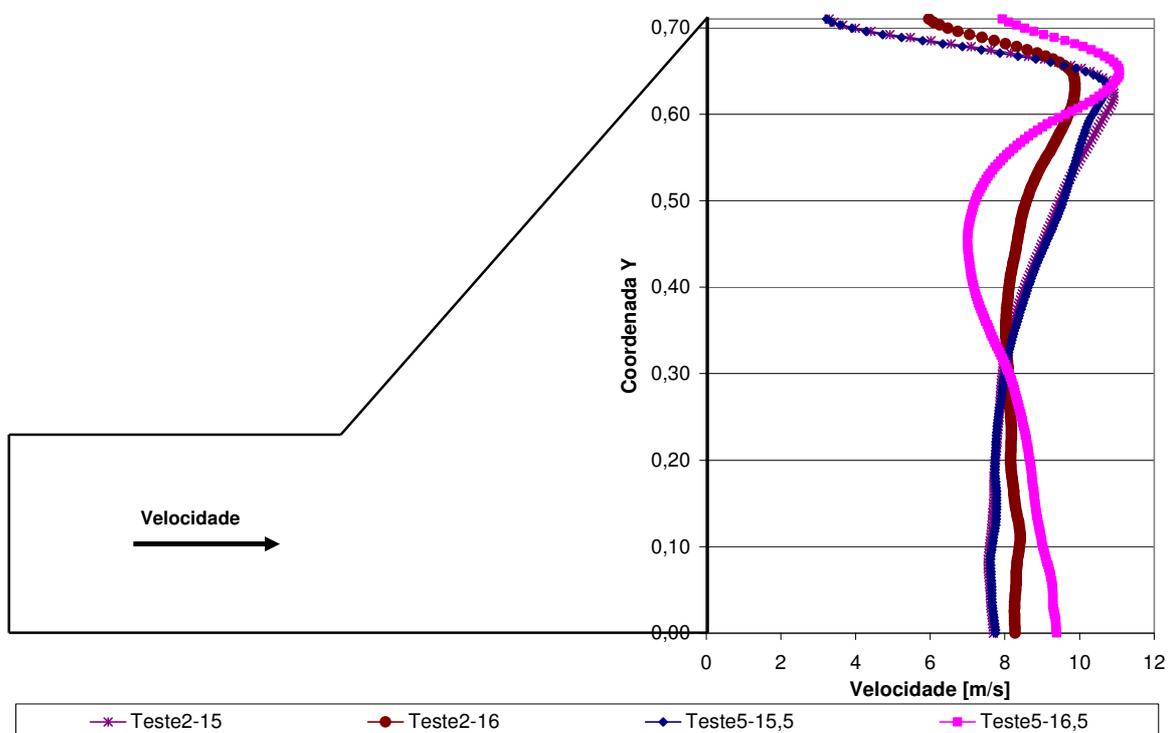


Figura 63. Perfil de velocidades – Regime 2 – Comparativo dos Testes 2 e 5.

4.7 Teste 6

Após a análise dos resultados dos Testes 2 e 4, foi elaborado o **Teste 6 (a e b)** com o intuito de analisar o impacto da utilização de um menor tamanho de orifício, conforme medidas dos artigos de Sahin & Ward-Smith (1987) e Sahin & Ward-Smith (1990). Com os arranjos 15 e 16, onde foram obtidos os melhores resultados dos Testes 2 e 4, foram criadas novas geometrias com orifícios de 0,006 m e 0,00635 m para placas de porosidade 0,5 e 0,58 respectivamente. Embora reconhecido que maior esforço computacional seria requerido, devido à malha de elementos de menor tamanho e, em consequência em maior número, este teste foi realizado com sucesso e foco nos arranjos de resultados ótimos.

Os valores de C.V. nas posições S2 e S4 (início e final da zona de tratamento), bem como o valor médio entre estas duas posições, são mostrados na **Figura 64**.

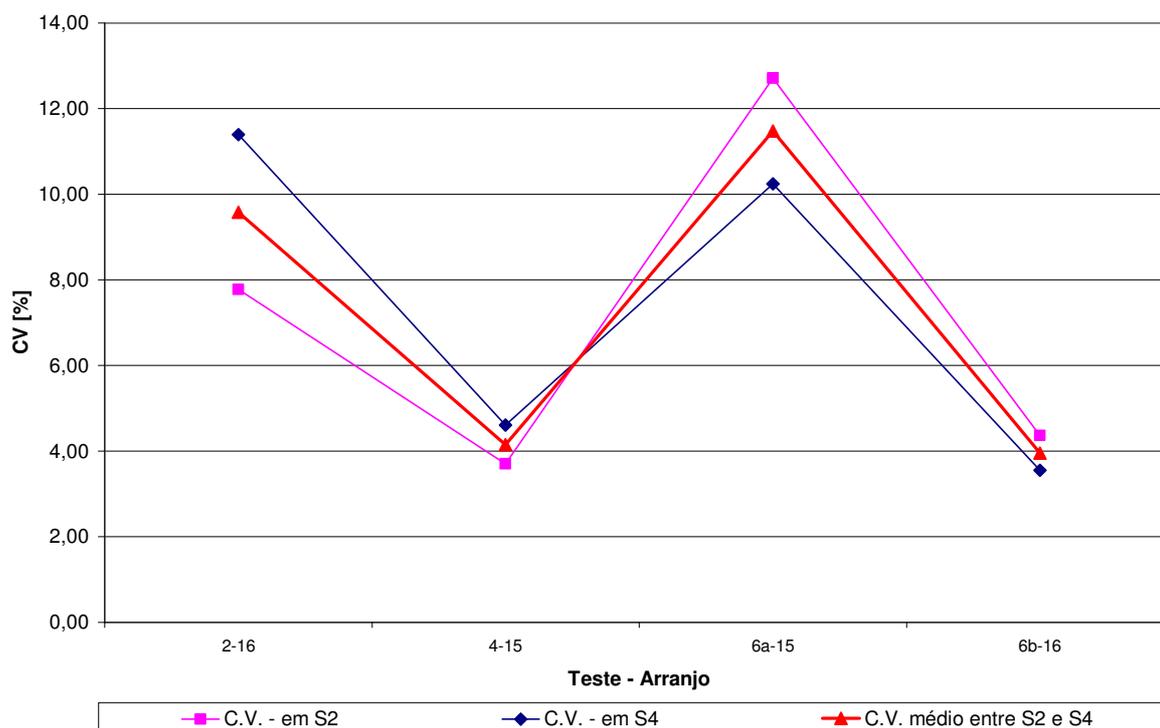


Figura 64. Valores de *C.V.* nas posições S2 e S4, e *C.V.* médio para estas duas posições16 – Comparativo dos Testes 2, 4 e 6.

Observa-se que o melhor arranjo, em termos de distribuição de gases, entre os quatro comparados, é o arranjo 16 do Teste 6b, com a placa AA uma posição antes do final do difusor e a placa BB uma posição após o início do difusor, com os furos de tamanho semelhante ao dos artigos pesquisados (0,006 m). A **Figura 65** apresenta o perfil de velocidades dos quatro arranjos, todos pertencentes ao Regime 2, que apresenta melhores resultados de distribuição. Nota-se a velocidade mais constante pelo arranjo 16, Teste 6b.

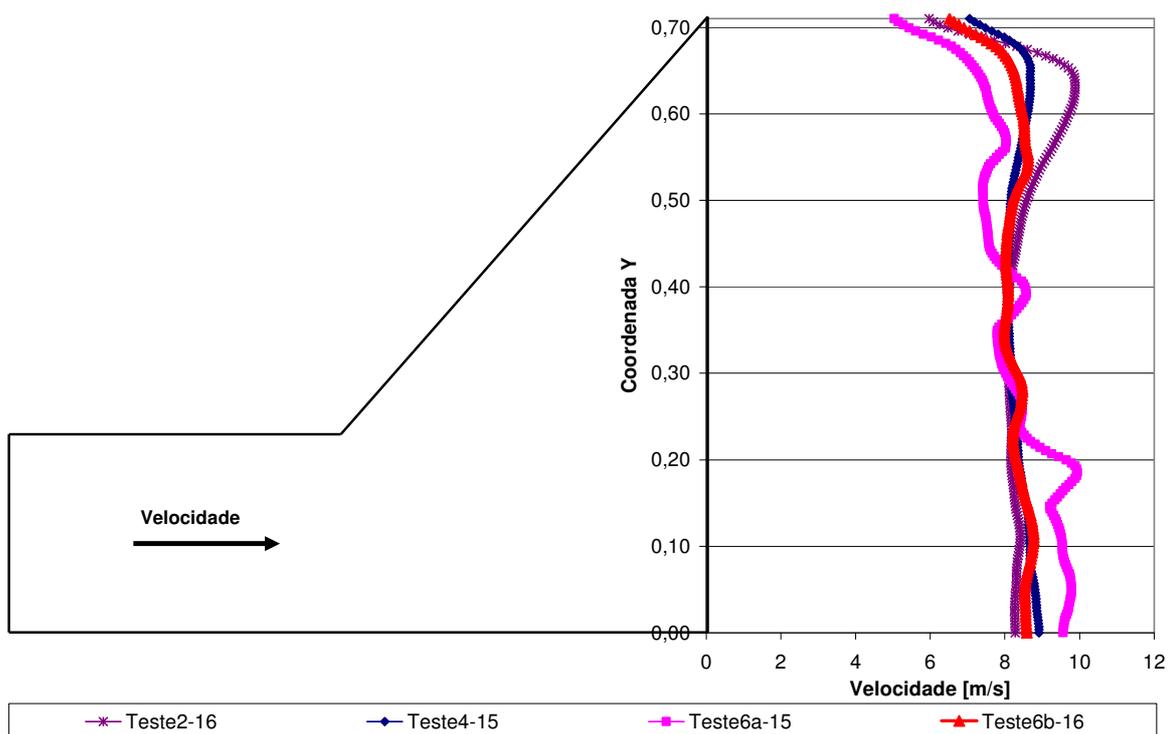


Figura 65. Perfil de velocidades – Regime 2 - Comparativo dos Testes 2, 4 e 6.

Foram calculados os valores de C_p para os arranjos 15 e 16 estudados. A **Figura 66**, mostra os valores de C_p pelos modelos CFD dos testes 6a e 6b, em comparação com os valores já obtidos dos arranjos 16 e 15 dos Testes 2 e 4 respectivamente. Nota-se o maior valor de C_p , ou seja, maior perda de carga, para o arranjo de melhor distribuição de gases, arranjo 16, Teste 6b.

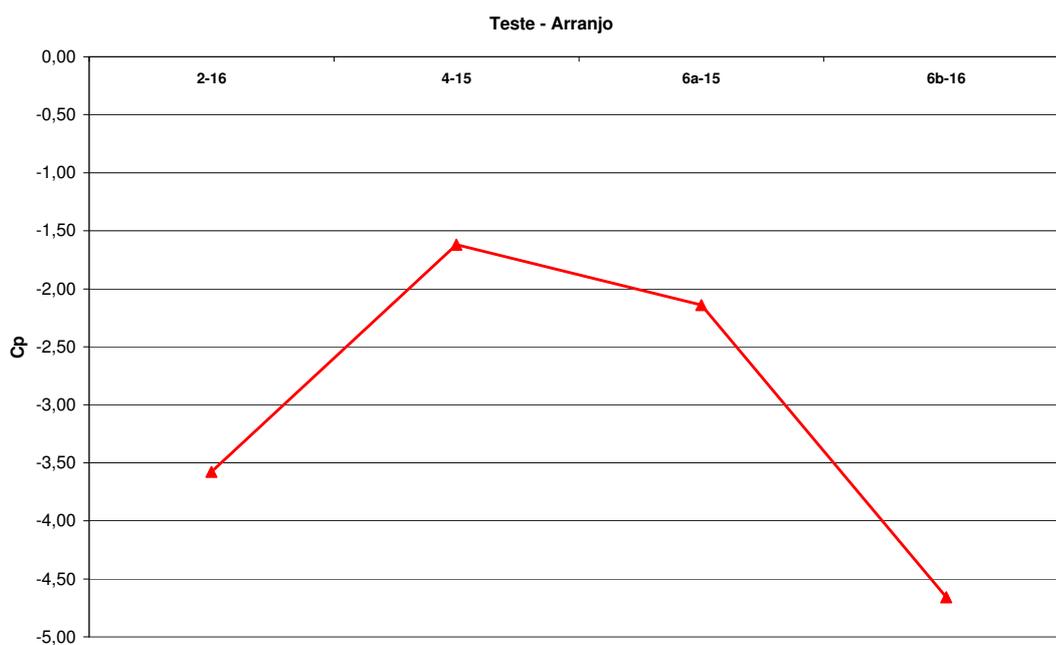


Figura 66. Valores C_p de para os arranjos 15 e 16 – Comparativo dos Testes 2, 4 e 6.

4.8 Teste 7

Observando-se principalmente os resultados dos Testes 2 e 3 (ver **Tabela 11** do **Anexo 1**), pôde-se notar que o *C.V.* na posição S4, saída da zona de tratamento, apresenta-se, na maioria dos casos, maior que o *C.V.* na posição S2, entrada da zona de tratamento. Devido a estes resultados e seguindo uma prática comum nas instalações atuais, foram desenvolvidos modelos com placas perfuradas no difusor de saída, no intuito de melhorar os resultados de *C.V.* na posição S4 e, com isso melhorar a distribuição de gases no interior do PE de uma forma geral.

Os arranjos estudados neste teste corresponderam a arranjos semelhantes aos do Teste 2, porém com uma placa perfurada de porosidade 0,5 e orifícios de 0,02 m na saída da zona de tratamento. A **Figura 67** ilustra o perfil de velocidades obtido para um dos arranjos, com placa perfurada na saída, linhas de fluxo e indicação de valores de velocidade em cores.

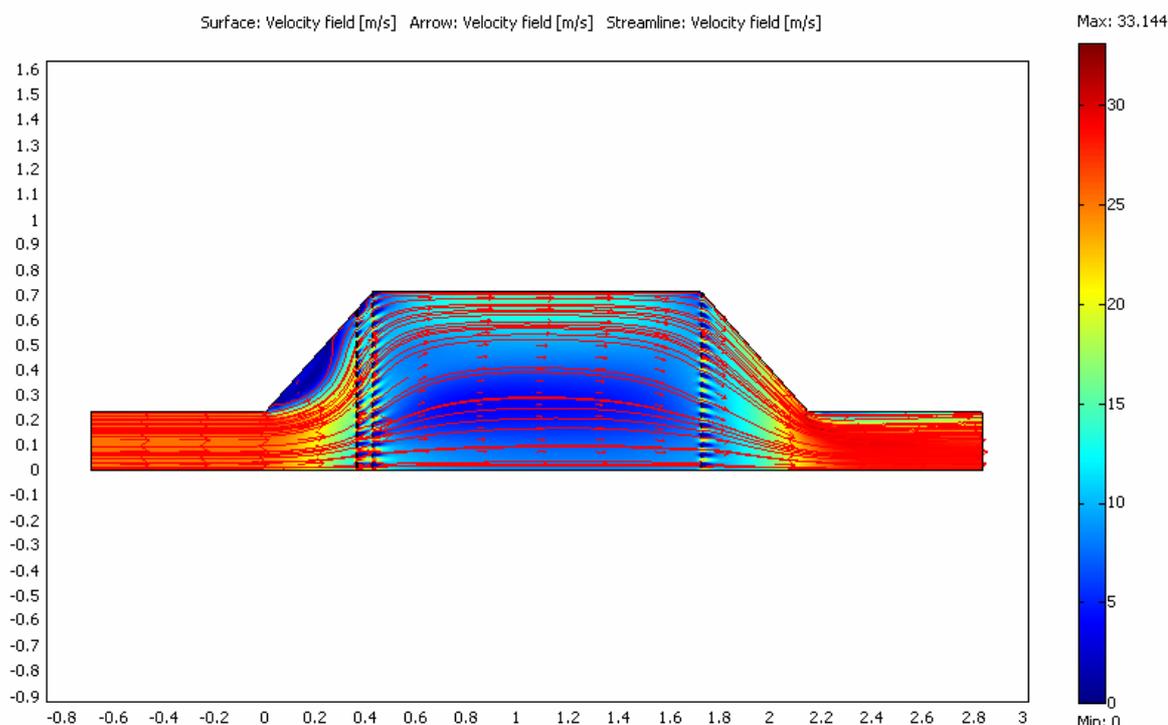


Figura 67. Arranjo 02 – Teste 7 – perfil de velocidades com instalação de placa na saída.

A **Tabela 10** apresenta o resumo de resultados de *C.V.* obtidos com a instalação da nova placa. Nesta mesma tabela, compara-se os resultados do Teste 7 com os resultados do Teste 2. Nota-se que os resultados foram positivos quando se analisam as diferenças, antes e após a instalação da placa, de *C.V.* em S4 e *C.V.* médio entre S2 e S4. Os dados em **negrito** destacam os dados de diferença de *C.V.* onde houve melhora na distribuição de gases (valores positivos). Os resultados positivos chegaram a 4,2% e compuseram uma média geral de ganho de 1,19%.

Vale lembrar que o final da zona de tratamento (último campo) é a região onde o material particulado tem a última chance de ser retirado da corrente gasosa, antes de ser jogado na atmosfera. Por isso, qualquer ganho em termos de eficiência de distribuição de fluxo nesta região pode ser significativo.

Tabela 10 - Resumo de resultados do Teste 7 e comparativo com o Teste 2.

RESUMO DE RESULTADOS - TESTE 7					COMPARATIVO: TESTE 7 COM TESTE 2					
Teste-Arranjo	CV em S1	CV em S2	CV em S3	CV em S4	CRITÉRIO ANÁLISE CV Médio S2 e S4	Teste-Arranjo	CV em S4 Teste 2	Diferença CV em S4 Teste 2 - 7	CV Médio S2 e S4 Teste 2	Diferença CV médio Teste 2 - 7
	%	%	%	%	%		%	%	%	%
7-01	0,45	22,11	40,53	27,91	25,01	2-01	31,90	3,99	28,99	3,98
7-02	0,44	19,39	36,78	24,45	21,92	2-02	26,55	2,10	23,47	1,55
7-03	0,45	15,34	31,35	19,88	17,61	2-03	20,57	0,69	18,32	0,71
7-04	0,43	12,04	27,60	17,00	14,52	2-04	16,93	-0,07	15,30	0,79
7-05	0,43	12,38	26,21	15,75	14,06	2-05	15,06	-0,68	13,94	-0,12
7-06	0,42	7,90	24,10	15,09	11,50	2-06	14,66	-0,43	11,58	0,09
7-07	0,50	24,12	30,57	23,19	23,65	2-07	23,47	0,27	24,54	0,89
7-12	0,45	27,45	39,31	26,74	27,09	2-12	28,75	2,01	28,66	1,57
7-13	0,42	15,95	30,27	18,79	17,37	2-13	19,44	0,66	18,17	0,80
7-14	0,43	11,61	24,80	14,77	13,19	2-14	14,38	-0,38	13,14	-0,04
7-15	0,42	14,46	23,25	13,55	14,00	2-15	13,09	-0,45	14,59	0,59
7-16	0,41	7,67	20,76	12,06	9,87	2-16	11,39	-0,67	9,58	-0,28
7-17	0,50	22,43	27,55	20,07	21,25	2-17	20,19	0,12	21,37	0,12
7-23	0,43	28,25	36,71	24,21	26,23	2-23	25,75	1,54	28,27	2,04
7-24	0,43	11,95	26,07	15,58	13,77	2-24	16,03	0,45	15,11	1,35
7-25	0,39	11,20	24,71	14,26	12,73	2-25	14,93	0,67	14,67	1,95
7-26	0,42	6,94	20,77	11,53	9,23	2-26	11,30	-0,23	10,57	1,34
7-27	0,49	22,87	25,62	18,11	20,49	2-27	22,14	4,02	24,70	4,21
							MÉDIA	0,76	MÉDIA	1,19

De acordo com os resultados, pode-se considerar como uma boa prática a instalação de uma placa perfurada na saída da zona de tratamento.

Nota-se, no entanto, que o arranjo 26 foi o que apresentou melhor resultado de distribuição de gases para o Teste 7. Este resultado difere daquele apresentado pelo Teste 2 e por todos os outros testes que confirmaram o arranjo 16 como o melhor. Observa-se também que o arranjo 16 não apresentou melhoria do C.V. em S4 ou do C.V. médio entre S2 e S4 com a instalação da nova placa.

De uma forma geral, verifica-se que os arranjos pertencentes ao Regime 2, que já apresentavam bons resultados no Teste 2 não apresentaram melhoria. Enquanto isso, os demais arranjos, cuja distribuição de gases era muito deficiente, estes sim sofreram o maior impacto positivo com a instalação da nova placa.

4.9 Teste 8

Após a realização das simulações em 2D, também foram executadas simulações em 3D. O Teste 8 foi o primeiro teste realizado em 3D e, para que malhas mais simples fossem geradas, ou seja, um menor esforço computacional fosse necessário, as geometrias criadas foram baseadas na existência de um eixo de simetria horizontal e outro vertical nos modelos físicos estudados. Desta forma, a geometria do modelo equivale à quarta parte da geometria física descrita em publicações, como mostra o exemplo de arranjo da **Figura 68**.

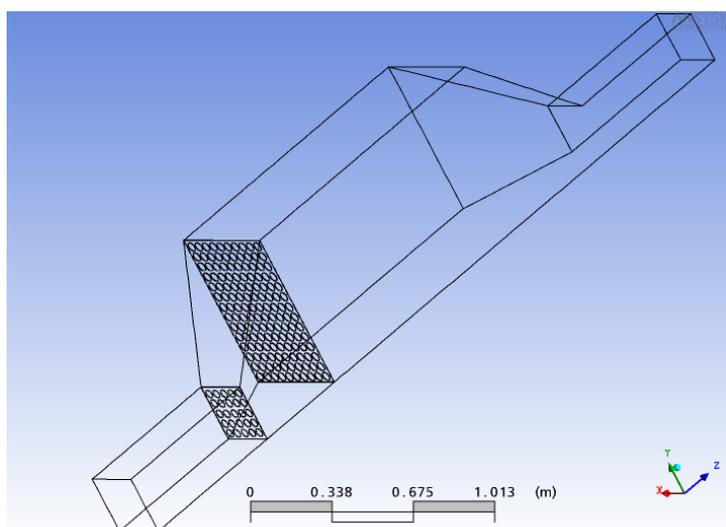


Figura 68. Geometria com eixo de simetria – Arranjo 07 – Teste8.

Como grande parte dos dados coletados nas publicações de referência é relativa aos arranjos tipo 0 (01, 02, 03, 04, 05, 06, 07) e arranjo 16 (que produziu o melhor resultado nos modelos físicos), estes foram os arranjos escolhidos para execução dos modelos em 3D. Além destes, com duas placas, arranjos sem nenhuma placa e com apenas uma placa no final do difusor também foram testados.

As **Figuras 69 e 70** ilustram a distribuição de velocidades por meio de linhas de fluxo para os arranjos sem placa (arranjo NN) e com apenas uma placa perfurada de porosidade 0,5 na posição 0, no final do difusor (arranjo 0N). Nota-se a concentração do fluxo na parte central e a forte recirculação que ocorre na zona de tratamento devido à ausência de placas no difusor de entrada no arranjo NN. Verifica-se também pela simulação 0N, que a presença de apenas uma placa no final do difusor não é suficiente para obtenção de uniformidade de fluxo.

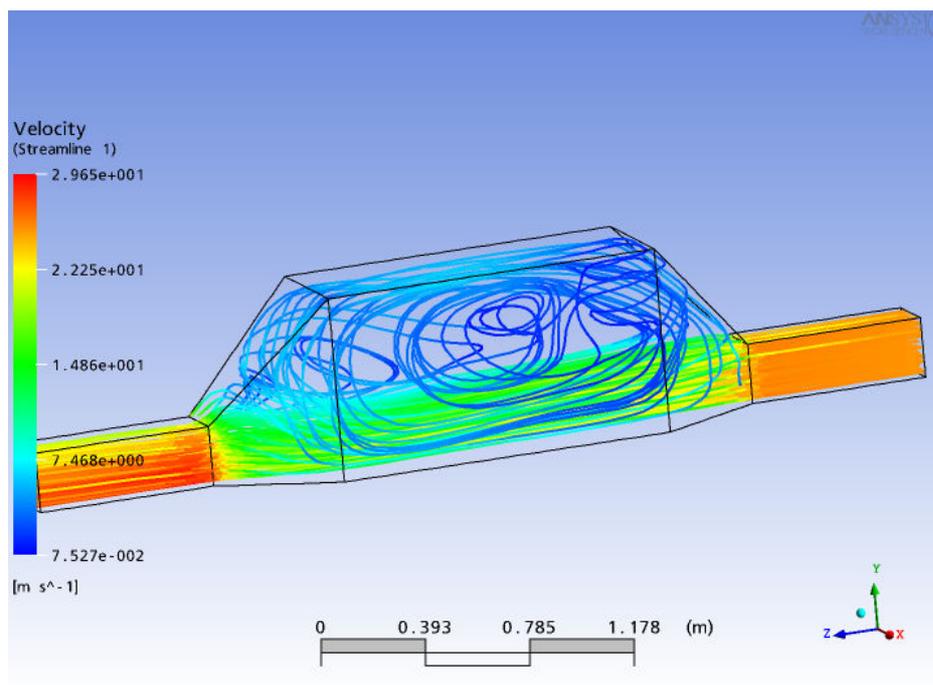


Figura 69. Linhas de fluxo representando a velocidade para o arranjo NN – Teste 8.

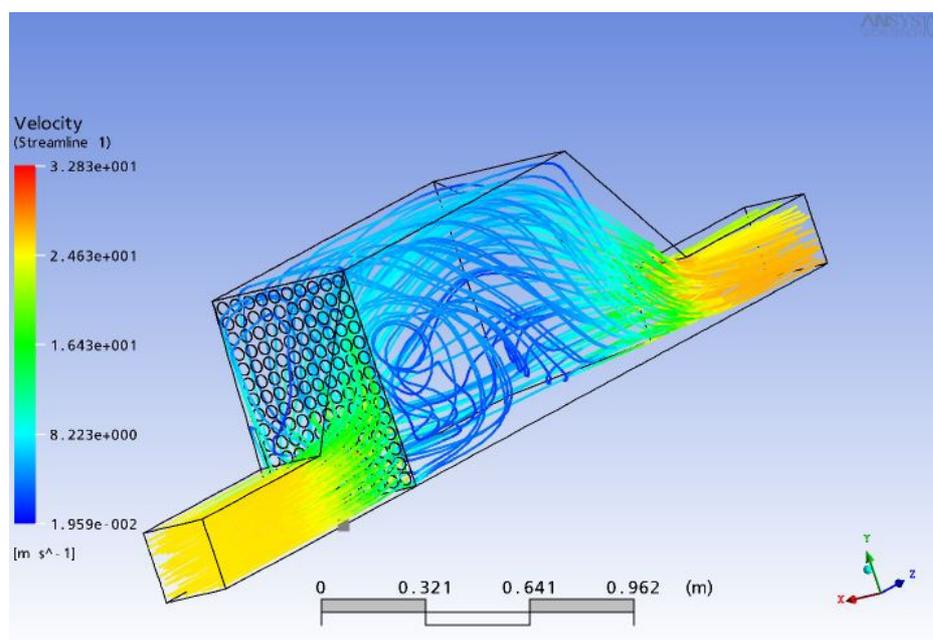


Figura 70. Linhas de fluxo representando a velocidade para o arranjo 0N – Teste 8.

De forma semelhante aos modelos em 2D, foram calculados os valores de C_p para os modelos com arranjo tipo 0 executados, utilizando-se a **Equação 36**. A **Figura 71**, mostra os valores de C_p pelos modelos CFD em 3D com eixo de simetria, em comparação com os valores já obtidos em 2D (Teste 2) e valores experimentais obtidos nas publicações de Sahin & Ward-Smith (1987) para os mesmos arranjos.

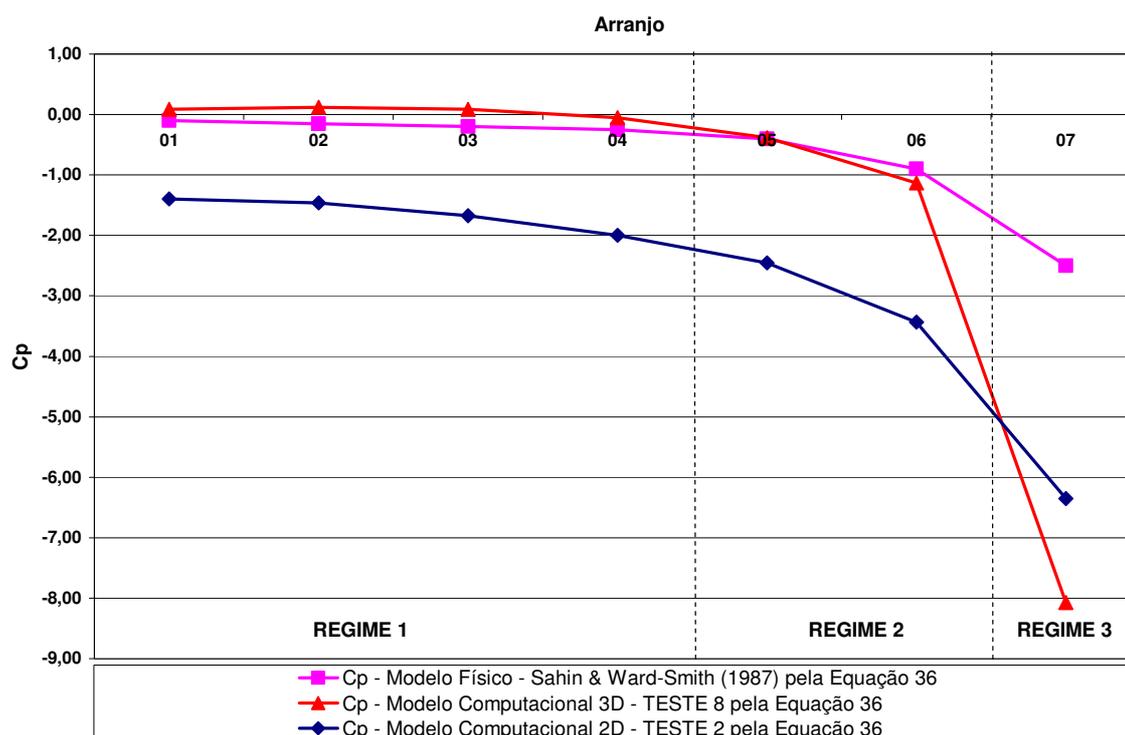


Figura 71. Valores C_p de para os arranjos tipo 0 – Comparativo dos Testes 8, 2 e dados experimentais publicados por Sahin & Ward-Smith (1987).

Verifica-se que, da mesma forma como ocorrido nas simulações em 2D, pôde-se observar também em modelos 3D, a mesma divisão em regimes, de acordo com o arranjo de placas: Regime 1, com menor perda de carga; Regime 2 com perda de carga média; Regime 3 com sensível aumento da perda de carga.

Em relação aos valores de C_p experimentais, publicados por Sahin & Ward-Smith (1987), o modelo em 3D com eixo de simetria, de uma forma geral, se aproxima mais destes valores do que aqueles obtidos por simulações em 2D. Todavia, o valor de C_p referente ao arranjo 07 apresenta um aumento mais significativo do que os dados experimentais publicados e o modelo 2D do Teste 2 (ver **Figura 71**).

A **Figura 72** apresenta os resultados de $C.V.$ nas posições S1, S2, S3 e S4, bem como o valor médio entre S2 e S4, para todos os arranjos modelados no Teste 8. Observa-se que, ao contrário dos modelos em 2D e dados publicados por Sahin & Ward-Smith (1987) o arranjo 16 não apresentou os melhores resultados de distribuição de velocidades. Para este teste, o menor valor de $C.V.$ médio entre S2 e S4 foi apresentado pelo arranjo 06. A **Figura 73** mostra os perfis de velocidade bastante homogêneos obtidos com o arranjo 06 nas posições S1 (duto de entrada), S2 (início da zona de tratamento), S3 (meio da zona de tratamento) e S4 (final da zona de tratamento).

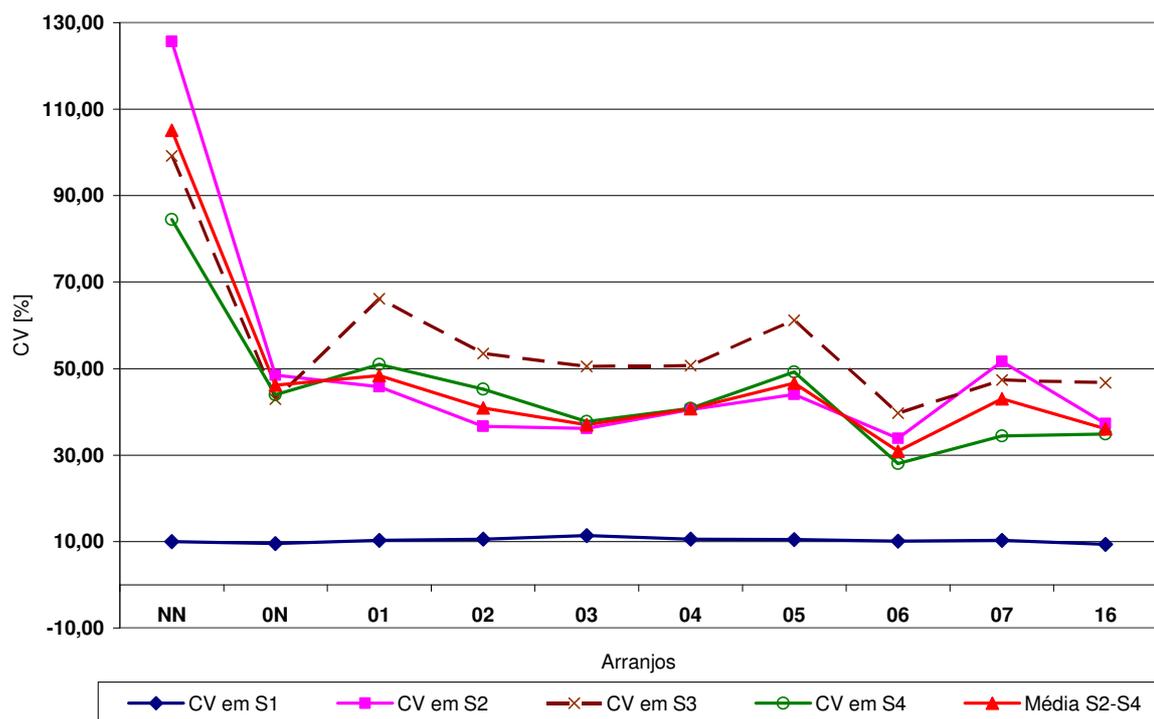


Figura 72. Valores de C.V. nas posições S1, S2, S3, S4, e C.V. médio para as posições S2 e S4 – Teste 8.

Nota-se também pela **Figura 72** que os valores de C.V. calculados apresentam valores bastante superiores aos valores estimados em 2D e apresentados nas publicações. Este fato pode estar ligado à utilização de orifícios de diâmetro bastante superior aos experimentos físicos e modelos em 2D.

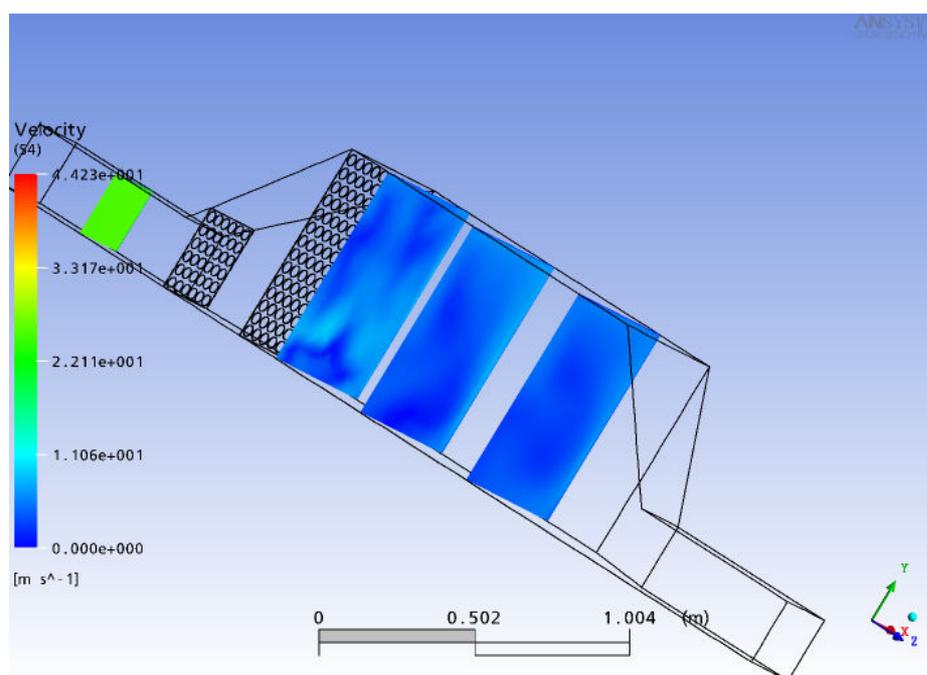


Figura 73. Perfis de velocidade nas posições S1, S2, S3, S4 – arranjo 06 – Teste 8.

4.10 Teste 9

Após as investigações do Teste 8, foi realizado novo teste com a geometria completa do difusor de entrada, zona de tratamento e difusor de saída, sem a utilização de superfícies de simetria. Os mesmos arranjos simulados no Teste 8 foram testados de forma completa no Teste 9. Porém, devido ao maior número de elementos gerados para a geometria completa, foi necessário o ajuste de parâmetro de geração de malhas e tamanho dos orifícios para que fosse possível a convergência do modelo como já ilustrado na **Tabela 8**.

A distribuição de velocidades no arranjo NN, ou seja, sem nenhuma placa perfurada instalada no difusor de entrada, é ilustrada por linhas de fluxo na **Figura 74**. Da mesma forma como ocorrido nas simulações em 2D e 3D do Teste 8, observa-se a grande recirculação proveniente da não instalação dos dispositivos de distribuição de gases. Nota-se que grande parte do fluxo passa diretamente pela região central da zona de tratamento, sem se difundir pela região onde estaria o campo elétrico para coleta de material particulado. Desta forma é possível entender a redução do rendimento do PE em função de uma má distribuição de gases.

A **Figura 75** mostra o impacto da instalação de apenas uma placa perfurada no final do difusor de entrada (arranjo 0N). Observa-se que as linhas de fluxo se tornam melhor distribuídas embora, pela **Figura 76**, possa se observar ainda a concentração não desejável de fluxo na região central.

As **Figuras 77 a 80** mostram os perfis de velocidade, nas posições S1, S2, S3 e S4, obtidos para cada arranjo tipo 0 estudado e para o arranjo 16, que apresentou os melhores resultados segundo os experimentos físicos publicados e os testes em 2D realizados no presente trabalho. Comparando-se estas figuras com os resultados publicados apresentados na **Figura 20**, observa-se: a tendência de maiores velocidades no centro na posição S2; redução da velocidade no centro e aumento da velocidade próximo à parede na posição S3; aumento de velocidade na região central na posição S4, se comparada com posição S3.

É importante observar que as **Figuras 77, 78 e 79** estão divididas por tipo de regime:

- Regime 1, com menor perda de carga, corresponde aos arranjos 01, 02, 03 e 04; nota-se que a velocidade se concentra próximo à parede e o centro da zona de tratamento apresenta menor velocidade;
- Regime 2 com perda de carga média, corresponde aos arranjos 05 e 06; verifica-se uma melhoria na distribuição dos gases, que se torna menos concentrada nas paredes;
- Regime 3 com sensível aumento da perda de carga, corresponde ao arranjo 07; apesar da maior perda de carga, começa a haver um aumento da velocidade no centro.

Salienta-se que as observações expostas acima já haviam sido verificadas no Teste 2 em 2D (ver **Figuras 50 a 52**), embora não de forma completa como agora apresentado em 3D. Com o intuito de enriquecer a apresentação destes resultados, são apresentadas as **Figuras 81 e 82**. Estas figuras mostram o perfil de velocidades na posição S3 (centro da zona de tratamento) em alguns arranjos tipo 0 (03, 04, 05, 06 e 07). A intenção aqui é comparar as os perfis obtidos por simulação computacional com as figuras apresentadas por Sahin & Ward-Smith (1990).

Nota-se, por comparação com a **Figura 21**, extraída da literatura e já apresentada neste trabalho, que de fato há concentração de velocidades próximo às paredes para os arranjos classificados como Regime 1 e, à medida em que afasta-se a placa BB da placa AA em direção a montante, esta concentração nas paredes diminui. No Regime 2 são encontrados os melhores resultados em termos de uniformidade. No Regime 3, como mostrado pela **Figura 82** há uma “inversão” do ocorrido para o Regime 1: a velocidade passa a se concentrar no centro e apresentando um perfil em “forma de cruz”.

É interessante notar também que a concentração de velocidades no centro ocorrida para o arranjo 07 é muito semelhante à concentração observada no arranjo 0N, com apenas uma placa perfurada no final do difusor (ver **Figuras 76 e 79**). Isto também já foi notado nos modelos em 2D apresentados no presente trabalho e por Sahin & Ward-Smith (1990).

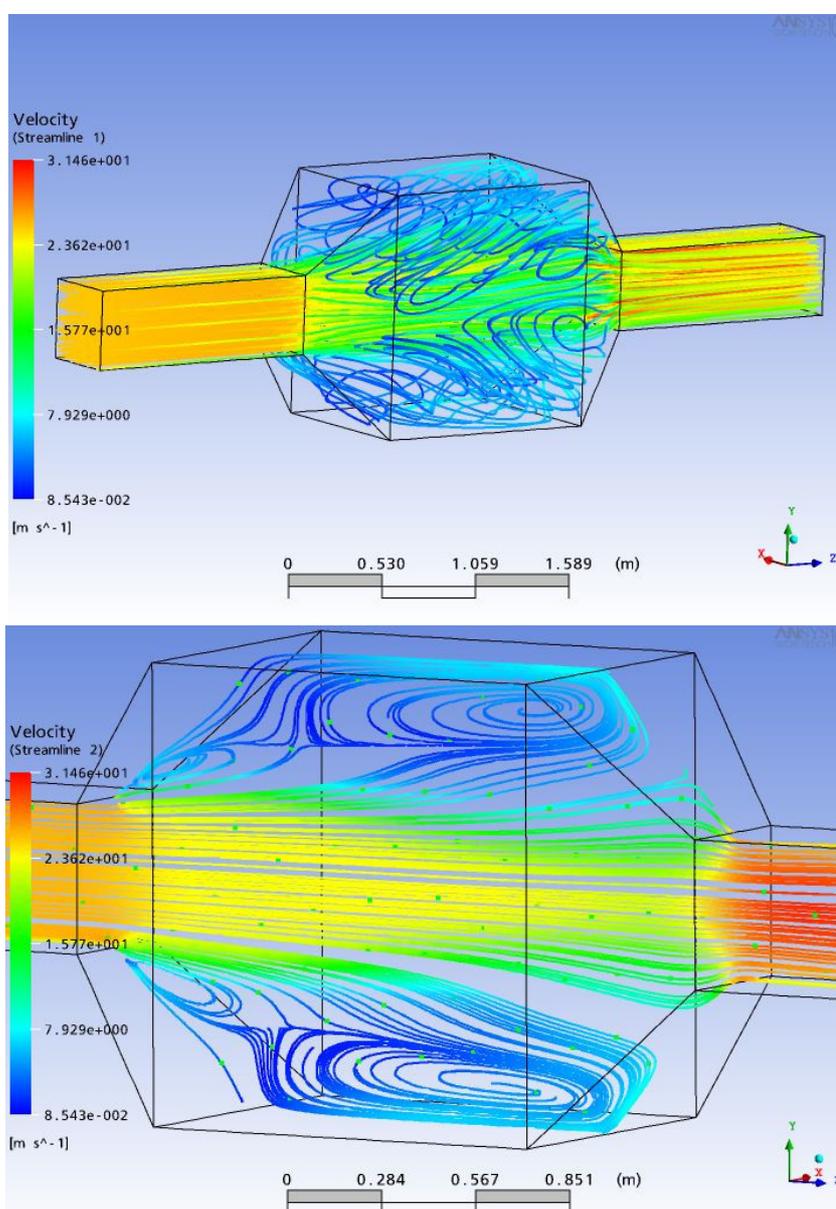


Figura 74. Linhas de fluxo representando a velocidade para o arranjo NN – Teste 9.

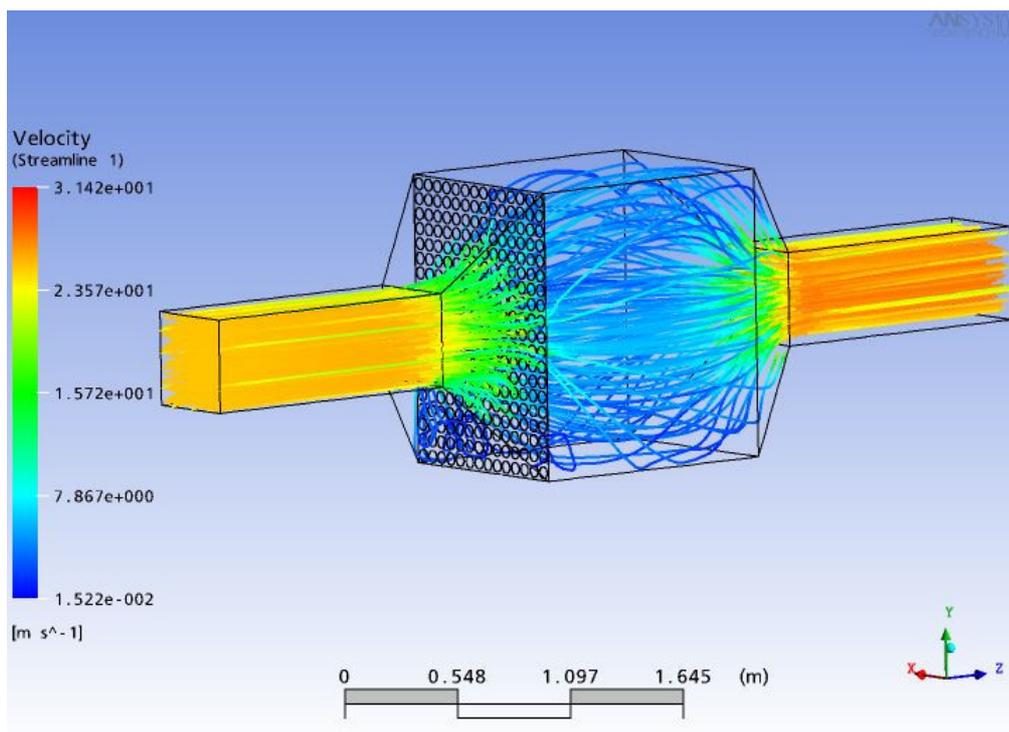


Figura 75. Linhas de fluxo representando a velocidade para o arranjo 0N, Teste 8.

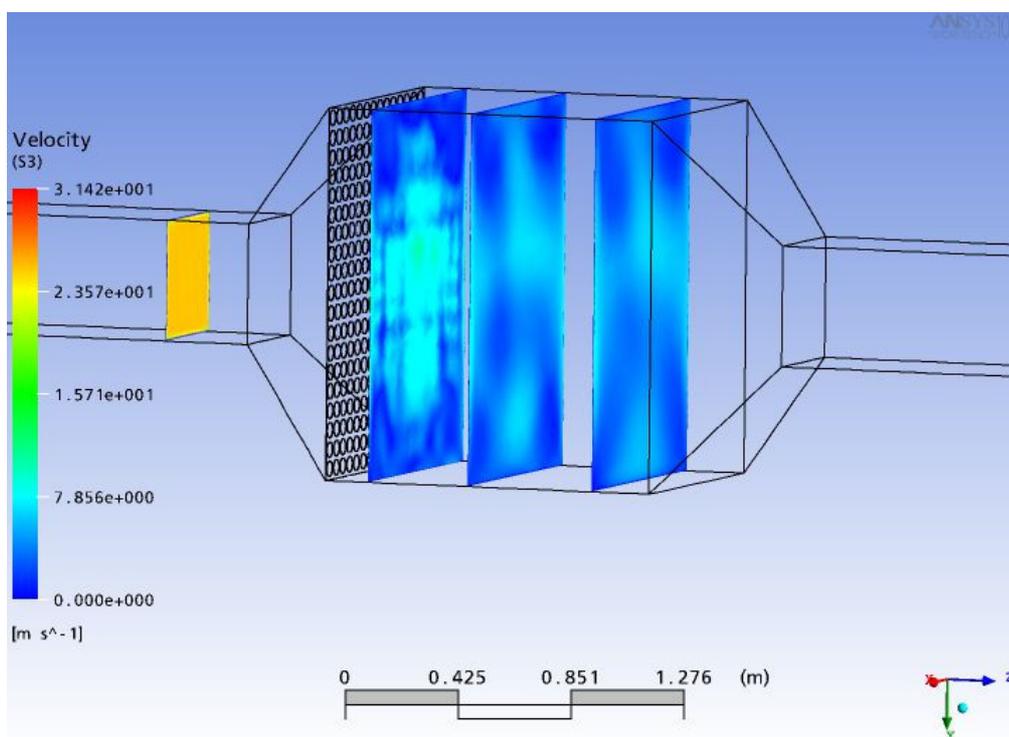


Figura 76. Perfis de velocidade nas posições S1, S2, S3, S4, arranjo 0N, Teste 9.

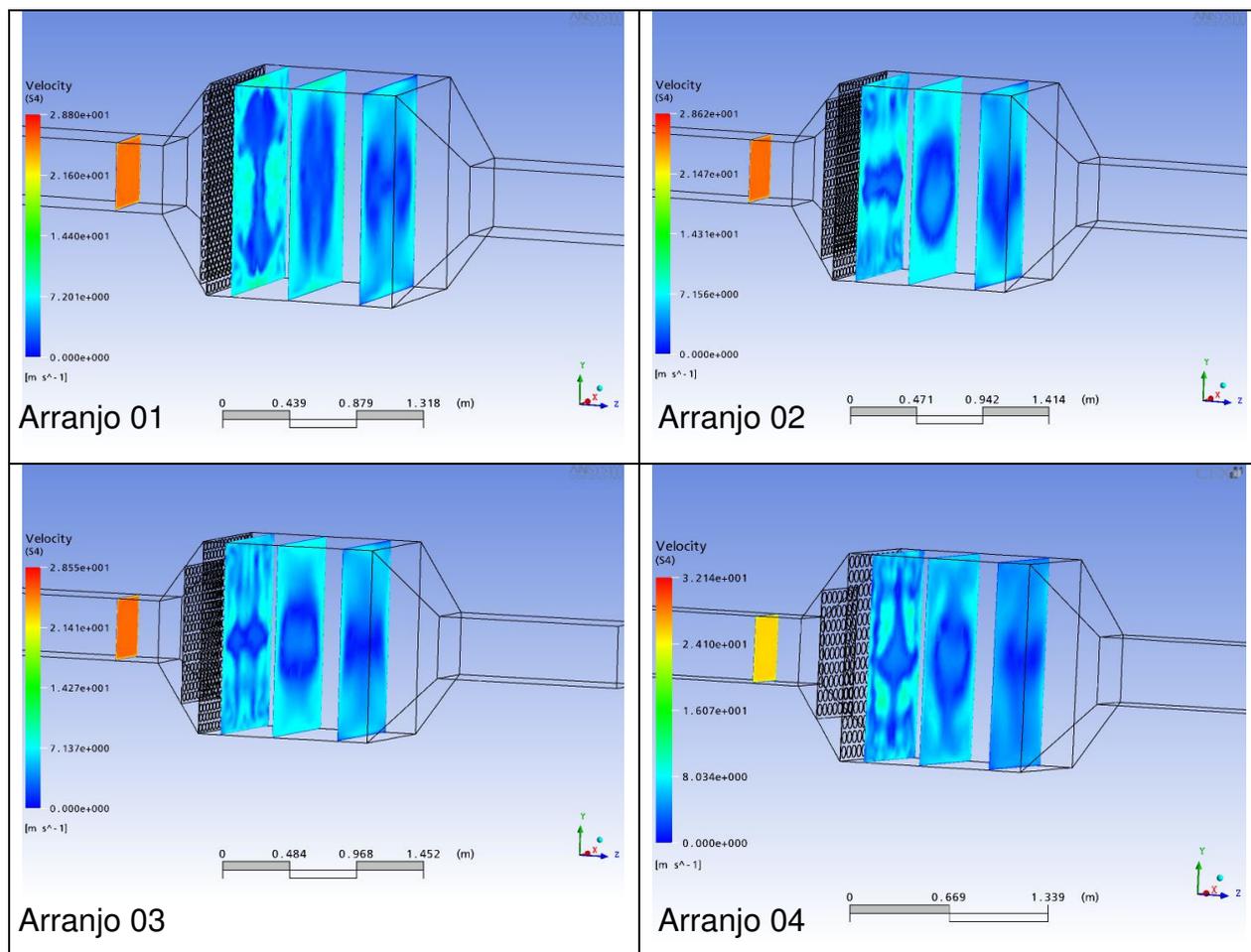


Figura 77. Perfis de velocidade nas posições S1, S2, S3, S4 – arranjos 01; 02; 03; 04 – Regime 1 – Teste 9.

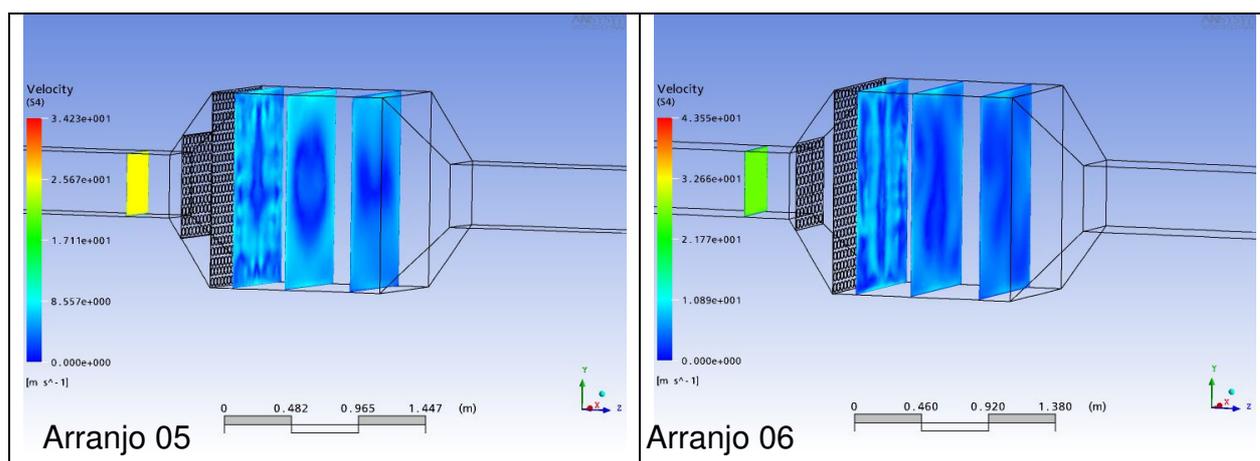


Figura 78. Perfis de velocidade nas posições S1, S2, S3, S4 – arranjos 05 e 06 – Regime 2 – Teste 9.

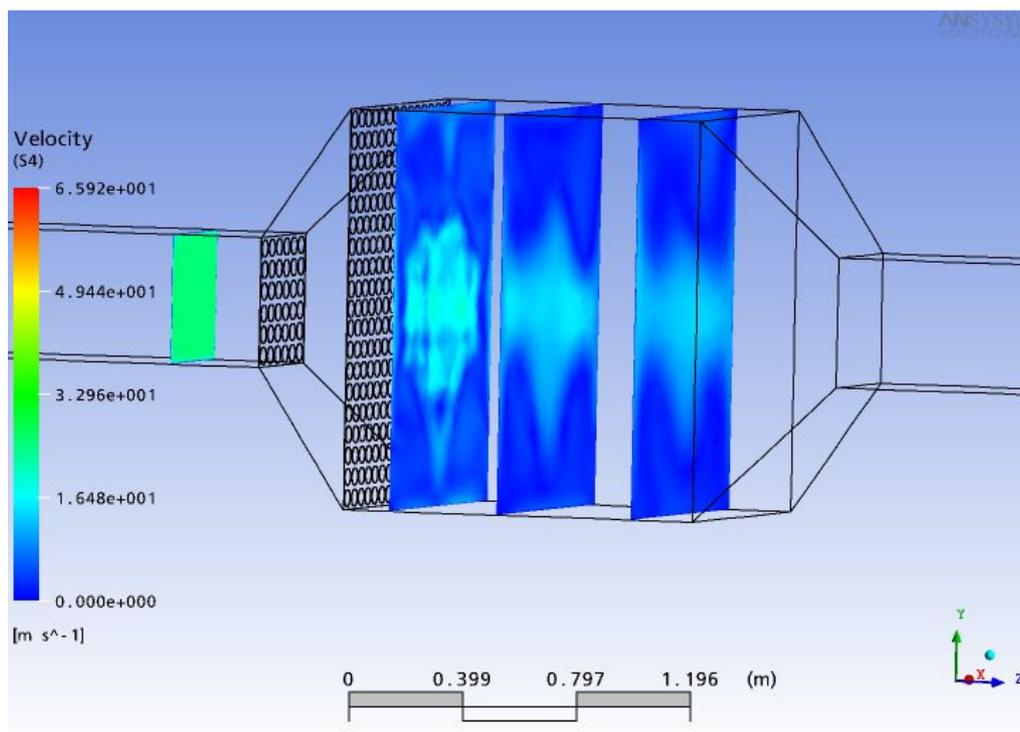


Figura 79. Perfis de velocidade nas posições S1, S2, S3, S4 – arranjo 07 – Regime 3 – Teste 9.

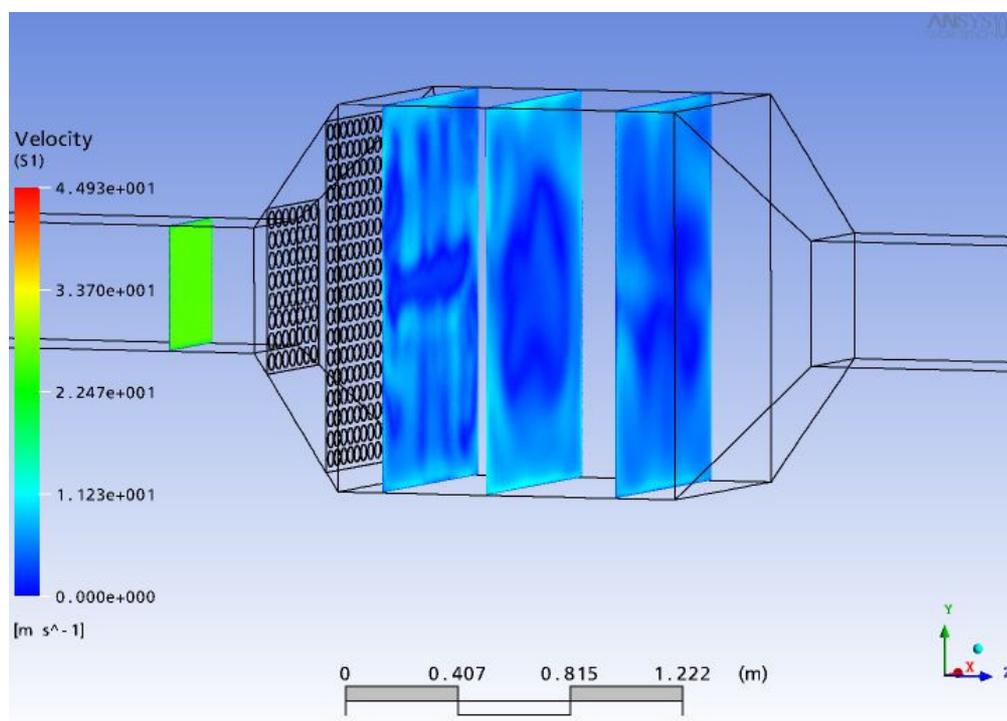


Figura 80. Perfis de velocidade nas posições S1, S2, S3, S4, arranjo 16, Teste 9.

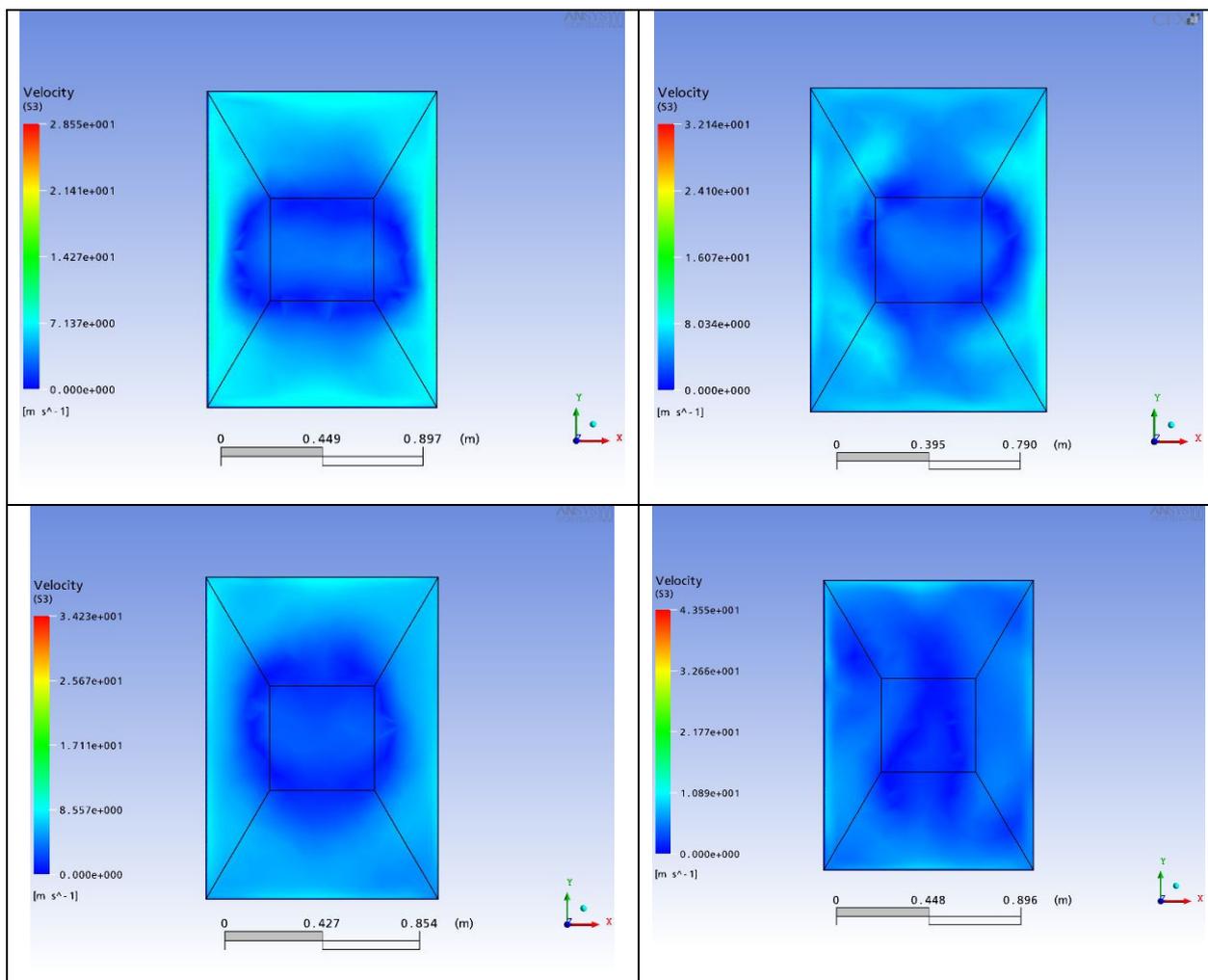


Figura 81. Perfis de velocidade na posição S3 – arranjos 03; 04; 05; 06 – Teste 9.

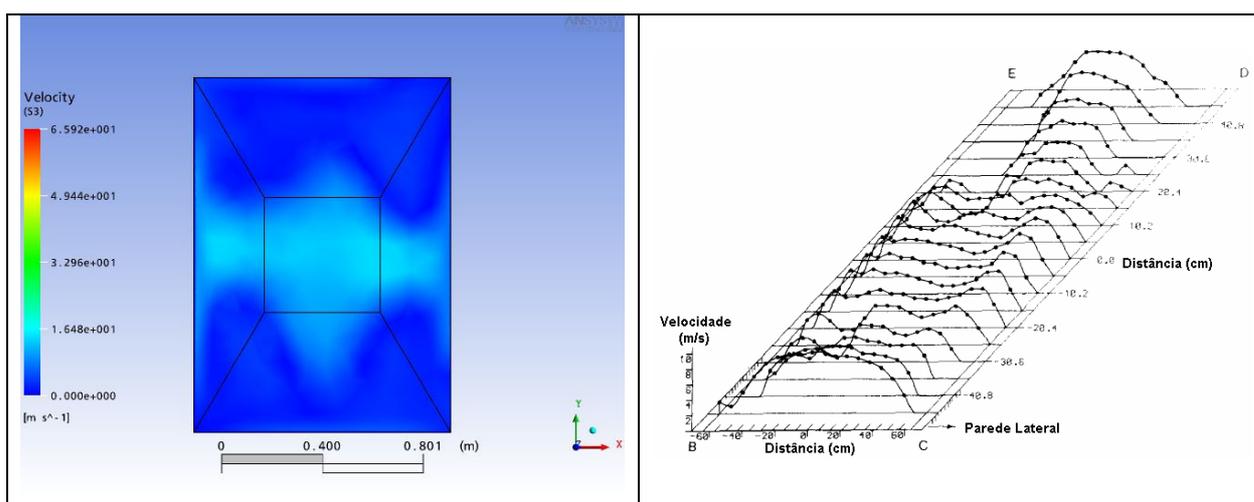


Figura 82. Distribuição de velocidades para arranjo 07 na posição S3 para o Teste 9 e experimento publicado (SAHIN; WARD-SMITH, 1990).

Os coeficientes de recuperação de pressão global do conjunto placas e difusor (C_p) para os diversos arranjos tipo 0 são apresentados na **Figura 83**. Nota-se a

semelhança do comportamento destes coeficientes com os resultados em 2D e 3D já apresentados nos Testes 2 e 8 respectivamente (ver também **Figura 71**). Em relação aos valores de C_p experimentais, publicados por Sahin & Ward-Smith (1987), o modelo em 3D completo, de uma forma geral, se aproxima mais destes valores do que aqueles obtidos por simulações em 2D.

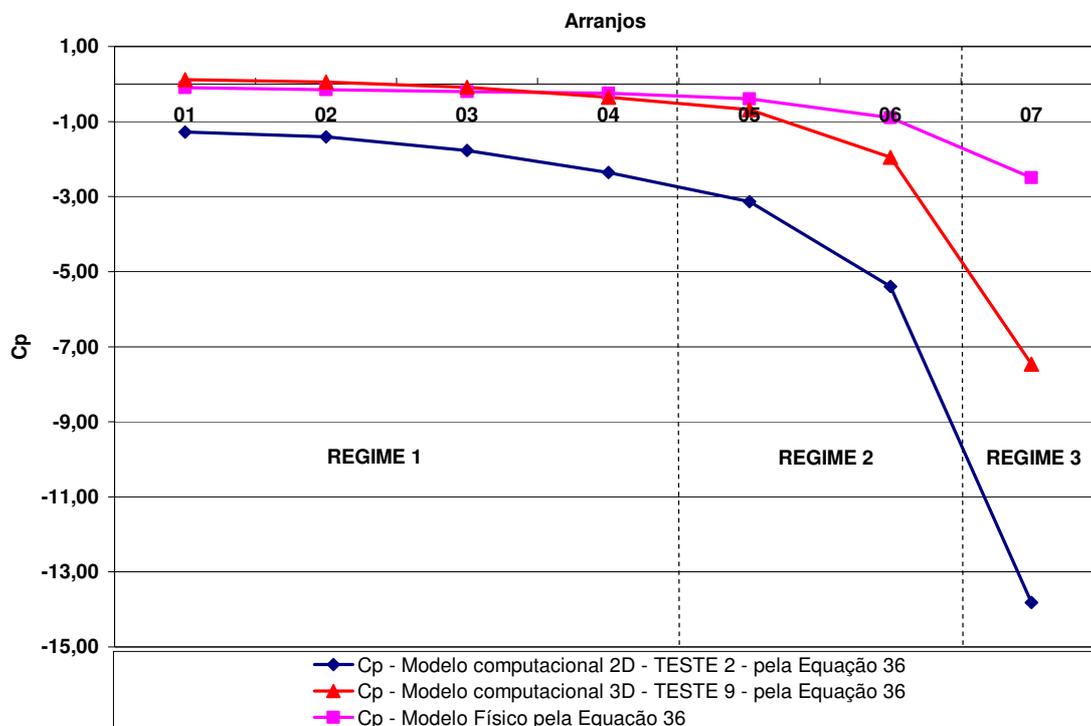


Figura 83. Valores C_p de para os arranjos tipo 0 – Comparativo dos Testes 9, 2 e dados experimentais publicados por Sahin & Ward-Smith (1987).

Por fim, é apresentado, na **Figura 84**, o gráfico de resultados de $C.V.$ nas posições S1, S2, S3 e S4, bem como o valor médio entre S2 e S4, para todos os arranjos modelados no Teste 9. Da mesma forma como ocorrido para o Teste 8, observa-se que, ao contrário dos modelos em 2D e dados publicados por Sahin & Ward-Smith (1987) o arranjo 16 não apresentou os melhores resultados de distribuição de velocidades. Para este teste, o menor valor de $C.V.$ médio entre S2 e S4 foi apresentado pelo arranjo 05.

A semelhança entre os melhores resultados encontrados nos modelos 3D e os demais resultados já apresentados (modelos em 2D executados no presente trabalho e os modelos experimentais publicados), que apontam o arranjo 16 como o de melhor distribuição, é o fato que os melhores resultados sempre estão entre os arranjos pertencentes ao Regime 2, com perda de carga média. Pode-se observar também que os valores de $C.V.$ em módulo são muito superiores aos valores experimentais e apresentados nos modelos 2D. A diferença entre os resultados pode estar aliada a alguns fatores como: tamanho dos orifícios utilizados em 3D para simplificação da malha de elementos finitos e a própria complexidade de refinamento devido às limitações computacionais.

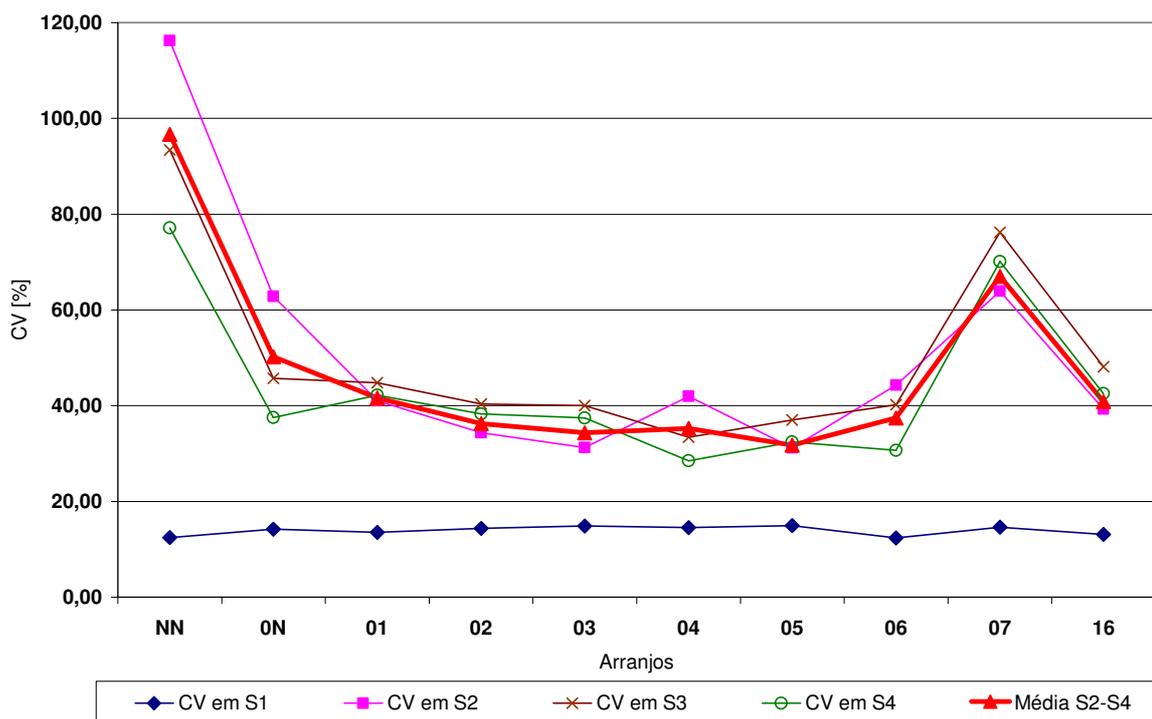


Figura 84. Valores de *C.V.* nas posições S1, S2, S3, S4, e *C.V.* médio para as posições S2 e S4 – Teste 9.

4.11 Discussão geral dos resultados

No Anexo 1, são apresentadas as **Tabelas 11 e 12**, com o resumo geral de todos os testes efetuados em 2D e 3D respectivamente. Dados de coeficientes de perda de carga e variação de velocidade são apresentados para todas as geometrias estudadas. O critério de uniformidade adotado para comparação e análise dos diversos arranjos foi aplicado caso a caso, como pode ser observado nas últimas colunas das tabelas: o valor médio de *C.V.* entre as posições S2 e S4.

Verifica-se, pelos resultados apresentados, que a uniformidade do fluxo no interior da zona de tratamento de um precipitador eletrostático, é função da porosidade das placas perfuradas presentes em seu difusor de entrada, do número e da localização das mesmas e do tamanho dos orifícios empregados na confecção das placas. Observou-se, que a maioria dos resultados obtidos é semelhante aos obtidos em modelos físicos apresentados por Sahin & Ward-Smith (1987) e Sahin & Ward-Smith (1990).

Observou-se claramente que, tanto em modelos físicos publicados quanto nos modelos computacionais executados, de acordo com o posicionamento das placas, pode ser feita uma divisão dos resultados de uniformidade de fluxo e perda de carga em três regimes distintos:

- Regime 1, onde a perda de carga é mínima, há maior velocidade próximo à parede e a uniformidade de fluxo não é satisfatória; neste regime as duas placas perfuradas encontram-se mais próximas;

- Regime 2, onde a perda de carga oferecida pelo arranjo é maior, porém perfis mais uniformes são obtidos na saída do difusor; as placas perfuradas estão mais distantes uma da outra em relação ao regime 1;
- Regime 3, que apresenta a maior perda de carga entre os três regimes, porém este aumento não representa ganho em uniformidade; as placas estão muito distantes uma da outra e recirculação de fluxo de forma acentuada entre as placas perfuradas; neste regime nota-se, pelos resultados das simulações, o aumento da velocidade na região central da zona de tratamento.

Esta divisão em regimes é observada sistematicamente, independente da porosidade das placas utilizadas e da realização em geometrias 2D ou 3D. Pelo concluído no regime 3, pode-se dizer que nem sempre o maior valor de perda de carga significa a melhor distribuição de fluxo.

Além disso, observou-se que é possível eliminar a baixa velocidade no centro da zona de tratamento do precipitador, movimentando-se a placa BB para montante, do Regime 1 para o Regime 3.

Para os Testes 0 a 6 em 2D, o melhor resultado de uniformidade encontrado utilizando-se apenas duas placas no difusor de entrada, corresponde ao arranjo 16 do Teste 6b (a placa menor BB localizada uma posição após o início do difusor e a maior AA, uma posição antes do final do difusor), com ambas as placas de porosidade $\beta = 0,50$ e com os furos de tamanho 0,006 m. Este resultado confirma os dados apresentados por Sahin & Ward-Smith (1987) e Sahin & Ward-Smith (1990).

Destaque especial deve ser atribuído aos resultados obtidos em 2D pelo Teste 4, com placas de porosidade 0,58 e orifícios 0,02 m, que foram melhores que aqueles obtidos no Teste 2, com porosidade 0,5 e orifícios 0,02 m. Nota-se a grande influência do tamanho dos orifícios utilizados no resultado final de uniformidade, visto que o melhor resultado obtido no Teste 6b, apresenta também porosidade 0,5, porém com orifícios menores (0,006 m).

O Teste 7 em 2D repetiu os arranjos executados pelo Teste 2, porém com a adição de uma placa perfurada no início do difusor de saída (final da zona de tratamento). De uma forma geral a uniformidade de fluxo melhorou com a instalação da nova placa, sobretudo para os arranjos que apresentavam distribuição deficiente. Todavia o melhor resultado obtido no Teste 7, que correspondeu ao arranjo 26, não superou os resultados obtidos anteriormente nos Testes 6a e 6b.

O melhor resultado de uniformidade de fluxo do Teste 8, em 3D com eixo de simetria, foi obtido pelo arranjo 06, com a placa AA (maior) fixa na posição 0, no final do difusor, e a placa BB (menor) instalada a montante, uma posição após o início do difusor. Assim como os resultados em 2D anteriores e os dados publicados, a melhor distribuição de fluxo é obtida por um posicionamento de placas pertencente aos arranjos classificados como Regime 2, de perda de carga média e maior uniformidade de fluxo.

Os testes em 3D com a geometria completa (Teste 9) também apresentaram resultados diferentes dos demais: o melhor arranjo em termos de distribuição de velocidades foi o arranjo 05, em que a placa AA (maior) está fixa na posição 0, no final do difusor, e a placa BB (menor) está duas posições após o início do difusor. Mais uma vez, um arranjo com perda de carga média (Regime 2).

É importante salientar que os resultados dos modelos em 3D foram obtidos através de geometrias e malhas simplificadas pelo uso de orifícios de maior diâmetro que os demais estudos. Esta simplificação, assim como o compromisso com a capacidade computacional disponível, pode ter grande influência sobre os resultados de uniformidade de fluxo. Para os Testes 1 e 6, foi observado que quanto menores os orifícios utilizados, maior a uniformidade de fluxo obtida.

Os resultados C_p apresentados pelos modelos em 3D (tanto com eixo de simetria, quanto completos), de uma forma geral, se aproximaram mais dos valores experimentais, publicados por Sahin & Ward-Smith (1987), do que aqueles obtidos por simulações em 2D.

Notou-se ainda que o perfil de velocidades conseguido com placas bem distantes uma da outra, no início e no final do difusor (arranjo 07), é semelhante ao uso de uma única placa perfurada no final do difusor (arranjo 0N). Ou seja, é como se a placa BB, no início do difusor, não atuasse para melhoria do fluxo. Nestes dois casos, a velocidade se concentra no centro, enquanto, nos cantos e paredes da zona de tratamento, há uma redução de fluxo.

Pelos resultados de $C.V.$ na posição S1 (duto de entrada reto) a velocidade é uniforme, independente da posição das placas. Este resultado é comprovado tanto nos modelos físicos da literatura quanto nos modelos computacionais realizados.

Os artigos estudados relatam a ocorrência de separação de fluxo (recirculação) na entrada do difusor quando a placa BB é posicionada mais a jusante do duto de entrada do difusor. Nos modelos CFD do presente trabalho, verifica-se o mesmo efeito e, além disso, nota-se também que, quando a distância entre as duas placas começa a aumentar, uma tendência de recirculação interna aumenta, assim como a perda de carga global do arranjo.

Vale ressaltar que o trabalho de modelagem computacional foi executado de forma gradativa, de modelos mais simples, em 2D, para modelos mais complexos em 3D. O refinamento dos resultados exigiu cada vez mais tempo e esforço computacional. Portanto, antes de se partir para experimentos físicos e modelos computacionais mais elaborados, a análise dos resultados obtidos em modelos mais simples pode levar a economia de tempo e dinheiro. Embora a técnica de CFD não elimine a execução de modelos físicos em alguns casos, com ela é possível racionalizar recursos ao encontrar geometrias otimizadas que poderão servir de ponto de partida para estudos mais complexos.

5 CONCLUSÕES

Por meio de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) foi avaliada a utilização de placas perfuradas no controle da distribuição de velocidades em um difusor típico de entrada de precipitadores eletrostáticos. Os modelos computacionais criados em duas e três dimensões (2D e 3D) apresentam geometria semelhante à dos modelos físicos realizados por Sahin & Ward-Smith (1987) e Sahin & Ward-Smith (1990).

Verificou-se que a uniformidade do fluxo é função da porosidade, do número, da localização das placas perfuradas no difusor, bem como do tamanho dos orifícios empregados na confecção das mesmas. De uma forma geral, pôde-se perceber que a uniformidade de fluxo apresentou melhores resultados com:

- utilização de duas placas perfuradas no difusor de entrada ao invés de uma única no final do difusor;
- posicionamento da placa AA próxima ao final do difusor (posições 0 ou 1) e da placa BB próxima ao início do difusor (posições 5 e 6);
- a redução do diâmetro dos orifícios;
- utilização de placas com porosidade $\beta = 0,5$;
- a instalação de uma terceira placa perfurada no início do difusor de saída da zona de tratamento;

Observou-se que a maioria dos resultados é semelhante aos obtidos em modelos físicos publicados:

- com relação à uniformidade de fluxo, os resultados em 2D foram os que mais se assemelharam aos resultados experimentais da literatura; o melhor resultado obtido em 2D foi apresentado pelo arranjo 16 (placa BB localizada uma posição após o início do difusor e placa AA, uma posição antes do final do difusor), com porosidade $\beta = 0,50$ e furos de tamanho 0,006 m;
- o melhor resultado de uniformidade em 3D utilizando-se eixos de simetria, ou seja um quarto da geometria completa, foi obtido pelo arranjo 06, com a placa AA fixa na posição 0, no final do difusor, e a placa BB instalada a montante, uma posição após o início do difusor;
- o teste em 3D com a geometria completa apresentou o arranjo 05 como melhor resultado de distribuição de velocidades, com a placa AA fixa na posição 0, e a placa BB, duas posições após o início do difusor;
- no que diz respeito aos resultados de perda de carga (valor de C_p em função o tipo de arranjo), as geometrias em 3D (tanto com eixo de simetria, quanto com a geometria completa) apresentaram resultados mais próximos aos obtidos em modelos físicos, se comparados aos modelos executados em 2D.

Sobre o presente trabalho, pode-se concluir ainda que:

- a) tanto para modelos 2D, quanto 3D, pode-se dividir os resultados de uniformidade de fluxo e perda de carga em três regimes distintos;
- b) em todos os testes, foi possível observar a maior concentração de velocidades próximo às paredes para o Regime 1 (placas mais próximas umas das outras, no fim do difusor);

- c) os melhores resultados de distribuição de fluxo foram obtidos pelos arranjos do Regime 2 (placas um pouco mais afastadas umas das outras);
- d) um abrupto aumento de perda de carga, com elevação da velocidade no centro foi observada para o Regime 3; neste regime a geometria apresenta placas o mais distante possível uma da outra (no início e no final do difusor) e observa-se de forma mais acentuada recirculação de fluxo entre as placas;
- e) a baixa velocidade no centro da zona de tratamento do precipitador pode ser eliminada movimentando-se a placa BB para montante, do Regime 1 para o Regime 3.
- f) nem sempre o maior valor de perda de carga significa a melhor distribuição de fluxo; quando a distância entre as duas placas começa a aumentar, uma tendência de recirculação interna aumenta, assim como a perda de carga global do arranjo; a recirculação excessiva prejudica a distribuição de fluxo;
- g) a qualidade e a precisão dos resultados dos testes em 3D foi influenciada pela utilização de geometrias com de orifícios maiores, geradas para obtenção de malhas mais simples;
- h) deve-se ter especial cuidado na geração de malhas de elementos finitos cuja geometria apresente regiões de dimensões relativas muito diferentes: grandes, como dutos, e pequenas, como os orifícios das placas perfuradas;
- i) com a técnica de CFD é possível racionalizar recursos ao encontrar geometrias otimizadas que poderão servir de ponto de partida para estudos mais complexos ou modelos físicos; neste sentido as simulações em 2D se mostraram interessantes para execução de um maior número de geometrias de forma rápida e simples; as geometrias em 3D, também podem ser executadas para aprimoramento dos dados e melhor visualização do fluxo.

Como sugestões para continuidade deste trabalho, estudos de aprimoramento dos resultados em 3D podem ser executados, tais como:

- estudo de geometrias com orifícios menores e malhas com um número maior de elementos;
- simulações variando-se a porosidade das placas para $\beta = 0,58$ e $\beta = 0,4$, conforme executado em 2D;
- estudo de utilização de porosidade variável numa mesma placa perfurada;
- estudo comparativo da aplicação de meio poroso em substituição à geometria da placa perfurada, evidenciando-se as vantagens e desvantagens desta simplificação;
- avaliação da recirculação de fluxo apresentada por cada arranjo, levando-se em consideração o tempo de residência de partículas dentro do conjunto difusor e placas perfuradas;
- estudos de caso de geometrias de dutos e difusores existentes ou em fase de projeto, consultando-se a metodologia, resultados e contribuições deste trabalho.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-SATTAR, S. An estimation of the wire-duct electrostatic precipitator efficiency. **Journal of Electrostatics**, v. 26, p. 99-114, agosto 1991.

ALSAFFAR, A. M. Hydrodynamic effects on flow through screens at intakes. **Water Research**, v. 8, p. 617-622, setembro 1974.

ANDERSON JR., J. D. **Computational Fluid Dynamics - The basics with applications**. New York: McGraw-hill Inc., 1995.

BAINES, W. D.; PETERSON, E.G. An investigation of flow through screens. **Journal of Applied Mechanics and Technical Physics**, Iowa, 1951.

BARBRICS, T.; IVÁNYI, A. Modelling the charge transport in ESP. **COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering**; v. 17, 1998.

BERNSTEIN, S.; CROWE, C. T. Interaction between electrostatics and fluid dynamics in electrostatic precipitators. **Environment International**, v. 6, p. 181-189, 1981.

BÖTTCHER, J.; WEDEMEYER, E. The flow downstream of screens and its influence on the flow in the stagnation region of cylindrical bodies. **Journal of Fluid Mechanics Digital Archive**, v. 204, p. 501-522, julho 1989.

CAÑADAS, L.; NAVARRETE, B.; SALVADOR, L. Theoretical modelling of electrostatic precipitators performance (PRELEC code). **Journal of Electrostatics**, v. 34, p. 335-353, maio 1995.

COMSOL Multiphysics. **Chemical Engineering Module User's Guide**. COMSOL AB - Version 3.2, setembro 2005.

COMSOL Multiphysics. **User's Guide**. COMSOL AB -Version 3.2, setembro 2005.

COOPER, C. D.; ALLEY, F. C. **Air Pollution Control – A Design Approach**. 3. ed. Long Grove, IL: McGraw-hill Inc., 2002.

DARBY, K. Criteria for designing electrostatic precipitators. **Environment International**, v. 6, p. 191-200, 1981.

DAVIS, W. T. **Air Pollution Engineering Manual**. Air & Waste Management Association. 25. ed. Nova Iorque: McGraw-hill Inc., 2000.

DERBUNIVICH, G. I. *et al.* Optimum conditions of turbulence reduction with screens. **Fluid Dynamics**, Nova Iorque; v. 28, n. 1, p. 138 – 144, 1993.

DEUFLHARD, P. A modified Newton method for the solution of ill-conditioned systems of nonlinear equations with application to multiple shooting. **Numer. Math**, 22, p. 289-315, 1974.

EMIN, H. A. Avaliação da distribuição do escoamento de reagentes através de um leito de material inerte, na entrada de um reator de leito fixo, usando-se CFD, 2006. Dissertação (Mestrado em Processos Industriais), Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

FOGIEL, M. **Modern Pollution Control Technology**. Vol. 2., Nova Iorque: Research and Education Association, 1978.

GAD-EL-HAK, M.; CORRSIN, S. Measurements of the nearly isotropic turbulence behind a uniform jet grid. **Journal of Fluid Mechanics Digital Archive**, v. 62, p. 115-143, janeiro 1974.

GALLIMBERTI, I. Recent advancements in the physical modelling of electrostatic precipitators. **Journal of Electrostatics**, v. 43, p. 219-247, junho 1998.

GAN, G.; RIFFAT, S. B. Pressure loss characteristics of orifice and perforated plates. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 14, p. 160-165, fevereiro 1997.

GROVES, J. F.; SMITH C. R. Gas-flow distribution effects in electrostatic precipitators. **Journal of Electrostatics**, Amsterdam, v. 8, p. 343-353, abril 1980.

ICAC. **EP 1 - Terminology for Electrostatic Precipitators**. Washington, EUA: ICAC - Institute of Clean Air Companies, novembro 2000.

ICAC. **EP 6 - Pilot Electrostatic Precipitators**. Washington, EUA: ICAC - Institute of Clean Air Companies, novembro 1968.

ICAC. **EP 7 - Electrostatic Precipitator Gas Flow Model Studies**. Washington, EUA: ICAC - Institute of Clean Air Companies, junho 2004.

KREMER I. Benchmarks of Scientific Modelling Software reveal that FEMLAB rivals Specialized Packages. **Materials and Design**, v. 26, p. 259-264, 2005

LAMI, E. *et al.* A mathematical model of electrostatic field in wires-plate electrostatic precipitators. **Journal of Electrostatics**, v. 39, p. 1-21, janeiro 1997.

LIU, R.; TING, D. S-K.; RANKIN, G. W. On the generation of turbulence with a perforated plate. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 28, p. 307-316, março 2004.

LIVESEY, J. L.; LAWS, E. M. Flow through non-uniform gauze screens. **Journal of Fluid Mechanics Digital Archive**, v. 59, p. 737-743, agosto 1973.

MACCHION O., LIOR N., RIZZI A. Computational study of velocity distribution and pressure drop for designing some gas quench chamber and furnace ducts. **Journal of Materials Processing Technology**, v.155–156, p. 1727–1733, 2004.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1995.

MEHTA R. D. The aerodynamic design of blower tunnels with wide-angle diffusers. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 18, p. 59-120, 1979.

MILLER, D. S. **Internal flow systems: design and performance prediction**. 2. ed. London: Gulf Publishing Co., 1990.

NEILL, F.G. Source models of flow through and around screens and gauzes. **Ocean Engineering**, janeiro 2006.

NIKAS K.S.P.; VARONOS A.A.; BERGELES G.C. Numerical simulation of the flow and the collection mechanisms inside a laboratory scale electrostatic precipitator. **Journal of Electrostatics**, v. 63, p. 423–443, janeiro 2005.

NOUI-MEHIDI, M.N. *et al.* Velocity distribution downstream of an asymmetric wide-angle diffuser. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 29, p. 649-657, julho 2005.

NOUI-MEHIDI, M.N.; WU, J.; SUTALO I. **Velocity Distribution in an Asymmetric Diffuser With Perforated Plates**. Em: 15th Australasian Fluid Mechanics Conference The University of Sydney, Sydney, Australia 13-17, dezembro 2004.

PERRY, R.H. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 7. ed. New York: McGraw-hill Inc., 1997.

PORLE, K.; FRANCIS, S. L.; BRADBURN, K.M. **Electrostatic precipitators for industrial applications**. Bruxelas: REHVA - Federation of European Heating and Air-conditioning Associations, 2005.

RAMOS, C. R. M. **Ventilação Industrial**.. 2. ed. São Paulo: Serviço Social da Indústria – SESI, 1977.

SAHIN, B. Flow control by perforated plates using a blanking technique in wide-angle diffusers employed in practical electrostatic precipitator systems. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 37, p. 269-284, abril 1991

SAHIN, B. **Flow control in a wide-angle diffuser using perforated plates**, 1985 Dissertação (Department of Mechanical Engineering), Brunel University Reino Unido.

SAHIN, B. Pressure losses in an isolated perforated plate and jets emerging from the perforated plate. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 31, p. 51-61, 1988.

SAHIN, B.; WARD-SMITH, A. J. Effect of perforated plates on wide-angle diffuser-exit velocity profiles. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 34, p. 113-125, julho 1990.

SAHIN, B.; WARD-SMITH, A. J. The use of perforated plates to control the flow emerging from a wide-angle diffuser, with application to electrostatic precipitator design. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 8, p. 124-131, junho 1987.

SAHIN, B.; WARD-SMITH, A. J.; LANE, D. The pressure drop and flow characteristics of wide-angle screened diffusers of large area ratio. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 58, p. 33-50, outubro 1995.

SAHIN, B.; WARD-SMITH, A. The pressure distribution in and flow characteristics of wide-angle diffusers using perforated plates for flow control with application to electrostatic precipitators. **International Journal of Mechanical Sciences**, Grã Bretanha, v. 35, p. 117-127, fevereiro 1993.

SANTOS, E. B.; SECLER, M. M. **Guia para elaboração da dissertação de mestrado**. 2ed. São Paulo: IPT/ CENATEC 2005

SKODRAS, G. *et al.* **Particulate removal via electrostatic precipitators** — CFD simulation. **Fuel Processing Technology**, v. 87, p. 623-631, julho 2006.

VARONOS, A.A.; ANAGNOSTOPOULOS, J. S.; BERGELES, G. C. Prediction of the cleaning efficiency of an electrostatic precipitator. **Journal of Electrostatics**, v. 55, p. 111-133, junho 2002.

WARD-SMITH, A. J. *et al.* Flow regimes in wide-angle screened. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 33, p. 41-54, 1991.

WARD-SMITH, A. J. **Internal fluid flow** : the fluid dynamics of flow in pipes and ducts. Nova Iorque: Clarendon Press; Oxford University Press, 1980.

WARHAFT, K. Y. Z. The evolution of grid-generated turbulence under conditions of stable thermal stratification. **Journal of Fluid Mechanics Digital Archive**, v. 215, p. 601-638, junho 1990.

WELTY, J.R.; WICKS, C. E.; WILSON R. E. **Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer**. 3. ed. New York: Wiley & Sons, 1983.

WILCOX, D. C. **Turbulence modeling for CFD**. Imprensa La Cãnada, California: DCW Industries, 2000.

ANEXO 1 – Tabelas resumo de resultados.

Tabela 11 - Tabela resumo de resultados 2D – Testes 0 a 7.

Teste-Arranjo	Porosidade	Tamanho dos orifícios 2D (d)	Número de elementos da Malha	Varição da pressão estática total (ΔP_s)	Velocidade média no duto de entrada (u_1)	Velocidade na posição S4	Perda de carga	Coefficiente de perda de carga global (C_p)	Cp calculado pela Modelo Empírico II	CV em S1	CV em S2	CV em S3	CV em S4	CRITÉRIO ANÁLISE CV Médio S2 e S4
-	-	mm	-	Pa	m/s	m/s	m2/s2	-	-	%	%	%	%	%
0-NN	não aplicável	não aplicável	2214	-4,7	25,3	10,7	-267,62	-0,01	não aplicável	0,47	92,93	82,96	78,37	85,65
1a-0N	0,5	0,006	15014	-273,2	25,3	8,3	-518,58	-0,72	não aplicável	0,47	11,43	14,49	8,56	9,99
1b-0N	0,5	0,01	13612	-227,4	25,3	8,3	-479,61	-0,60	não aplicável	0,47	12,02	21,35	13,87	12,95
1c-0N	0,5	0,02	11601	-197,8	25,3	8,3	-454,47	-0,52	não aplicável	0,47	11,02	24,83	16,54	13,78
1d-0N	0,5	0,03	10152	-182,7	25,3	8,3	-440,94	-0,48	não aplicável	0,46	12,67	22,73	14,40	13,54
1e-0N	0,5	0,04	9130	-176,3	25,3	8,3	-435,55	-0,47	não aplicável	0,47	18,67	18,02	9,41	14,04
2-01	0,5	0,02	18101	-524,9	25,3	8,3	-731,53	-1,39	-0,002	0,47	26,08	43,69	31,90	28,99
2-02	0,5	0,02	17901	-551,9	25,3	8,3	-754,34	-1,47	-0,095	0,46	20,38	38,43	26,55	23,47
2-03	0,5	0,02	17417	-631,4	25,3	8,3	-821,90	-1,68	-0,228	0,45	16,06	32,27	20,57	18,32
2-04	0,5	0,02	16619	-753,9	25,3	8,3	-925,98	-2,00	-0,428	0,45	13,67	28,41	16,93	15,30
2-05	0,5	0,02	15719	-923,5	25,3	8,3	-1070,14	-2,45	-0,747	0,44	12,83	26,38	15,06	13,94
2-06	0,5	0,02	14976	-1294,5	25,3	8,3	-1385,31	-3,44	-1,302	0,43	8,50	24,34	14,66	11,58
2-07	0,5	0,02	14328	-2393,0	25,3	8,3	-2318,49	-6,35	-2,528	0,51	25,61	30,09	23,47	24,54
2-12	0,5	0,02	16596	-624,1	25,3	8,3	-815,76	-1,66	-0,200	0,46	28,57	41,16	28,75	28,66
2-13	0,5	0,02	16295	-701,5	25,3	8,3	-881,47	-1,86	-0,333	0,45	16,90	31,26	19,44	18,17
2-14	0,5	0,02	15615	-848,0	25,3	8,3	-1005,92	-2,25	-0,532	0,45	11,91	25,61	14,38	13,14
2-15	0,5	0,02	14892	-975,7	25,3	8,3	-1114,43	-2,59	-0,851	0,44	16,09	24,34	13,09	14,59
2-16	0,5	0,02	14106	-1348,0	25,3	8,3	-1430,73	-3,58	-1,406	0,44	7,77	21,82	11,39	9,58
2-17	0,5	0,02	13391	-2455,6	25,3	8,3	-2371,69	-6,52	-2,633	0,51	22,56	27,40	20,19	21,37
2-23	0,5	0,02	14944	-777,3	25,3	8,3	-945,96	-2,06	-2,022	0,45	30,79	38,79	25,75	28,27
2-24	0,5	0,02	14735	-937,5	25,3	8,3	-1081,93	-2,49	-2,222	0,46	14,20	27,70	16,03	15,11
2-25	0,5	0,02	14090	-1056,4	25,3	8,3	-1182,96	-2,80	-2,540	0,43	14,42	26,54	14,93	14,67
2-26	0,5	0,02	13405	-1417,5	25,3	8,3	-1489,78	-3,76	-3,095	0,43	9,84	21,84	11,30	10,57
2-27	0,5	0,02	12739	-2494,2	25,3	8,3	-2404,52	-6,62	-4,322	0,51	27,26	29,16	22,14	24,70

Teste-Arranjo	Porosidade	Tamanho dos orifícios 2D (d)	Número de elementos da Malha	Varição da pressão estática total (ΔP_s)	Velocidade média no duto de entrada (u_1)	Velocidade na posição S4	Perda de carga	Coefficiente de perda de carga global (C_p)	Cp calculado pela Modelo Empírico II	CV em S1	CV em S2	CV em S3	CV em S4	CRITÉRIO ANÁLISE CV Médio S2 e S4
-	-	mm	-	Pa	m/s	m/s	m2/s2	-	-	%	%	%	%	%
3-01	0,4	0,02	16535	-966,8	25,3	8,3	-1106,88	-2,57	-0,820	0,46	37,90	53,02	38,59	38,24
3-02	0,4	0,02	16407	-1043,1	25,3	8,3	-1171,51	-2,77	-1,026	0,46	27,22	44,70	31,91	29,57
3-03	0,4	0,02	15996	-1174,1	25,3	8,3	-1282,85	-3,12	-1,320	0,45	25,74	40,00	27,49	26,62
3-04	0,4	0,02	15282	-1491,0	25,3	8,3	-1552,06	-3,96	-1,761	0,45	21,38	35,39	23,82	22,60
3-05	0,4	0,02	14577	-1791,6	25,3	8,3	-1807,42	-4,76	-2,463	0,43	20,27	33,72	21,74	21,01
3-06	0,4	0,02	13598	-2875,4	25,3	8,3	-2728,19	-7,63	-3,688	0,44	30,37	47,13	38,11	34,24
3-07	0,4	0,02	13256	-4205,6	25,3	8,3	-3858,16	-11,16	-6,396	0,49	40,59	60,04	51,56	46,08
3-12	0,4	0,02	14984	-1143,1	25,3	8,3	-1256,70	-3,03	-1,214	0,45	42,72	49,79	33,94	38,33
3-13	0,4	0,02	15055	-1308,8	25,3	8,3	-1397,24	-3,47	-1,508	0,45	25,62	38,55	25,60	25,61
3-14	0,4	0,02	14557	-1625,4	25,3	8,3	-1666,25	-4,31	-1,949	0,45	16,06	31,39	19,29	17,67
3-15	0,4	0,02	13717	-1935,8	25,3	8,3	-1929,93	-5,14	-2,652	0,44	18,30	29,77	17,62	17,96
3-16	0,4	0,02	12822	-2977,6	25,3	8,3	-2814,98	-7,90	-3,876	0,44	25,25	41,18	31,02	28,14
3-17	0,4	0,02	12423	-4332,1	25,3	8,3	-3965,61	-11,50	-6,584	0,48	40,20	54,20	44,75	42,47
3-23	0,4	0,02	13881	-1403,6	25,3	8,3	-1478,03	-3,73	-4,755	0,45	49,63	53,20	36,26	42,94
3-24	0,4	0,02	13645	-1766,7	25,3	8,3	-1786,20	-4,69	-5,196	0,44	19,14	33,51	20,56	19,85
3-25	0,4	0,02	13036	-2052,8	25,3	8,3	-2029,23	-5,45	-5,899	0,43	18,79	31,87	19,47	19,13
3-26	0,4	0,02	12211	-3109,0	25,3	8,3	-2926,55	-8,25	-7,123	0,44	27,09	39,26	28,52	27,80
3-27	0,4	0,02	11845	-4428,6	25,3	8,3	-4047,55	-11,76	-9,831	0,49	42,69	52,57	42,52	42,61
4-01	0,58	0,02	18865	-310,4	25,3	8,3	-549,34	-0,82	0,232	0,47	17,18	32,10	22,24	19,71
4-02	0,58	0,02	18656	-322,5	25,3	8,3	-559,65	-0,86	0,171	0,45	11,37	28,15	17,87	14,62
4-03	0,58	0,02	17908	-371,4	25,3	8,3	-601,12	-0,99	0,083	0,46	9,05	24,43	13,91	11,48
4-04	0,58	0,02	17379	-437,5	25,3	8,3	-657,34	-1,16	-0,047	0,45	6,89	20,85	10,58	8,73
4-05	0,58	0,02	16424	-575,5	25,3	8,3	-774,65	-1,53	-0,256	0,45	5,22	15,04	5,78	5,50
4-06	0,58	0,02	15539	-793,1	25,3	8,3	-959,55	-2,11	-0,620	0,44	13,25	9,75	4,38	8,82
4-07	0,58	0,02	15025	-1411,2	25,3	8,2	-1484,71	-3,75	-1,423	0,50	35,19	11,31	12,72	23,96
4-12	0,58	0,02	17200	-371,7	25,3	8,3	-601,42	-0,99	0,090	0,46	16,92	28,40	18,13	17,53
4-13	0,58	0,02	16934	-409,0	25,3	8,3	-633,14	-1,09	0,003	0,45	8,67	22,77	12,33	10,50
4-14	0,58	0,02	16696	-475,0	25,3	8,3	-689,22	-1,26	-0,128	0,45	5,79	19,55	9,23	7,51
4-15	0,58	0,02	15637	-610,0	25,3	8,3	-803,95	-1,62	-0,336	0,44	3,70	14,18	4,61	4,15
4-16	0,58	0,02	14745	-824,4	25,3	8,3	-986,16	-2,19	-0,700	0,44	9,76	8,89	3,44	6,60
4-17	0,58	0,02	14131	-1440,5	25,3	8,2	-1509,59	-3,82	-1,504	0,49	29,36	10,19	13,79	21,58
4-23	0,58	0,02	15615	-466,6	25,3	8,3	-682,09	-1,24	-1,241	0,45	19,45	26,63	16,59	18,02

Teste-Arranjo	Porosidade	Tamanho dos orifícios 2D (d)	Número de elementos da Malha	Varição da pressão estática total (ΔP_s)	Velocidade média no duto de entrada (u_e)	Velocidade na posição S4	Perda de carga	Coefficiente de perda de carga global (C_p)	Cp calculado pela Modelo Empírico II	CV em S1	CV em S2	CV em S3	CV em S4	CRITÉRIO ANÁLISE CV Médio S2 e S4
-	-	mm	-	Pa	m/s	m/s	m2/s2	-	-	%	%	%	%	%
4-24	0,58	0,02	15633	-537,7	25,3	8,3	-742,49	-1,43	-1,372	0,44	9,13	18,49	8,65	8,89
4-25	0,58	0,02	14667	-649,6	25,3	8,3	-837,56	-1,72	-1,581	0,44	7,66	12,81	4,01	5,83
4-26	0,58	0,02	13902	-861,8	25,3	8,3	-1017,89	-2,29	-1,944	0,44	10,07	7,50	4,58	7,33
4-27	0,58	0,02	13317	-1469,6	25,3	8,2	-1534,35	-3,90	-2,748	0,48	27,85	12,72	17,43	22,64
5-15,5	0,5	0,02	14529	-1098,1	25,3	8,3	-1218,44	-2,92	-1,087	0,43	15,61	23,29	12,13	13,87
5-16,5	0,5	0,02	13729	-1680,8	25,3	8,3	-1713,49	-4,46	-1,894	0,44	12,54	23,75	15,23	13,89
6a-15	0,5	0,00635	20282	-806,4	25,3	8,3	-970,95	-2,14	-1,020	0,44	12,71	5,19	10,24	11,48
6b-16	0,5	0,006	18443	-1754,5	25,3	8,3	-1776,12	-4,66	-0,491	0,43	4,37	10,03	3,55	3,96
7-01	0,5	0,02	21143	-542,2	25,3	8,3	-746,11	-1,44	-0,002	0,45	22,11	40,53	27,91	25,01
7-02	0,5	0,02	21138	-551,7	25,3	8,3	-754,10	-1,46	-0,095	0,44	19,39	36,78	24,45	21,92
7-03	0,5	0,02	25047	-625,8	25,3	8,3	-817,23	-1,66	-0,228	0,45	15,34	31,35	19,88	17,61
7-04	0,5	0,02	19717	-800,5	25,3	8,3	-965,67	-2,12	-0,428	0,43	12,04	27,60	17,00	14,52
7-05	0,5	0,02	23207	-937,0	25,3	8,3	-1081,71	-2,49	-0,747	0,43	12,38	26,21	15,75	14,06
7-06	0,5	0,02	18544	-1308,6	25,3	8,3	-1397,40	-3,47	-1,302	0,42	7,90	24,10	15,09	11,50
7-07	0,5	0,02	18017	-2410,6	25,3	8,3	-2333,51	-6,40	-2,528	0,50	24,12	30,57	23,19	23,65
7-12	0,5	0,02	19800	-631,9	25,3	8,3	-822,40	-1,68	-0,200	0,45	27,45	39,31	26,74	27,09
7-13	0,5	0,02	19457	-729,3	25,3	8,3	-905,11	-1,94	-0,333	0,42	15,95	30,27	18,79	17,37
7-14	0,5	0,02	19130	-868,3	25,3	8,3	-1023,37	-2,30	-0,532	0,43	11,61	24,80	14,77	13,19
7-15	0,5	0,02	18532	-1011,3	25,3	8,3	-1144,84	-2,68	-0,851	0,42	14,46	23,25	13,55	14,00
7-16	0,5	0,02	17881	-1369,6	25,3	8,3	-1449,33	-3,64	-1,406	0,41	7,67	20,76	12,06	9,87
7-17	0,5	0,02	17334	-2454,6	25,3	8,3	-2371,01	-6,52	-2,633	0,50	22,43	27,55	20,07	21,25
7-23	0,5	0,02	18755	-794,7	25,3	8,3	-960,81	-2,11	-2,022	0,43	28,25	36,71	24,21	26,23
7-24	0,5	0,02	18461	-968,6	25,3	8,3	-1108,50	-2,57	-2,222	0,43	11,95	26,07	15,58	13,77
7-25	0,5	0,02	21604	-1062,8	25,3	8,3	-1188,55	-2,82	-2,540	0,39	11,20	24,71	14,26	12,73
7-26	0,5	0,02	17330	-1440,3	25,3	8,3	-1509,33	-3,82	-3,095	0,42	6,94	20,77	11,53	9,23
7-27	0,5	0,02	16790	-2505,3	25,3	8,3	-2414,10	-6,65	-4,322	0,49	22,87	25,62	18,11	20,49

Tabela 12 - Tabela resumo de resultados 3D – Testes 8 e 9.

Teste-Arranjo	Porosidade	Tamanho do furo placa menor BB	Tamanho do furo placa maior AA	Número de elementos da Malha	Varição da pressão estática total (ΔP_s)	Velocidade média no duto de entrada (u_1)	Velocidade na posição S4	Perda de carga	Coefficiente de perda de carga global (C_p)	CV em S1	CV em S2	CV em S3	CV em S4	CRITÉRIO ANÁLISE CV Médio S2 e S4
-	-	[m]	[m]	-	Pa	m/s	m/s	m ² /s ²	-	%	%	%	%	%
8-NN	0,5	-	-	55.016	-524,9	24,6	6,4	-202,03	0,25	9,95	125,69	99,21	84,47	105,08
8-0N	0,5	-	0,041	1.698.769	-551,9	24,7	4,5	-215,66	0,25	9,57	48,44	42,94	43,93	46,19
8-01	0,5	0,041	0,041	2.141.786	-631,4	24,6	4,8	-262,23	0,09	10,23	45,77	66,13	50,94	48,36
8-02	0,5	0,038	0,041	2.292.665	-753,9	24,5	4,4	-253,47	0,12	10,57	36,61	53,49	45,26	40,93
8-03	0,5	0,038	0,041	2.750.137	-923,5	24,4	4,3	-260,29	0,08	11,40	36,18	50,50	37,75	36,97
8-04	0,5	0,040	0,041	2.583.871	-1294,5	24,5	4,4	-308,44	-0,05	10,53	40,53	50,74	40,80	40,66
8-05	0,5	0,042	0,041	1.938.105	-2393,0	24,5	4,4	-414,38	-0,38	10,45	44,04	61,16	49,23	46,64
8-06	0,5	0,038	0,041	1.863.228	-1348,0	24,6	4,1	-658,93	-1,13	10,04	33,86	39,73	28,02	30,94
8-07	0,5	0,037	0,041	1.666.313	-2455,6	24,6	8,9	-2855,09	-8,08	10,26	51,66	47,34	34,41	43,04
8-16	0,5	0,041	0,038	1.542.122	-777,3	24,7	4,1	-760,55	-1,44	9,31	37,32	46,75	34,84	36,08
9-NN	0,5	-	-	239.427	-524,9	24,2	7,1	-211,17	0,18	12,45	116,22	93,39	77,11	96,67
9-0N	0,5	-	0,059	3.083.788	-551,9	24,1	3,8	-210,00	0,23	14,22	62,83	45,74	37,55	50,19
9-01	0,5	0,059	0,059	2.510.992	-631,4	24,2	4,9	-211,15	0,22	13,57	41,06	44,78	42,16	41,61
9-02	0,5	0,059	0,059	2.410.201	-753,9	24,0	4,6	-211,73	0,20	14,35	34,31	40,33	38,24	36,27
9-03	0,5	0,060	0,059	2.546.632	-923,5	23,9	4,3	-240,02	0,11	14,89	31,27	40,03	37,43	34,35
9-04	0,5	0,070	0,069	2.832.832	-1294,5	24,0	4,2	-312,84	-0,10	14,50	41,96	33,43	28,53	35,24
9-05	0,5	0,061	0,059	2.536.758	-2393,0	23,9	4,2	-368,69	-0,29	14,93	31,16	37,02	32,43	31,79
9-06	0,5	0,061	0,059	2.750.258	-1348,0	24,4	4,3	-628,36	-1,05	12,36	44,27	40,19	30,65	37,46
9-07	0,5	0,061	0,059	2.942.914	-2455,6	24,0	5,0	-1871,19	-4,97	14,65	63,94	76,22	70,13	67,04
9-16	0,5	0,061	0,059	1.717.774	-777,3	24,1	4,5	-655,24	-1,17	13,14	39,28	48,12	42,49	40,89

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)