

Simulação Numérica da Ventilação num Auditório

Rui Filipe Afonso Alves

Dissertação do MIEM

Orientador: Prof. José Manuel Laginha Mestre da Palma



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Outubro de 2010

*A todos aqueles que comigo partilham a minha experiência de vida,
especialmente aos meus pais, Fernando e Alberta,
ao meu irmão e companheiro, Pedro,
à minha namorada e grande amor, Karen
e à minha filha e luz dos meus olhos, a Inês.*

Adoro-vos.

Resumo

O estudo de climatização e/ou ventilação em espaços fechados onde se verifica a presença de público torna-se cada vez mais importante nos tempos que correm. As ferramentas de Dinâmica dos Fluidos Computacional – DFC existentes hoje em dia podem ser utilizadas para o estudo destes fenómenos para apoio ao projectista ou eventual comparação com dados experimentais.

Neste trabalho procura-se fazer uma abordagem a um caso de estudo particular – um anfiteatro da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, com lotação de 184 lugares sentados – através da utilização de um código comercial de DFC, o *software* ANSYS FLUENT. Após a conclusão de toda a modelação geométrica e de malhas do anfiteatro foram analisados vários parâmetros tais como a escolha da malha e do modelo mais adequados para o caso em questão, analisando diversos factores comparativos.

Posto isto, foram diferenciadas duas situações de estudo distintas, uma estação de arrefecimento ou Verão e uma de aquecimento ou Inverno, através das quais se obtiveram diversos resultados de temperatura, velocidade e caudais de extracção ao longo de vários pontos de estudo, planos, linhas e as próprias grelhas de extracção.

Observou-se que independentemente da estação estudada tanto as velocidades como os caudais de extracção se mantêm, no entanto os valores das temperaturas variam, como seria de esperar. Constatou-se nomeadamente que, na situação de Verão, na zona onde se situam as cabeças dos ocupantes a temperatura é cerca de 0,4° C mais elevada comparativamente à temperatura de insuflação e no caso de Inverno é inferior cerca de 0,5° C.

Todas as evoluções ao longo de certos planos e linhas pré-definidas, tais como a informação gráfica de temperaturas e velocidades em certos planos poderão ser úteis para efeitos consultivos como de trabalhos futuros.

Abstract

The study of climate and / or ventilation in enclosed spaces where there is presence of the public becomes increasingly important in these times. The tools of computational fluid dynamics - CFD exist today can be used to study these phenomena to support the developer or any comparison with experimental data.

This work seeks to make an approach to a particular case study - an amphitheater of the Faculty of Engineering, University of Porto, with a capacity of 184 seats - by using a commercial CFD code, the software ANSYS FLUENT. After completion of all the modeling geometry and mesh the amphitheater were analyzed various parameters such as the choice of mesh and the model best suited to the case at issue, analyzing various factors comparisons.

It was observed that regardless of the season studied both the speed and flow rates of extraction remain, however the values of the temperatures vary, as expected. It was noted in particular that in the event of the summer, the area where are the heads of occupants temperature is about 0.4 ° C higher temperature compared to inflation and if the winter is less than about 0.5 ° C.

All the trends over the plans and pre-defined lines, such as graphic information of temperatures and speeds on certain plans may be useful for future work as advisory.

Agradecimentos

Quero agradecer em primeiro lugar ao meu orientador durante esta tese, o Prof. Laginha Palma pelos conselhos facultados e pela motivação inculcada na realização desta mesma.

Estou também agradecido ao Prof. José Luís Alexandre pelos conselhos dados como pelo material disponibilizado sem o qual dificilmente seria feita toda a parte de modelação do anfiteatro.

Também agradeço a todo o pessoal do Laboratório de Climatização pelo tempo prestado a facultarem-me informação valiosa para este trabalho.

Agradeço também a todos os amigos e colegas na Faculdade pelo apoio e força prestados, mas especialmente aos meus colegas sob orientação do Prof. Laginha Palma, o Eleutério Caboz, o Ricardo Pontes, o Afonso Rosado e o André Pestana por toda a colaboração mútua fornecida.

Finalmente agradeço a todos os meus familiares e amigos fora da Faculdade pela compreensão e apoio durante a realização desta tese.

Índice

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. MODELAÇÃO MATEMÁTICA	5
2.1. Equações de conservação da massa e da quantidade de movimento	5
2.2. Modelo de turbulência $k-\varepsilon$ standard (padrão)	6
2.2.1. Equações de transporte	7
2.2.2. Modelação da viscosidade turbulenta	7
2.2.3. Constantes do modelo	7
2.3. Modelo de turbulência RNG $k-\varepsilon$	8
2.3.1. Equações de transporte	8
2.4. Modelo de turbulência Realizable $k-\varepsilon$	8
2.4.1. Equações de transporte	8
2.5. Modelo de turbulência $k-\omega$ padrão	9
2.5.1. Equações de transporte	9
2.6. Modelo de turbulência RSM (Reynolds Stress Model)	10
2.6.1. Equações de transporte	10
3. SIMULAÇÃO EM CFD.....	13
3.1. Modelação numérica	13
3.2. Geometria.....	14
3.3. Malhas.....	15
3.4. Condições de fronteira	17
3.5. Cálculos prévios.....	18
3.6. Condições de entrada na simulação	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1. Verão.....	32
4.1.1. Comparação de malhas.....	32
4.1.2. Comparação de modelos	35
4.1.3. Velocidades e temperaturas nos pontos de estudo	36
4.1.4. Resultados obtidos pelo modelo escolhido	40
4.2. Inverno	48
4.2.1. Comparação de malhas.....	48
4.2.2. Comparação de modelos	51
4.2.3. Velocidades e temperaturas nos pontos de estudo	52
4.2.4. Resultados obtidos pelo modelo escolhido	56
5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	65

6. REFERÊNCIAS..... 67

ANEXOS 69

Lista de Figuras

Figura 1 - Perspectiva isométrica da geometria do auditório	14
Figura 2 - Perspectiva isométrica da malha intermédia.....	15
Figura 3 - Condições de fronteira do anfiteatro estudado.....	17
Figura 4 - Pormenor da nomenclatura das grelhas de insuflação (<i>Inlets</i>)	18
Figura 5 - Pormenor das subdivisões de cada <i>Inlet</i>	19
Figura 6 - Perspectiva isométrica do ponto b-d	22
Figura 7 - Perspectiva isométrica do ponto b-e	22
Figura 8 - Perspectiva isométrica do ponto c-d.....	23
Figura 9 - Perspectiva isométrica do ponto c-e.....	23
Figura 10 - Perspectiva isométrica do ponto central	24
Figura 11 - Perspectiva isométrica do plano de simetria	25
Figura 12 - Perspectiva isométrica do plano do meio	25
Figura 13 - Perspectiva isométrica do plano útil.....	26
Figura 14 - Perspectiva isométrica da linha central	27
Figura 15 - Perspectiva isométrica da linha da esquerda	27
Figura 16 - Perspectiva isométrica da linha da direita	28
Figura 17 - Perspectiva isométrica da linha do meio	28
Figura 18 - Perspectiva isométrica da linha de baixo.....	29
Figura 19 - Perspectiva isométrica da linha de cima.....	29
Figura 20 - Velocidades nos pontos de estudo por malha - Verão	32
Figura 21 - Temperaturas nos pontos de estudo por malha - Verão	33
Figura 22 - Caudais de extracção nos <i>VentOuts</i> por malha - Verão.....	33
Figura 23 - Resíduos para o modelo standard $k-\epsilon$ – Malha 1 (grosseira) - Verão	34
Figura 24 - Resíduos para o modelo standard $k-\epsilon$ – Malha 2 (intermédia) - Verão	34
Figura 25 - Resíduos para o modelo standard $k-\epsilon$ – Malha 3 (fina) – Verão.....	35
Figura 26 - Velocidades nos pontos de estudo por modelo - Verão	37
Figura 27 - Temperaturas nos pontos de estudo por modelo - Verão.....	37
Figura 28 - Caudais de extracção nos <i>VentOuts</i> por modelo - Verão	37
Figura 29 - Resíduos para o modelo Realizable $k-\epsilon$ - Verão	38
Figura 30 - Resíduos para o modelo Standard $k-\omega$ - Verão.....	39
Figura 31 - Resíduos para o modelo RSM (Reynolds Stress Model) – Verão	39
Figura 32 - Perspectiva isométrica dos contornos de temperatura - Verão.....	40
Figura 33 - Contornos de temperatura no plano de simetria - Verão	41
Figura 34 - Contornos de velocidade no plano de simetria - Verão.....	41
Figura 35 - Contornos de temperatura no plano do meio - Verão	42
Figura 36 - Contornos de velocidade no plano do meio - Verão	42
Figura 37 - Contornos de temperatura no plano útil - Verão	43
Figura 38 - Contornos de velocidade no plano útil - Verão.....	43
Figura 39 - Vectores de velocidade do escoamento (vista de cima) - Verão	44
Figura 40 - Comparação da evolução das temperaturas ao longo do comprimento do auditório de várias linhas - Verão	45
Figura 41 - Comparação da evolução das velocidades ao longo do comprimento do auditório de várias linhas - Verão	45

Figura 42 - Comparação da evolução das temperaturas ao longo da largura do auditório de várias linhas - Verão.....	46
Figura 43 - Comparação da evolução das velocidades ao longo da largura do auditório de várias linhas - Verão	46
Figura 44 - Velocidades nos pontos de estudo por malha - Inverno.....	48
Figura 45 - Temperaturas nos pontos de estudo por malha - Inverno	49
Figura 46 - Caudais de extracção nos <i>VentOuts</i> por malha - Inverno	49
Figura 47 - Resíduos para o modelo standard $k-\varepsilon$ – Malha 1 (grosseira) - Inverno.....	50
Figura 48 - Resíduos para o modelo standard $k-\varepsilon$ – Malha 2 (intermédia) - Inverno	50
Figura 49 - Resíduos para o modelo standard $k-\varepsilon$ – Malha 3 (fina) – Inverno	51
Figura 50 - Velocidades nos pontos de estudo por modelo - Inverno	53
Figura 51 - Temperaturas nos pontos de estudo por modelo - Inverno	53
Figura 52 - Caudais de extracção nos <i>VentOuts</i> por modelo - Inverno.....	53
Figura 53 - Resíduos para o modelo Realizable $k-\varepsilon$ - Inverno.....	54
Figura 54 - Resíduos para o modelo Standard $k-\omega$ - Inverno	55
Figura 55 - Resíduos para o modelo RSM (Reynolds Stress Model) - Inverno	55
Figura 56 - Perspectiva isométrica dos contornos de temperatura - Inverno	56
Figura 57 - Contornos de temperatura no plano de simetria - Inverno.....	57
Figura 58 - Contornos de velocidade no plano de simetria - Inverno	57
Figura 59 - Contornos de temperatura no plano do meio - Inverno.....	58
Figura 60 - Contornos de velocidade no plano do meio - Inverno.....	58
Figura 61 - Contornos de temperatura no plano útil - Inverno.....	59
Figura 62 - Contornos de velocidade no plano útil - Inverno	59
Figura 63 - Vectores de velocidade do escoamento (vista de cima) - Inverno.....	60
Figura 64 - Comparação da evolução das temperaturas ao longo do comprimento do auditório de várias linhas - Inverno.....	61
Figura 65 - Comparação da evolução das velocidades ao longo do comprimento do auditório de várias linhas - Inverno.....	61
Figura 66 - Comparação da evolução das temperaturas ao longo da largura do auditório de várias linhas - Inverno	62
Figura 67 - Comparação da evolução das velocidades ao longo da largura do auditório de várias linhas - Inverno	62
Figura 68 – Corte dos anfiteatros	73
Figura 69 – Planta dos anfiteatros.....	73
Figura 70 – Planta da ventilação dos anfiteatros	74
Figura 71 – Vista frontal da geometria do anfiteatro.....	75
Figura 72 – Vista lateral da geometria do anfiteatro	75
Figura 73 – Vista de topo da geometria do anfiteatro	76
Figura 74 – Perspectiva isométrica da malha grosseira	77
Figura 75 – Perspectiva isométrica da malha fina.....	77
Figura 76 – Vista frontal do ponto b-d	78
Figura 77 – Vista lateral do ponto b-d.....	78
Figura 78 – Vista de topo do ponto b-d.....	79
Figura 79 – Vista frontal do ponto b-e	79
Figura 80 – Vista lateral do ponto b-e	80
Figura 81 – Vista de topo do ponto b-e.....	80
Figura 82 – Vista frontal do ponto c-d.....	81

Figura 83 – Vista lateral do ponto c-d	81
Figura 84 – Vista de topo do ponto c-d	82
Figura 85 – vista frontal do ponto c-e	82
Figura 86 – Vista lateral do ponto c-e	83
Figura 87 – Vista de topo do ponto c-e	83
Figura 88 – Vista frontal do ponto central	84
Figura 89 – Vista lateral do ponto frontal	84
Figura 90 – Vista de topo do ponto central	85
Figura 91 – Vista frontal do plano de simetria	86
Figura 92 – Vista lateral do plano de simetria	86
Figura 93 – Vista de topo do plano de simetria	87
Figura 94 – Vista frontal do plano do meio	87
Figura 95 – Vista lateral do plano do meio	88
Figura 96 – Vista de topo do plano do meio	88
Figura 97 – Vista frontal do plano útil	89
Figura 98 – Vista lateral do plano útil	89
Figura 99 – Vista de topo do plano útil	90
Figura 100 – Vista frontal da linha central	91
Figura 101 – Vista lateral da linha central	91
Figura 102 – Vista de topo da linha central	92
Figura 103 – Vista frontal da linha da esquerda	92
Figura 104 – Vista lateral da linha da esquerda	93
Figura 105 – Vista de topo da linha da esquerda	93
Figura 106 – Vista frontal da linha da direita	94
Figura 107 – Vista lateral da linha da direita	94
Figura 108 – Vista de topo da linha da direita	95
Figura 109 – Vista frontal da linha do meio	95
Figura 110 – Vista lateral da linha do meio	96
Figura 111 – Vista de topo da linha do meio	96
Figura 112 – Vista frontal da linha de baixo	97
Figura 113 – Vista lateral da linha de baixo	97
Figura 114 – Vista de topo da linha de baixo	98
Figura 115 – Vista frontal da linha de cima	98
Figura 116 – Vista lateral da linha de cima	99
Figura 117 – Vista de topo da linha de cima	99
Figura 118 – Velocidades nos pontos de estudo por modelo – Verão (escala 2)	101
Figura 119 – Temperaturas nos pontos de estudo por modelo – Verão (escala 2)	101
Figura 120 – Temperaturas nos pontos de estudo por modelo – Verão (escala 3)	102
Figura 121 – Caudais de extracção nos <i>VentOuts</i> por modelo – Verão (escala 2)	102
Figura 122 – Velocidades nos pontos de estudo por modelo – Inverno (escala 2)	103
Figura 123 – temperaturas nos pontos de estudo por modelo – Inverno (escala 2)	103
Figura 124 – Temperaturas nos pontos de estudo por modelo – Inverno (escala 3)	104
Figura 125 – Caudais de extracção nos <i>VentOuts</i> por modelo – Inverno (escala 2)	104
Figura 126 – Evolução da temperatura ao longo da linha central - Verão	105
Figura 127 – Evolução da temperatura ao longo da linha da esquerda - Verão	105
Figura 128 – Evolução da temperatura ao longo da linha da direita - Verão	106
Figura 129 – Evolução da temperatura ao longo da linha do meio - Verão	106

Figura 130 – Evolução da temperatura ao longo da linha de baixo - Verão	107
Figura 131 – Evolução da temperatura ao longo da linha de cima - Verão	107
Figura 132 – Evolução da velocidade ao longo da linha central - Verão	108
Figura 133 – Evolução da velocidade ao longo da linha da esquerda - Verão	108
Figura 134 – Evolução da velocidade ao longo da linha da direita - Verão	109
Figura 135 – Evolução da velocidade ao longo da linha do meio - Verão	109
Figura 136 – Evolução da velocidade ao longo da linha de baixo - Verão	110
Figura 137 – Evolução da velocidade ao longo da linha de cima - Verão	110
Figura 138 – Evolução da temperatura ao longo da linha central - Inverno	111
Figura 139 – Evolução da temperatura ao longo da linha da esquerda - Inverno	111
Figura 140 – Evolução da temperatura ao longo da linha direita - Inverno	112
Figura 141 – Evolução da temperatura ao longo da linha do meio - Inverno	112
Figura 142 – Evolução da temperatura ao longo da linha de baixo - Inverno	113
Figura 143 – Evolução da temperatura ao longo da linha de cima - Inverno	113
Figura 144 – Evolução da velocidade ao longo da linha central - Inverno	114
Figura 145 – Evolução da velocidade ao longo da linha da esquerda - Inverno	114
Figura 146 – Evolução da velocidade ao longo da linha da direita - Inverno	115
Figura 147 – Evolução da velocidade ao longo da linha do meio - Inverno	115
Figura 148 – Evolução da velocidade ao longo da linha de baixo - Inverno	116
Figura 149 – Evolução da velocidade ao longo da linha de cima - Inverno	116
Figura 150 – Vista frontal dos contornos de temperatura - Verão	117
Figura 151 – Vista de topo dos contornos de temperatura - Verão	117
Figura 152 – Contornos de temperatura no plano de simetria – Verão (versão 2)	118
Figura 153 – Contornos de temperatura no plano de simetria – Verão (versão 3)	118
Figura 154 – Contornos de velocidade no plano de simetria – Verão (versão 2)	119
Figura 155 – Contornos de temperatura no plano do meio – Verão (versão 2)	119
Figura 156 – Contornos de temperatura no plano do meio (versão 3)	120
Figura 157 – Contornos de velocidade no plano do meio - Verão (versão 2)	120
Figura 158 – Contornos de temperatura no plano útil – Verão (versão 2)	121
Figura 159 – Contornos de temperatura no plano útil – Verão (versão 3)	121
Figura 160 – Contornos de velocidade no plano útil – Verão (versão 2)	122
Figura 161 – Vista frontal dos contornos de temperatura - inverno	122
Figura 162 – Vista de topo dos contornos de temperatura - Inverno	123
Figura 163 – Contornos de temperatura no plano de simetria – Inverno (versão 2)	123
Figura 164 – Contornos de temperatura no plano de simetria – Inverno (versão 3)	124
Figura 165 – Contornos de velocidade no plano de simetria – Inverno (versão 2)	124
Figura 166 – Contornos de temperatura no plano do meio – Inverno (versão 2)	125
Figura 167 – Contornos de temperatura no plano do meio – Inverno (versão 3)	125
Figura 168 – Contornos de velocidade no plano do meio – Inverno (versão 2)	126
Figura 169 – Contornos de temperatura no plano útil – Inverno (versão 2)	126
Figura 170 – Contornos de temperatura no plano útil – inverno (versão 3)	127
Figura 171 – Contornos de velocidade no plano útil – inverno (versão 2)	127

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades de cada malha	15
Tabela 2 - Parâmetros de entrada para a criação de cada malha.....	16
Tabela 3 - Temperaturas utilizadas na simulação	20
Tabela 4 - Requisitos de qualidade de cada malha	20
Tabela 5 - Discretizações espaciais utilizadas	21
Tabela 6 - Correções nos Under-Relaxation Factors	21
Tabela 7 - Condições iniciais do ar	30
Tabela 8 - Tempos computacionais por malha - Verão.....	32
Tabela 9 - Tempos computacionais por modelo - Verão	35
Tabela 10 - Velocidades nos pontos de estudo - Verão.....	36
Tabela 11 - Temperaturas nos pontos de estudo - Verão.....	36
Tabela 12 - Caudais nas grelhas de extracção - Verão	36
Tabela 13 - Tempos computacionais por malha - Inverno.....	48
Tabela 14 - Tempos computacionais por modelo - Inverno	51
Tabela 15 - Velocidades nos pontos de estudo - Inverno	52
Tabela 16 - Temperaturas nos pontos de estudo - Inverno.....	52
Tabela 17 - Caudais nas grelhas de extracção - Inverno	52

Nomenclatura

Alfabeto Grego:

Γ_k – Coeficiente de difusão de k

Γ_ω – Coeficiente de difusão de ω

Γ_ϕ – Coeficiente de difusão de ϕ

k – Energia cinética de turbulência

η – Factor de eficácia

ρ – Massa volúmica ou densidade absoluta

α_k – Número de Prandtl inverso efectivo para k

α_ε – Número de Prandtl inverso efectivo para ε

σ_ε – Número de Prandtl turbulento para ε

σ_k – Número de Prandtl turbulento para k

ϕ – Quantidade escalar genérica

ε – Taxa de dissipação de k

ω – Taxa de dissipação específica de k

ν – Viscosidade cinemática

μ – Viscosidade dinâmica

μ_{eff} – Viscosidade efectiva

μ_t – Viscosidade turbulenta

Alfabeto Romano:

u_i, u_j – Componente da velocidade de escoamento

Y_M – Contribuição da dilatação flutuante em turbulência compressível para a taxa de dissipação total

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, C_1, C_2$ – Coeficientes dos modelos de turbulência

D_H – Diâmetro hidráulico

Y_k – Dissipação de k devido à turbulência

Y_ω – Dissipação de ω devido à turbulência

G_k – Geração de energia cinética de turbulência

G_b – Geração de energia cinética de turbulência devido à flutuabilidade

G_ω – Geração de ω

$\overline{u'_i u'_j}$ - Média temporal de velocidades flutuantes

Re_{D_H} – Número de Reynolds através do diâmetro hidráulico

p - Pressão

S_ϕ – Quantidade de ϕ gerado por unidade de volume

S_{ij} – Taxa de deformação média

t - Tempo

R_ε – Termo adicional do modelo RNG presente na equação em ε

$S_k, S_\varepsilon, S_\omega$ – Termos definido pelo usuário

U – Velocidade do escoamento

1. INTRODUÇÃO

Actualmente é muito usual, até em países como o nosso com um clima moderado, a existência de espaços climatizados tanto no sector residencial como no dos serviços. Ninguém se imagina, por exemplo, nos dias que correm, entrar numa agência bancária ou de seguros em pleno mês de Agosto às 15 horas e deparar-se com uns desconfortáveis 35 a 40° C. É suposto, principalmente em locais público de trabalho existirem umas condições mínimas de conforto, o que em muitos aspectos facilita a vida dos utilizadores, aumentando a produtividade destes.

Cada vez mais é evidente a preocupação com o estudo do conforto térmico e da qualidade do ar interior em espaços de trabalho. De facto, na sociedade actual é muito comum a existência de uma larga fatia de população que é submetida a ambientes climatizados/ventilados durante uma grande parte do dia, seja no emprego como em lazer.

A área da Climatização encontra-se numa fase de profunda expansão em Portugal. De facto, os Decretos-Lei 78/2004 (Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do ar Interior nos Edifícios), 79/2004 (Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios) e 80/2004 (Regulamento das Características de Conforto Térmico

dos Edifícios) são um claro exemplo da procura, por parte do Estado, de melhores meios de controlo e optimização da eficiência energética em edifícios.

Uma das maiores preocupações para os projectistas de sistemas de AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) prende-se no facto destes equipamentos produzirem grandes gradientes de velocidade e temperatura que podem ser desconfortáveis a nível local. O estudo detalhado destes ambientes climatizados permitem otimizar a distribuição de ar nestes locais, diminuindo os gradientes de velocidade e temperatura, possibilitando um maior conforto e conseqüente produtividade aos utentes.

Os códigos comerciais de CFD (Computational Fluid Dynamics) são uma ferramenta poderosa e útil para o estudo destes casos pois permite examinar o escoamento de fluidos, com transmissão de calor e/ou massa, com concentração de diversas espécies, mudança de fase, reacções químicas, movimentos mecânicos, tensões, entre outros, sendo cada vez mais utilizados na análise de problemas deste âmbito. Os modelos matemáticos representativos das leis da Física que governam estes fenómenos físicos são descritos por equações diferenciais de derivadas parciais, muitos dos quais sem resolução analítica. Para a apresentação das potencialidades da modelação numérica, neste trabalho foi utilizado o código FLUENT, o qual permite a discretização das equações constituintes do modelo matemático através do método das diferenças finitas – formulação dos volumes de controlo com resolução baseada num procedimento numérico iterativo.

Desta forma, o presente trabalho visa contribuir com um estudo de conforto térmico através da análise numérica do escoamento turbulento tridimensional do ar num auditório da FEUP (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto), realizado admitindo o escoamento em regime permanente. Assim, o escoamento produzido pelos difusores de insuflação na geometria da sala em questão é, primeiramente, simulado numericamente com o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ standard de Launder e Spalding (1974), que é o modelo frequentemente utilizado nas aplicações de engenharia. Posteriormente, são usados outros quatro modelos de turbulência – modelo Realizable $k-\varepsilon$ proposto por Shih *et al.* (1994), modelo RNG $k-\varepsilon$ proposto por Yakhot *et al.* (1992), modelo $k-\omega$ standard proposto por Wilcox (1988) e o modelo de tensões de Reynolds standard (RSM) proposto por Launder (1989). A perícia de cada modelo é então avaliada, através de uma análise comparativa entre os resultados numéricos.

Este trabalho será dividido em seis capítulos os quais serão descritos brevemente a seguir.

Neste capítulo que agora termina foram descritos os objectivos deste trabalho, bem como a descrição do problema. No capítulo 2 tratar-se-ão os fundamentos matemáticos teóricos utilizados para obter as equações de Reynolds e as equações dos modelos de turbulência utilizados no trabalho. No capítulo 3 será exposta toda a modelação numérica do problema, assim como a geometria em estudo, condições de fronteira e malhas empregues na simulação numérica. No capítulo 4 serão apresentados os resultados obtidos numericamente. Será discutido também o desempenho dos modelos de turbulência, tal como considerações levadas a cabo nesta parte do trabalho. No capítulo 5 serão apresentadas as conclusões e as perspectivas para trabalhos futuros. No capítulo 6 encontram-se as referências utilizadas neste trabalho. Este trabalho será finalizado com um conjunto de anexos considerados relevantes no estudo realizado.

2. MODELAÇÃO MATEMÁTICA

Ao longo deste capítulo serão expostas as equações matemáticas usadas na simulação computacional. Serão descritas também, de forma breve, as técnicas numéricas utilizadas para a resolução destas equações. A definição do domínio de integração e as condições de fronteira serão abordadas no capítulo 3.

2.1. Equações de conservação da massa e da quantidade de movimento

O princípio fundamental de conservação de massa e quantidade de movimento dá origem à equação particular (assumindo escoamento incompressível e densidade do fluido constante ao longo de todo o escoamento) da continuidade (equação 2.1), à equação de conservação da quantidade de movimento (equação 2.2) e a equação da energia, as designadas equações de Navier-Stokes:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial p}{\partial x_j} = 0 \quad (2.3)$$

2.2. Modelo de turbulência k - ε standard (padrão)

Os mais simples modelos de turbulência são os modelos de duas equações em que a solução de duas equações de transporte em separado permite que a velocidade turbulenta e escalas de comprimento sejam determinadas de forma independente. O padrão - modelo presente no ANSYS FLUENT cai dentro desta classe de modelos e tornou-se o predilecto nos cálculos de escoamentos de práticas de engenharia na época, uma vez que foi proposta por Launder e Spalding. Robustez, economia e razoável precisão para uma ampla gama de escoamentos turbulentos explica a sua popularidade em simulações de escoamento industrial e de transferência de calor. É um modelo semi-empírico, e a derivação das equações do modelo baseia-se tanto em considerações fenomenológicas como em empirismo.

Como os pontos fortes e fracos do modelo k - ε standard se tornaram conhecidos, melhorias foram feitas no modelo para melhorar seu desempenho. Duas dessas variantes estão disponíveis no ANSYS FLUENT: o modelo RNG k - ε e o modelo Realizable k - ε .

O modelo k - ε standard é um modelo semi-empírico com base em equações de transporte modelo para a energia cinética da turbulência (k) e a sua taxa de dissipação (ε). A equação de transporte modelo para k é derivada da equação exacta, enquanto a equação de transporte modelo de ε foi obtida através de raciocínio físico e tem pouca semelhança com a sua homóloga matematicamente exacta.

No cálculo do modelo k - ε standard, o pressuposto é que o escoamento é totalmente turbulento, e os efeitos da viscosidade molecular são negligenciáveis. O modelo k - ε standard portanto é válido apenas para os escoamentos total e completamente turbulentos.

2.2.1. Equações de transporte

A energia cinética da turbulência, κ , e a sua taxa de dissipação, ε , são obtidas das equações de transporte que se seguem:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\kappa u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho\varepsilon + S_k \quad (2.4)$$

e,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} + S_\varepsilon \quad (2.5)$$

Nestas equações, G_k representa a produção de energia cinética da turbulência devido ao gradiente de velocidade média, calculada conforme descrito na equação (2.6).

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (2.6)$$

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ e $C_{3\varepsilon}$ são constantes. σ_k e σ_ε são os números de Prandtl turbulentos para k e ε , respectivamente.

2.2.2. Modelação da viscosidade turbulenta

A viscosidade turbulenta, μ_t , é calculada pela seguinte combinação de κ e ε :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (2.7)$$

onde, C_μ é uma constante.

2.2.3. Constantes do modelo

As constantes do modelo têm os seguintes valores padrão:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_\kappa = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

2.3. Modelo de turbulência RNG k - ε

2.3.1. Equações de transporte

O modelo RNG k - ε tem uma forma similar à do modelo k - ε padrão:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\kappa u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.8)$$

e,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (2.9)$$

Nestas equações, G_k representa a geração de energia cinética da turbulência devido ao gradiente de velocidade média, calculada conforme descrito na equação (2.5).

σ_k e σ_ε são os efectivos inversos números de Prandtl turbulentos para k e ε , respectivamente.

Mais detalhes deste modelo podem ser consultados em ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide, USA, 2009.

2.4. Modelo de turbulência Realizable k - ε

2.4.1. Equações de transporte

As equações de transporte para k e ε no modelo Realizable k - ε são:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\kappa u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_\kappa \quad (2.10)$$

e,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (2.11)$$

onde,

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$$

$$\eta = S \frac{\kappa}{\varepsilon}$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

Nestas equações, G_κ representa a geração de energia cinética da turbulência devido ao gradiente de velocidade média, calculada conforme descrito na equação (2.6).

$C_{1\varepsilon}$ e C_2 são constantes. σ_κ e σ_ε são os efectivos inversos números de Prandtl turbulentos para κ e ε , respectivamente.

Para uma descrição mais pormenorizada deste modelo pode-se consultar ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide, USA, 2009.

2.5. Modelo de turbulência k - ω padrão

2.5.1. Equações de transporte

A energia cinética de turbulência, k , e a taxa de dissipação específica, ω , são obtidas das seguintes equações de transporte:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\kappa u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (2.12)$$

e,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (2.13)$$

Nestas equações, G_k representa a produção de energia cinética da turbulência devido ao gradiente de velocidade média.

G_ω representa a produção de ω .

Γ_k e Γ_ω representam a difusibilidade efectiva de k e ω , respectivamente.

Y_k e Y_ω representam a dissipação de k e ω devido à turbulência.

Em ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide, USA, 2009, podem-se ver mais detalhes deste modelo.

2.6. Modelo de turbulência RSM (Reynolds Stress Model)

2.6.1. Equações de transporte

As equações de transporte exactas para o transporte de tensões de Reynolds, $\overline{\rho u'_i u'_j}$, podem ser escritas do seguinte modo:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{\rho u_k u'_i u'_j}) \\ &= -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + p(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j) \right] + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right] \\ & - \rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) - \rho \beta (g_i \overline{u'_j \theta} + g_j \overline{u'_i \theta}) + p \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \\ & - 2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} - 2\rho \Omega_k (\overline{u'_j u'_m} \varepsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \varepsilon_{jkm}) + S_{user} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Cada termo desta equação tem um significado físico específico, a saber:

- 1°. Derivação Local de Tempo
- 2°. Convecção - C_{ij}
- 3°. Difusão de Turbulência - $D_{T,ij}$
- 4°. Difusão Molecular - $D_{L,ij}$
- 5°. Produção de Tensão - P_{ij}
- 6°. Produção de Flutuabilidade - G_{ij}
- 7°. Tensão de Pressão - ϕ_{ij}
- 8°. Dissipação - ϵ_{ij}
- 9°. Produção pela Rotação do Sistema – F_{ij}
- 10°. Termo definido pelo usuário

De entre os vários termos atrás mencionados, C_{ij} , $D_{L,ij}$, P_{ij} e F_{ij} não requerem qualquer modelação. No entanto, $D_{T,ij}$, G_{ij} , ϕ_{ij} e ϵ_{ij} necessitam ser modelados para fechar as equações. As hipóteses de modelação necessárias para fechar o grupo de equações podem ser vistas em maior detalhe em ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide, USA, 2009.

3. SIMULAÇÃO EM CFD

3.1. Modelação numérica

O modelo numérico intrinsecamente implementado no código utilizado, baseia-se na discretização das equações diferenciais por meio das diferenças finitas – formulação de volumes de controlo, dada por:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\rho U \phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_k} \right) = S_\phi$$

(3.1)

Apesar de algumas diferenças relativas à implementação, a discretização dos termos convectivos nas equações de transporte relativas aos volumes de controlo para as variáveis dependentes é realizada pelos esquemas clássicos, bem como a resolução do conjunto de equações algébricas, faz uso dos algoritmos cuja descrição pormenorizada pode ser encontrada em [Patankar, 1980]. Todas as particularidades relativas à descrição dos modelos matemáticos e à implementação dos modelos numéricos pode ser encontrada em [FLUENT, 2009].

3.2. Geometria

Toda a parte correspondente à geometria do modelo e criação das respectivas malhas foi executada a partir do ANSYS Workbench (Ambiente de trabalho do ANSYS).

Numa primeira fase foi tratada toda a parte geométrica do auditório. Para isso utilizou-se a aplicação Design Modeler, que permitiu modelar a geometria da sala através das plantas presentes no Anexo A.

Note-se que existem algumas discrepâncias entre os desenhos de projecto e a configuração real do auditório. Foi então decidido, devido à dificuldade acrescida dada a maior complexidade do modelo real, que a partir deste ponto se utilizaria como modelo do caso estudado as condições de projecto obtidas.

O programa em si funciona com o mesmo princípio que qualquer programa de modelação 3D (como o SolidWorks, por exemplo), em que foi desenhado um Sketch num determinado plano-base, e através de operações como *Extrude/Add Material*, *Extrude/Cut Material* e *Extrude/Imprint Faces* modelou-se toda a geometria do caso estudado. Na figura seguinte é apresentada a geometria criada em perspectiva isométrica, podendo ser observadas outras vistas no Anexo B:

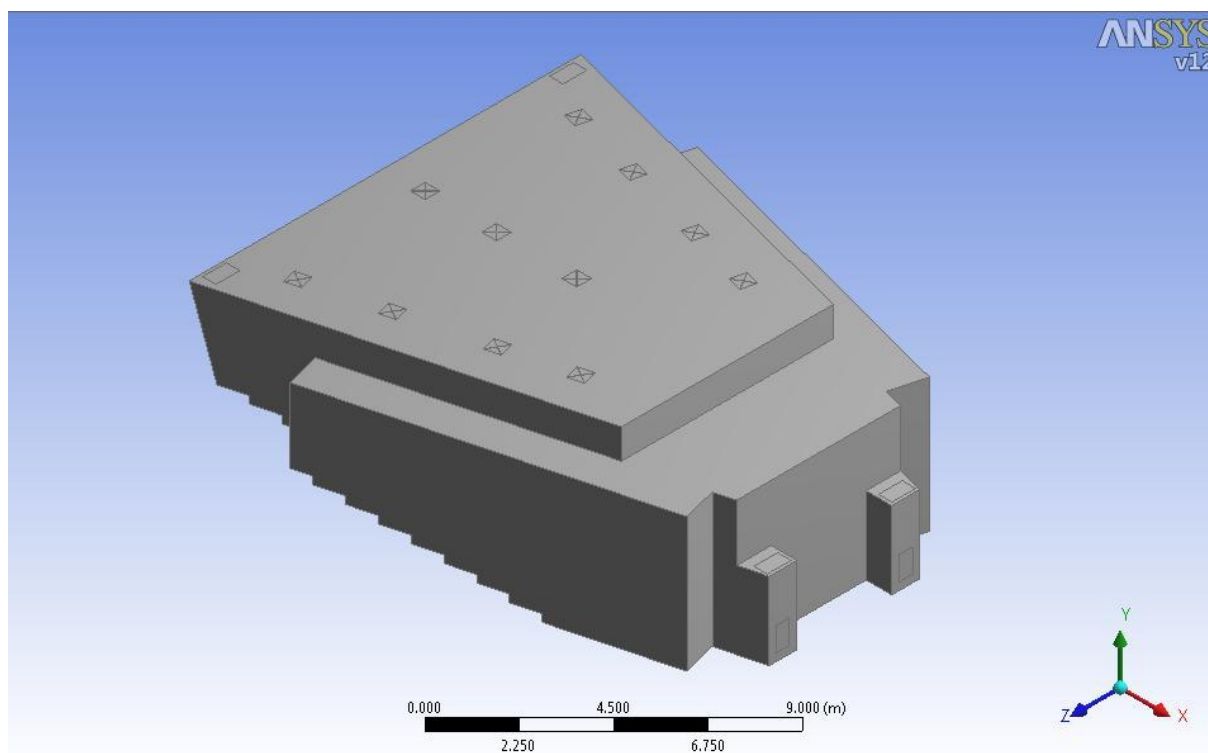


Figura 1 - Perspectiva isométrica da geometria do auditório

3.3. Malhas

Seguidamente, e ainda no ANSYS Workbench foi executada a opção *Meshing* que permite obter as malhas para o caso estudado.

Para a realização das simulações inerentes a este trabalho foram criadas 3 malhas distintas, a partir do método *CFX-Mesh*.

Modelada a geometria do auditório, passou-se à definição de cada uma das 3 malhas a utilizar. Assim, decidiu-se a adopção de uma malha mais grosseira (malha 1), uma intermédia (malha 2) e uma mais refinada (malha 3). Na figura seguinte pode-se observar um exemplo duma malha criada, no caso a malha intermédia, em perspectiva isométrica:

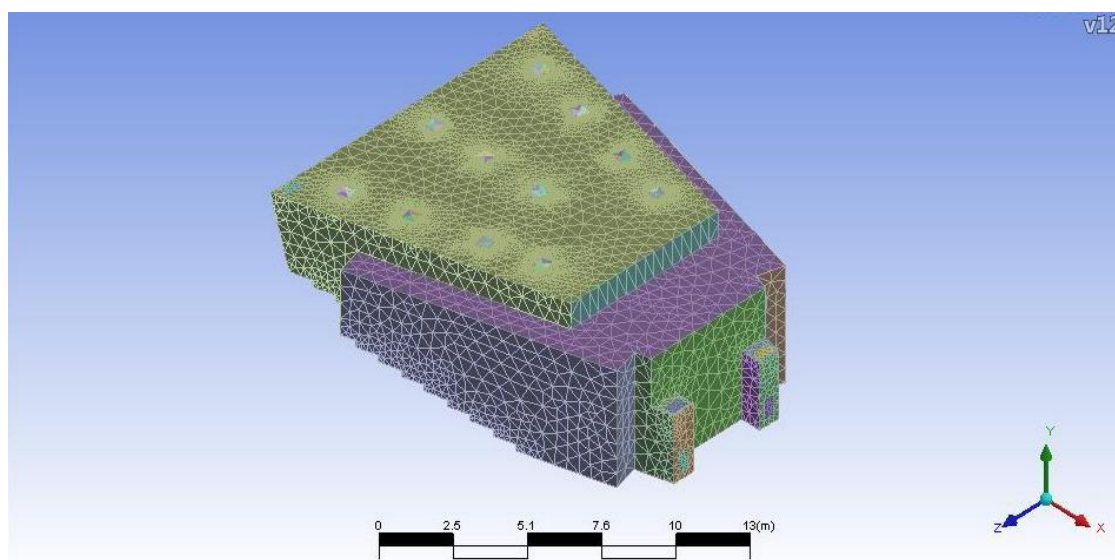


Figura 2 - Perspectiva isométrica da malha intermédia

As duas outras malhas criadas podem ser observadas no Anexo B, no entanto as principais propriedades de cada malha encontram-se na tabela seguinte:

Tabela 1 - Propriedades de cada malha

	Malha Grosseira	Malha Intermédia	Malha Fina
Nº total de nós	104912	101615	168912
Nº total de tetraedros	380725	361273	569411
Nº total de pirâmides	6939	6588	6627
Nº total de prismas	60953	61318	118871
Nº total de elementos	448617	429179	694909

Estas malhas foram, como já foi acima mencionado, obtidas utilizando a ferramenta *Meshing* do ANSYS Workbench, e dentro desta foi utilizada a opção *CFX-Mesh*.

Esta opção necessita de certos parâmetros de entrada para a obtenção de cada malha, que podem ser consultados na seguinte tabela:

Tabela 2 - Parâmetros de entrada para a criação de cada malha

		Malha Grosseira	Malha Intermédia	Malha Fina	
Spacing	Maximum Spacing [m]	0.75	0.5	0.25	
	Face Spacing 1	Option	Constant	Constant	Constant
		Constant Edge Length [m]	0.12	0.08	0.04
		Radius of Influence [m]	0	0	0
		Expansion Factor	1.3	1.3	1.3
		Location	Inlets	Inlets	Inlets
	Face Spacing 2	Option	Constant	Constant	Constant
		Constant Edge Length [m]	0.3	0.2	0.1
		Radius of Influence [m]	0	0	0
		Expansion Factor	1.3	1.3	1.3
Location		VentOuts	VentOuts	VentOuts	
Inflation	Number of Inflated Layers	5	5	5	
	Expansion Factor	1.2	1.2	1.2	
Inflated Boundary	Location	Default 2D	Default 2D	Default 2D	
		Region	Region	Region	
	Maximum Thickness [m]	0.75	0.5	0.25	

De referir, como informação adicional, que todos os outros parâmetros em jogo presentes na criação das malhas pelo *CFX-Mesh* mantiveram-se intactos, isto é, com os seus valores padrão. Na tabela anterior encontram-se a azul os valores que variaram efectivamente na criação de cada malha.

3.4. Condições de fronteira

Terminado este processo seguiu-se a fase de pré-processamento no ANSYS FLUENT. Para isso foram definidas as condições de fronteira do sistema, para cada modelo. Estas podem ser observadas na figura seguinte:

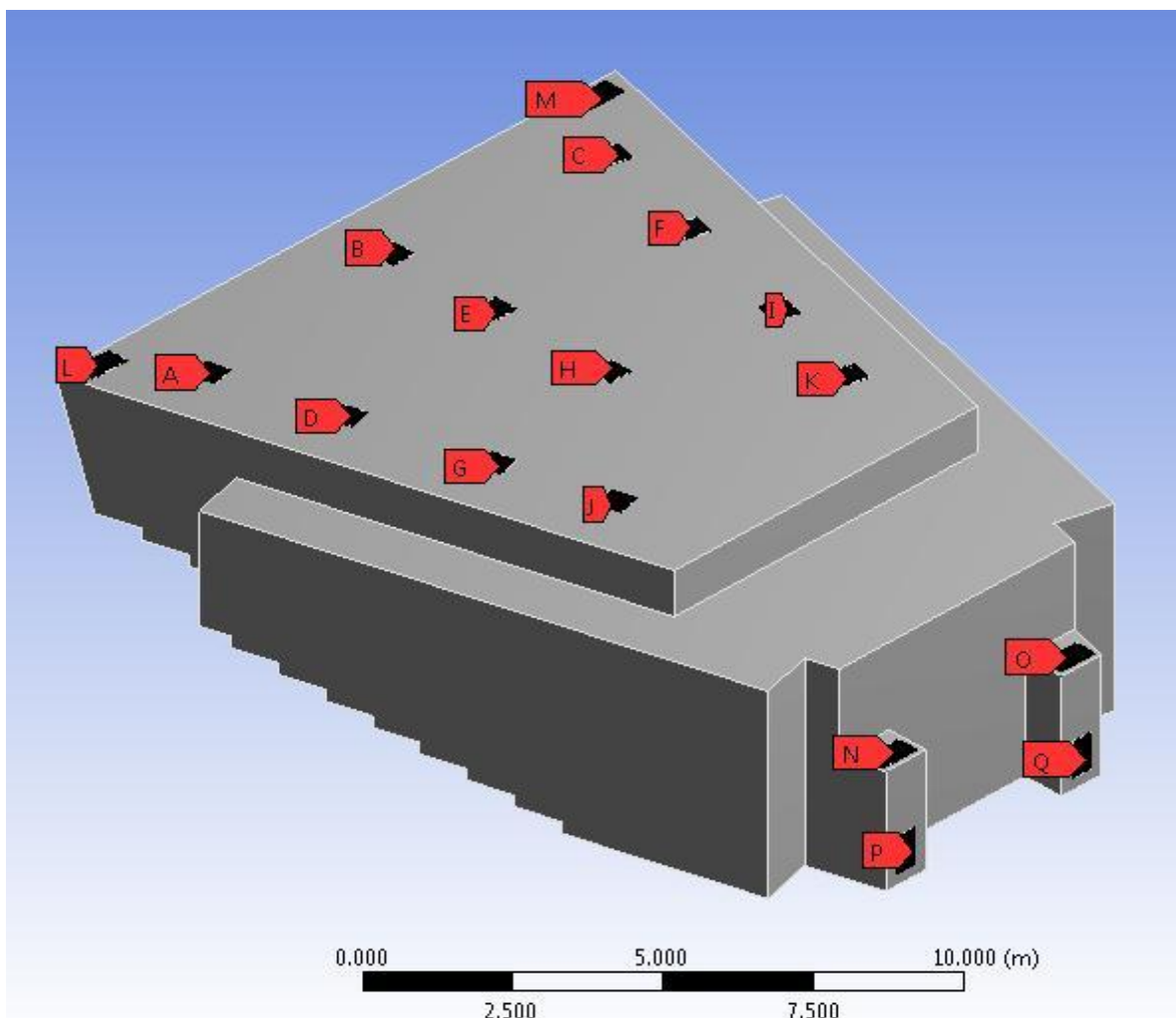


Figura 3 - Condições de fronteira do anfiteatro estudado

Legenda:

A a K – *Inlets* (Insuflações) 1 a 11, respectivamente

L – *VentOut* t-e (Extracção Traseira-Esquerda)

M – *VentOut* t-d (Extracção Traseira-Direita)

N – *VentOut* h-e (Extracção Horizontal-Esquerda)

O – *VentOut* h-d (Extracção Horizontal-Direita)

P – *VentOut* v-e (Extracção Vertical-Esquerda)

Q – *VentOut* v-d (Extracção Vertical-Direita)

Há que realçar também o facto de que cada *Inlet* foi subdividido em 4 partes simétricas de modo a que a insuflação se procedesse segundo essas mesmas 4 direcções, por convenção foram adoptadas as notações dos quatro pontos cardeais (Norte - N, Sul - S, Este - E e Oeste - W). Este pormenor pode ser visualizado com maior detalhe na figura seguinte:

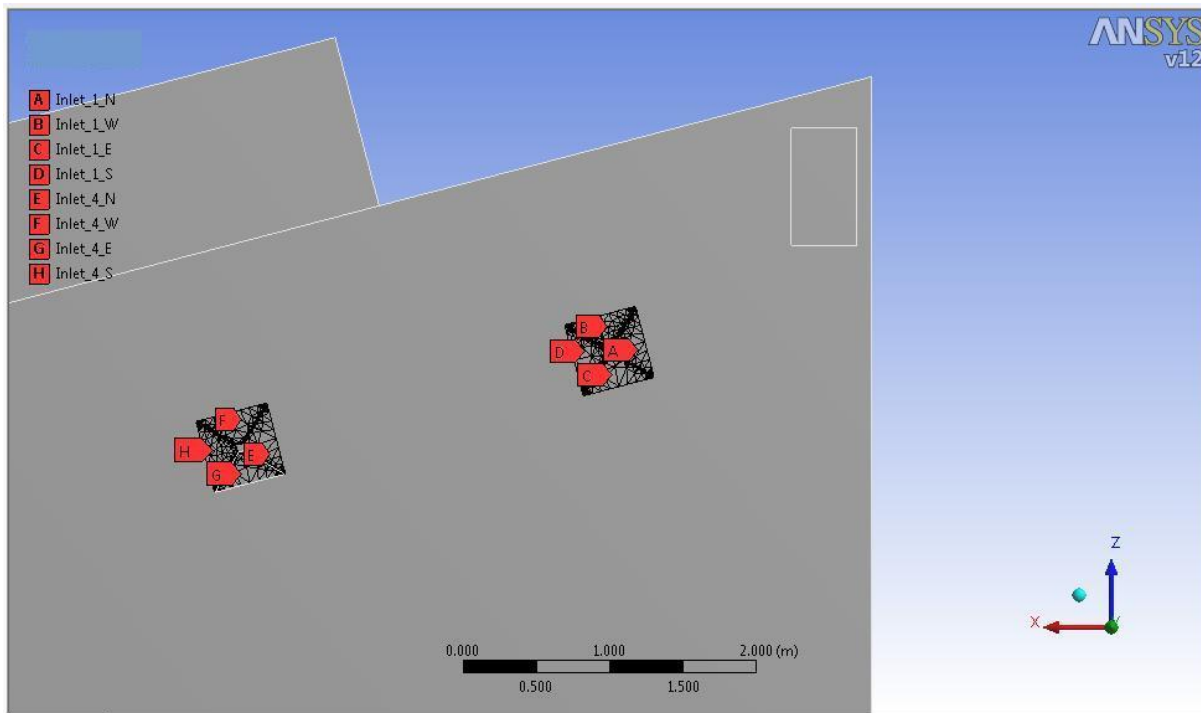


Figura 4 - Pormenor da nomenclatura das grelhas de insuflação (*Inlets*)

3.5. Cálculos prévios

Neste passo foram realizados alguns cálculos prévios necessários à aplicação do modelo no software ANSYS FLUENT.

As velocidades dos jactos nos difusores de insuflação foram calculadas para o caso de caudal máximo de projecto de $1000 \text{ m}^3/\text{h}$, sabendo que a área de cada difusor é de $0,5 \times 0,5$ (m). Ora, como se dividiu esta área em 4 subáreas iguais, de forma trapezoidal, como mostrado na figura 5, impôs-se então um caudal máximo de $250 \text{ m}^3/\text{h}$ em cada subárea (de área efectiva igual a $0,06 \text{ m}^2$). Foi então obtida uma velocidade de entrada, em cada subdivisão de cada *Inlet*, de $1,165 \text{ m/s}$.

Aplicou-se o mesmo procedimento para o cálculo das velocidades de extracção, sabendo que o caudal de extracção de projecto era de $1750 \text{ m}^3/\text{h}$ em cada *VentOut*. Sendo a área efectiva de cada um destes de $0,8 \times 0,45$ (m) ($0,36 \text{ m}^2$) foi obtida uma velocidade de saída, na extracção, de $1,35 \text{ m/s}$.

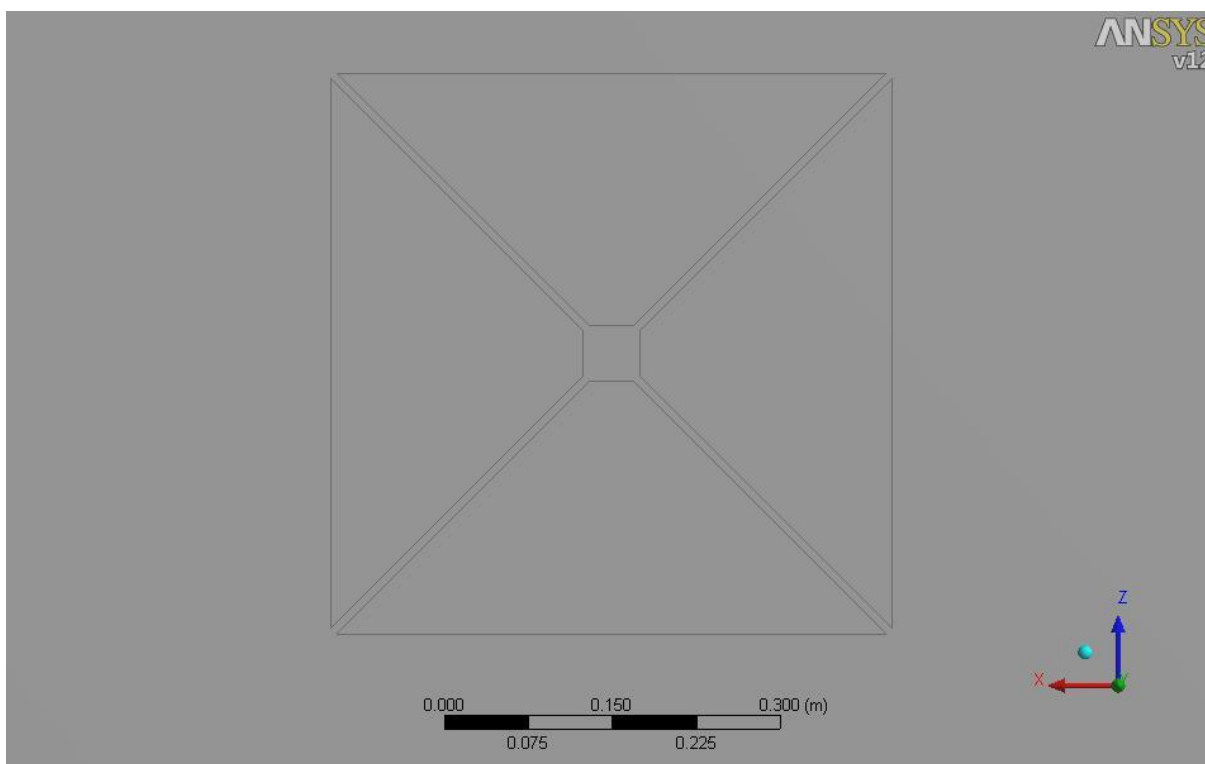


Figura 5 - Pormenor das subdivisões de cada *Inlet*

Seguidamente foi necessário calcular os diâmetros hidráulicos de cada subdivisão dos *Inlets* e dos *VentOuts*. Para o cálculo do diâmetro hidráulico foi utilizada a seguinte equação:

$$D_h = \frac{4A}{P_w} \quad (3.2)$$

De onde se obteve $D_h = 0,2045$ m para cada secção de cada *Inlet* e $D_h = 0,576$ m para cada *VentOut*.

A partir destes dados foram obtidos os números de Reynolds correspondentes a cada escoamento, de onde se obtiveram $Re_{D_H} = 16310$ para o caso da secção de cada *Inlet* e $Re_{D_H} = 53233$ no caso de cada *VentOut*.

Finalmente, através destes dados é possível obter a Intensidade de Turbulência, definida através da seguinte expressão:

$$I \equiv \frac{u'}{u_{avg}} = 0.16(Re_{D_H})^{-1/8} \quad (3.3)$$

De onde se obtiveram $I = 4,76\%$ para cada secção de cada *Inlet* e $I = 4,11\%$ para cada *VentOut*.

Foram admitidas duas estações diferentes que tiveram que ter sido levadas em conta:

- Situação de Verão
- Situação de Inverno

Outro aspecto essencial neste estudo é o facto de ter sido simulada a situação de anfiteatro lotado, ou seja, com a capacidade máxima. Ora, a maneira como se contornou este problema foi admitir um piso radiante, com temperatura constante, de maneira a simular a presença de pessoas.

Assim, foram definidos os seguintes parâmetros para os casos mencionados:

Tabela 3 - Temperaturas utilizadas na simulação

Temperatura (°C)	Verão	Inverno
Insuflação/Extracção	25	20
Piso	27	18
Paredes	29	15

3.6. Condições de entrada na simulação

Após todos estes processos procedeu-se à passagem para o ANSYS FLUENT como ferramenta de trabalho e à correspondente importação de cada malha.

Aqui surgiu um dos maiores e principais problemas neste estudo, senão o maior, que foi a constatação de que nenhuma das malhas cumpria um dos requisitos de qualidade do FLUENT (*Maximum Cell Skewness*). Este facto pode ser observado na tabela seguinte:

Tabela 4 - Requisitos de qualidade de cada malha

	Malha Grosseira	Malha Intermédia	Malha Fina
Maximum Cell Squish	0,976709	0,976386	0,976664
Maximum Cell Skewness	0,999992	0,999855	0,999840
Maximum Aspect Ratio	358,894	202,305	204,718

De facto, o valor limite que o programa aconselha como máximo de *Skewness* é de 0,95, alertando para o facto de malhas com valores superiores, como é o caso, poderem ter dificuldades na convergência.

Como solução para este problema foram seguidas as recomendações obtidas em [FLUENT, 2009], que passavam essencialmente pela abordagem de dois campos distintos, a saber:

- **Solution Methods**

Como recomendado para este caso optou-se pelo esquema SIMPLEC, com correcção de *Skewness* de nível 5.

As discretizações espaciais utilizadas encontram-se na tabela seguinte:

Tabela 5 - Discretizações espaciais utilizadas

Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	Standard
Momentum	First Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	First Order Upwind
Turbulent Dissipation Rate	First Order Upwind
Energy	First Order Upwind

- **Solution Controls**

Neste campo foi adoptada, como foi sugerida, uma correcção nos valores de *Under-Relaxation Factors*. A tabela seguinte mostra os valores por defeito do programa e as modificações efectuadas:

Tabela 6 - Correcções nos Under-Relaxation Factors

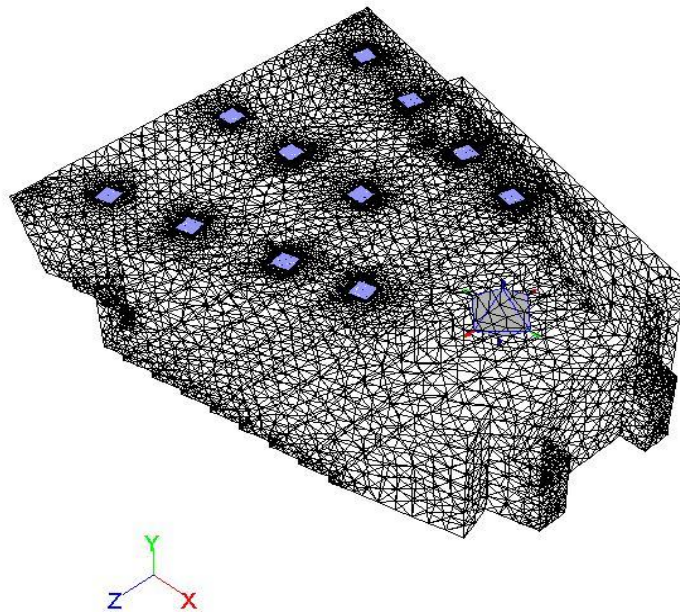
Factor	Padrão	Modificado
Pressure	0,3	0,2
Density	1	1
Body Forces	1	1
Momentum	0,7	0,5
Turbulent Kinetic Energy	0,8	0,4
Turbulent Dissipation Rate	0,8	0,4
Turbulent Viscosity	1	1
Energy	1	0,95

Finalmente, e concluindo este capítulo, há que realçar a criação de diversos pontos, linhas e planos na malha de forma a poder facilitar a análise dos resultados.

Assim, foram criados 5 pontos, dispostos em forma de cruz no auditório e a cerca de 1,50 m do solo, de modo a simular a cabeça de um utente do auditório, por excesso (normalmente, a altura média de uma pessoa sentada é 1,20 m). Sendo a cabeça um dos pontos mais sensíveis do corpo humano é muitas vezes um avaliador natural de conforto térmico, em parâmetros como a velocidade do ar e a temperatura.

De seguida mostram-se as perspectivas isométricas de cada um dos 5 pontos, no entanto, encontram-se no Anexo B as diferentes vistas, de cada um dos planos espaciais, de cada ponto. Atente-se também na notação de cada ponto, realizada por simplificação.

Ponto b-d (Baixo-Direita)

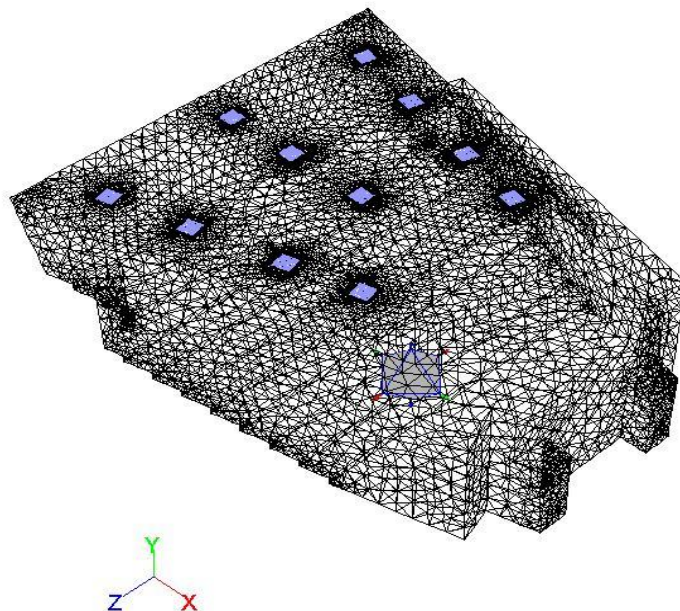


Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

Figura 6 - Perspectiva isométrica do ponto b-d

Ponto b-e (Baixo-Esquerda)

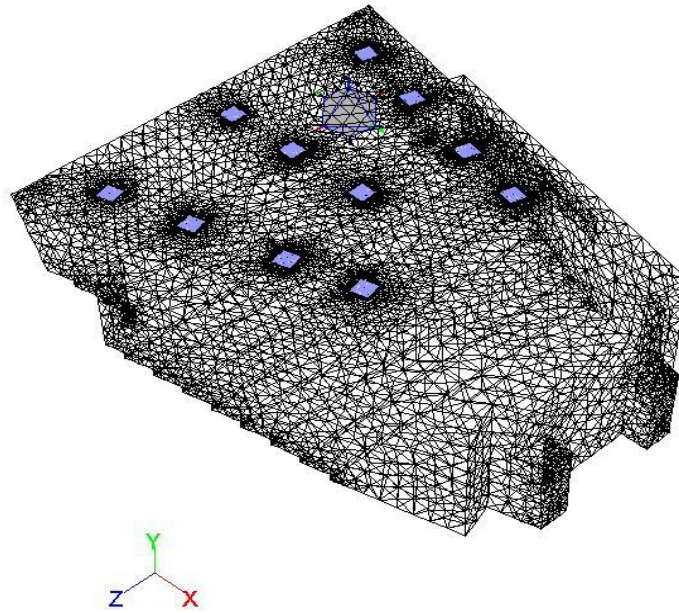


Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

Figura 7 - Perspectiva isométrica do ponto b-e

Ponto c-d (Cima-Direita)

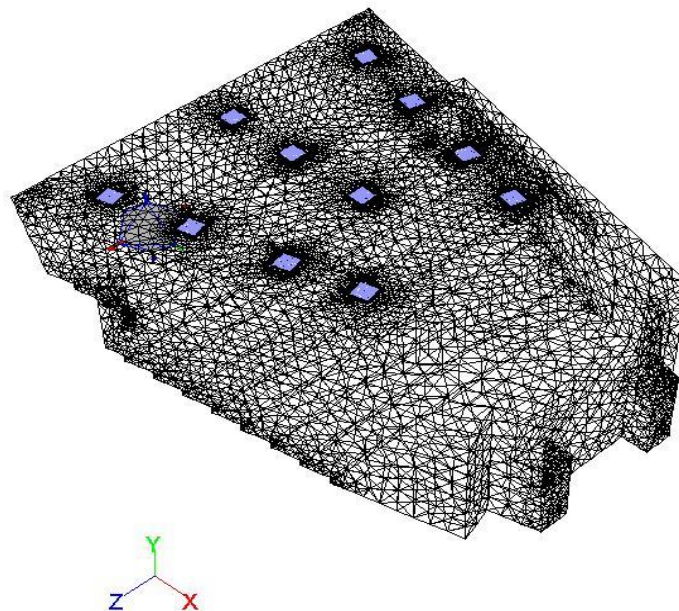


Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

Figura 8 - Perspectiva isométrica do ponto c-d

Ponto c-e (Cima-Esquerda)

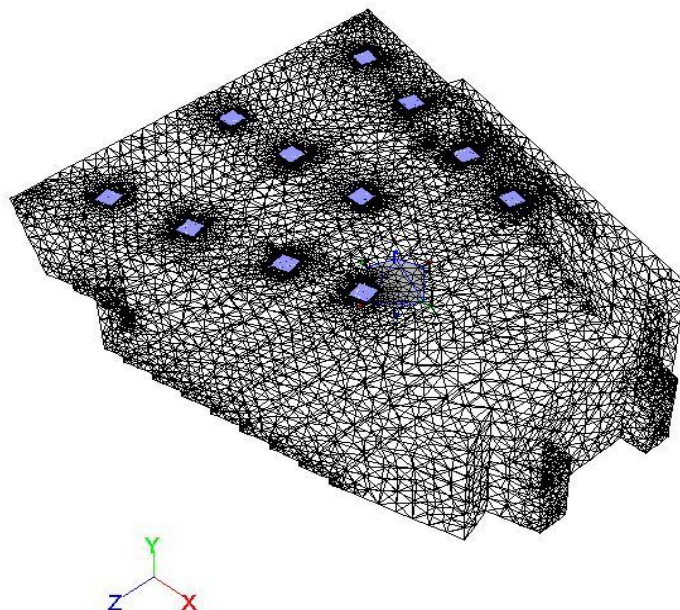


Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

Figura 9 - Perspectiva isométrica do ponto c-e

Ponto central



Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

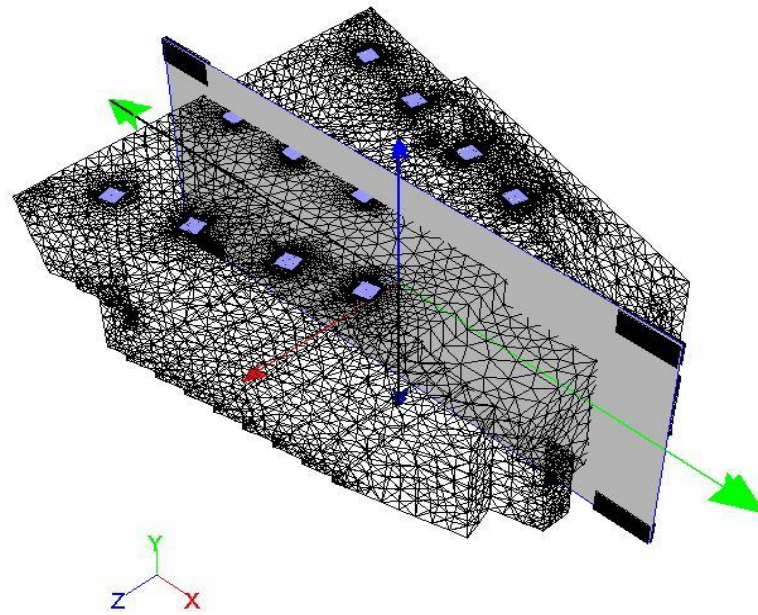
Figura 10 - Perspectiva isométrica do ponto central

Da mesma maneira foram criados 3 planos com o mesmo objectivo de facilitar a compreensão dos resultados obtidos.

Os planos em questão são o plano de simetria do auditório (paralelo ao plano xOy), o plano do meio, situado a meio do auditório segundo a coordenada x (e paralelo ao plano yOz) e finalmente o chamado plano útil que é aquele que é paralelo ao piso encontrando-se 1,5 m acima deste.

Como no caso anterior serão mostradas agora as perspectivas isométricas dos supracitados planos, lembrando que podem ser consultadas as restantes vistas no Anexo B.

Plano de simetria

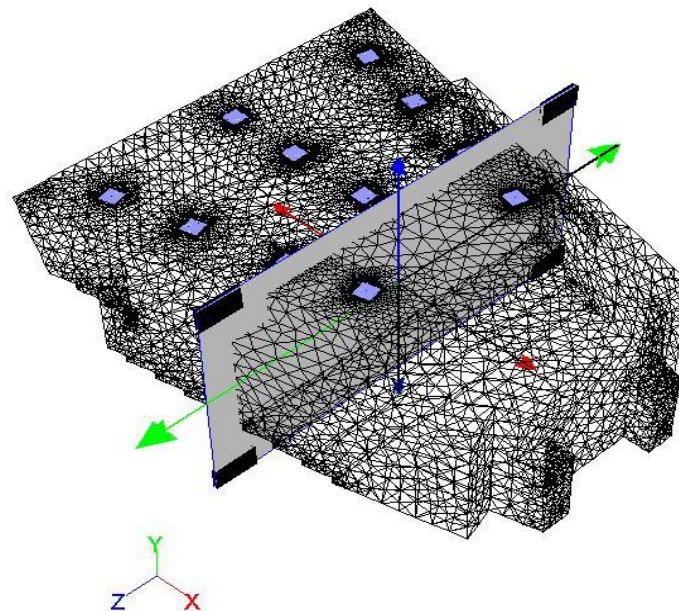


Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

Figura 11 - Perspectiva isométrica do plano de simetria

Plano do meio

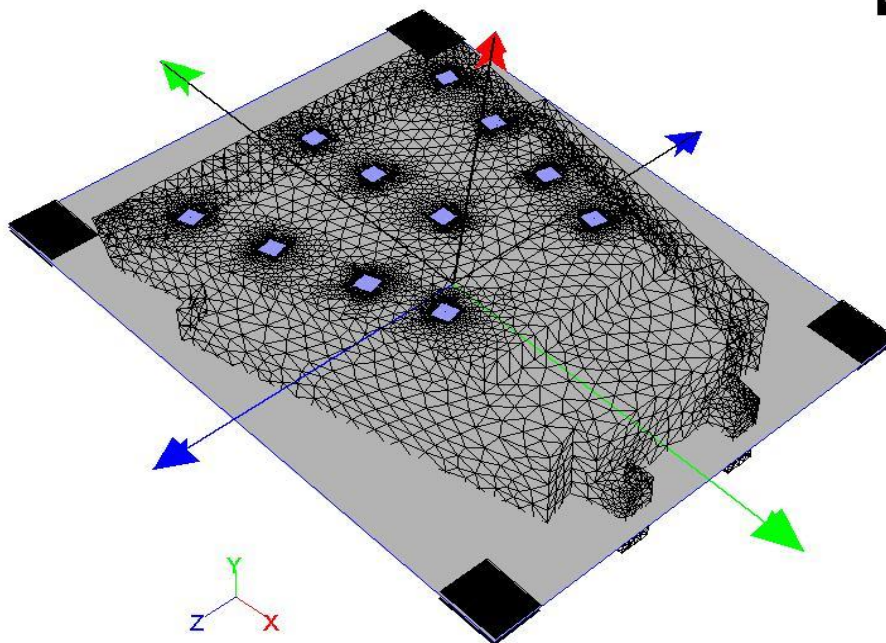


Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

Figura 12 - Perspectiva isométrica do plano do meio

Plano útil



Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

Figura 13 - Perspectiva isométrica do plano útil

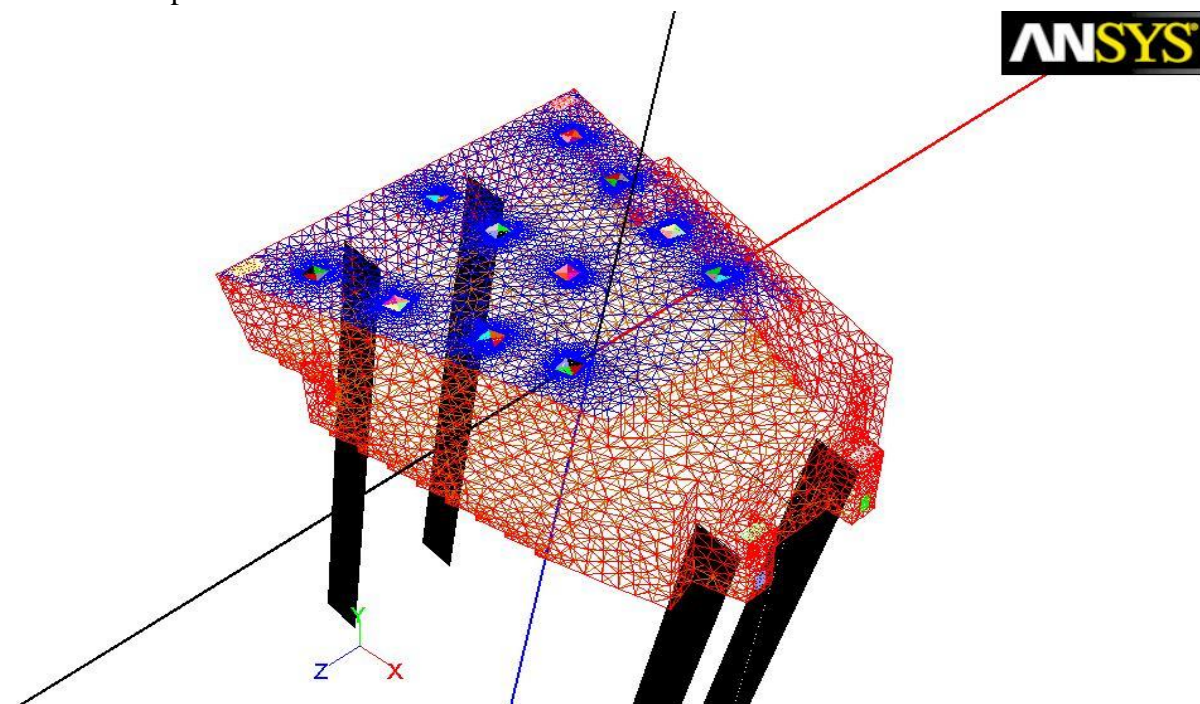
Finalmente foram criadas 6 linhas de modo a se poderem obter gráficos da evolução da velocidade e da temperatura ao longo das mesmas.

Estas rectas estão divididas em dois grupos de 3 cada, em que no primeiro grupo se encontram as rectas à altura de 1,5 m do solo, com altura (eixo y) e comprimento (eixo x) constantes em que a variação existente entre elas é a largura (distância segundo o eixo z). No segundo grupo as rectas estão também a uma altura de 1,5 m do piso e são paralelas ao eixo z, estando espaçadas entre si tanto em altura (eixo y) como em comprimento (eixo x).

Estas linhas não são de fácil visualização pelo que foram utilizadas cores de modo a facilitar o visionamento. Para uma mais fácil compreensão informa-se que a linha em questão é a linha preta lisa (não a negrito) onde as suas extremidades estão rodeadas por duas faixas pretas.

Como no caso anterior serão mostradas agora as perspectivas isométricas destas linhas, lembrando que podem ser consultadas as restantes vistas no Anexo B.

1º Grupo - Linha Central

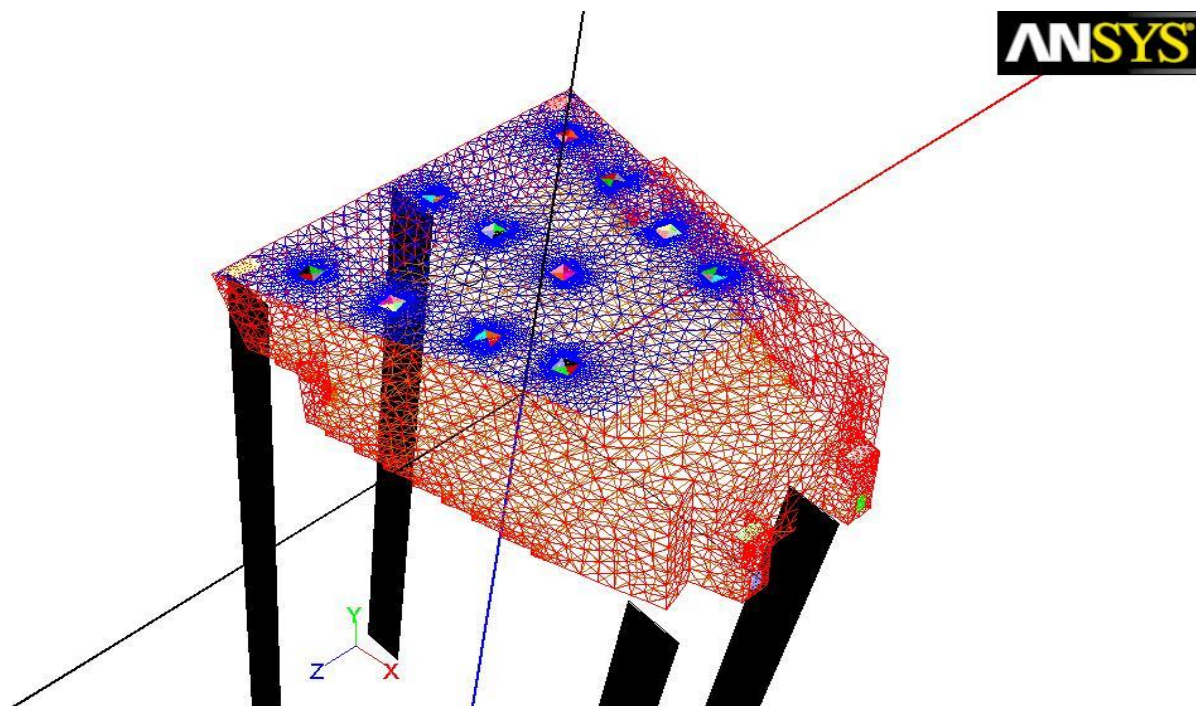


Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

Figura 14 - Perspectiva isométrica da linha central

1º Grupo - Linha Esquerda

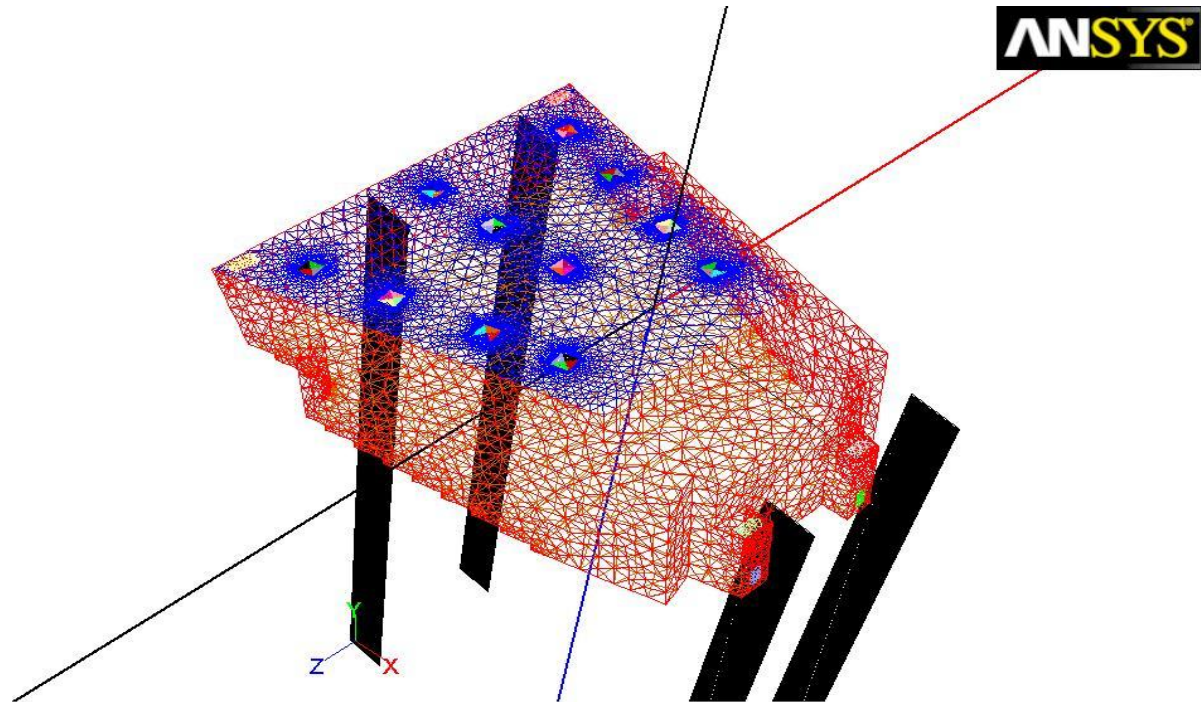


Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

Figura 15 - Perspectiva isométrica da linha da esquerda

1º Grupo - Linha Direita

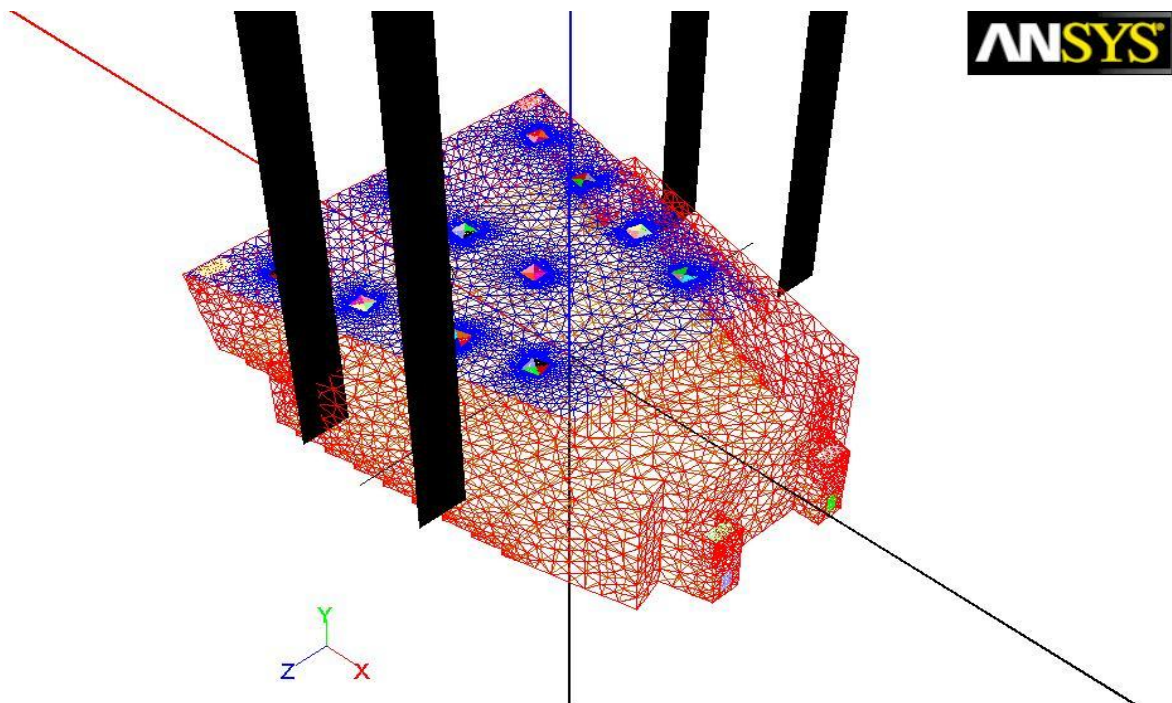


Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

Figura 16 - Perspectiva isométrica da linha da direita

2º Grupo – Linha Meio



Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

Figura 17 - Perspectiva isométrica da linha do meio

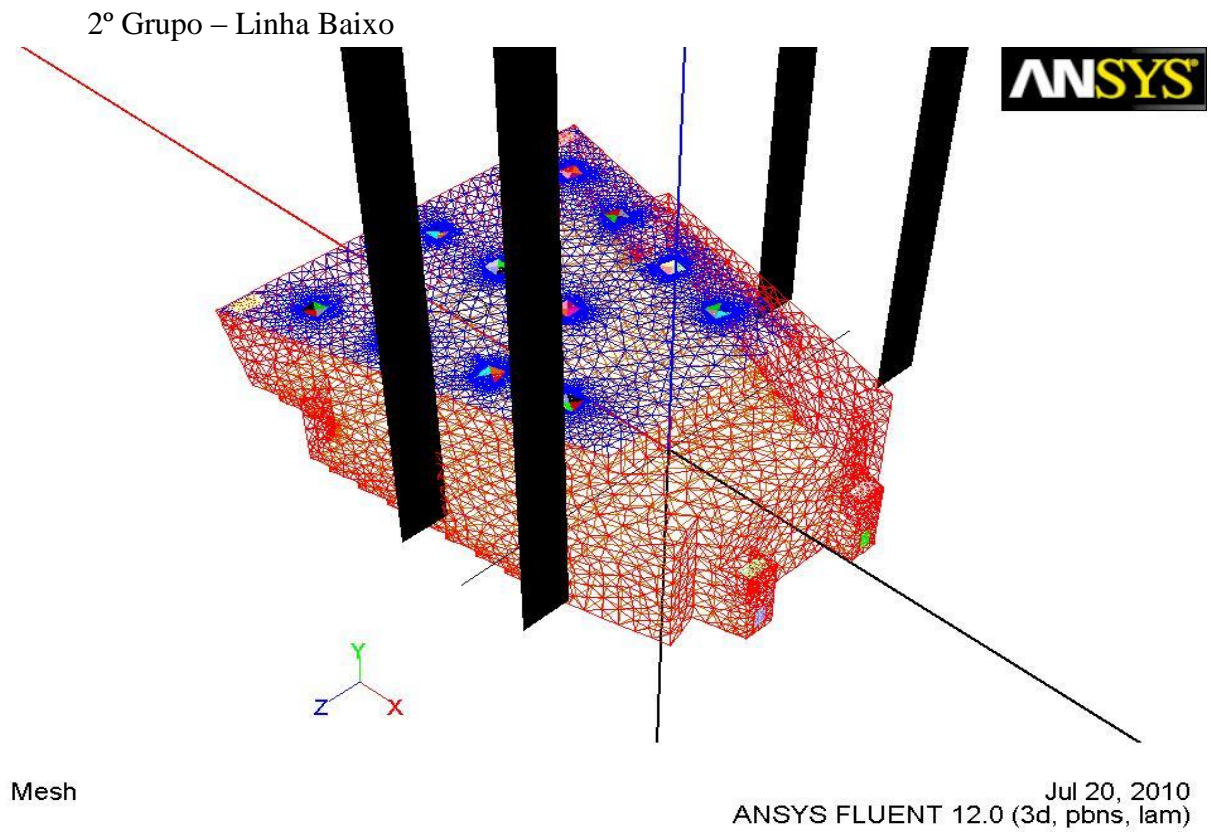


Figura 18 - Perspectiva isométrica da linha de baixo

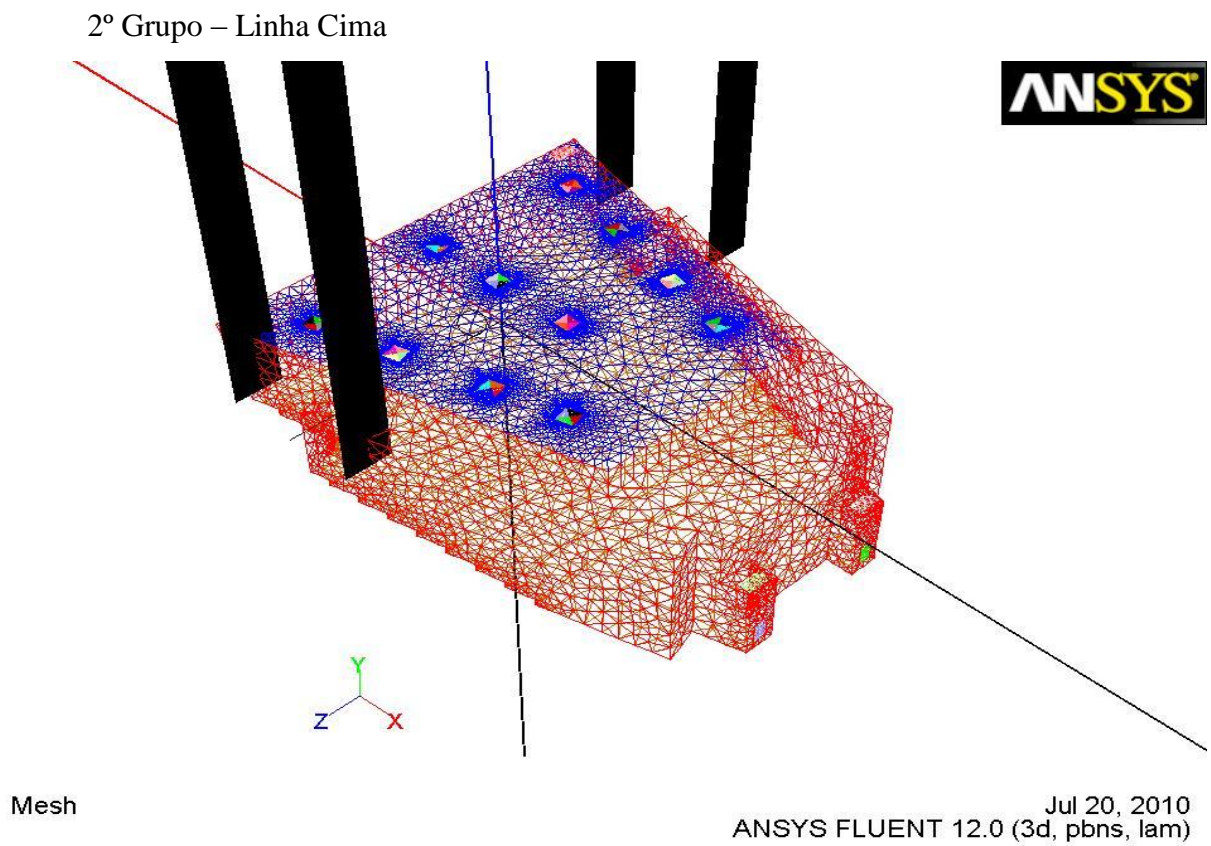


Figura 19 - Perspectiva isométrica da linha de cima

Note-se também que nas condições iniciais, foram adoptadas as seguintes características para o ar:

Tabela 7 - Condições iniciais do ar

Densidade (Kg/m ³)	1,225
Cp (Calor Específico) (J/Kg-K)	1006,43
Condutividade Térmica (W/m-K)	0,0242
Viscosidade Dinâmica (Kg/m-s)	1,7894e-05

De referir também que os *Inlets* foram definidos como *velocity-inlet*, os *VentOuts* como *exhaust-fan* e o piso e restantes paredes como *wall*.

Na secção *Monitors*, na subsecção de resíduos foram definidos os valores de critério absoluto de convergência de 1e-06 para a equação da energia e de 0,001 para todas as restantes. Foi definido um número máximo de 1500 iterações para cada modelo.

Finalmente tem que referir que se admitiu a existência de gravidade, na direcção y, com o valor escalar de aceleração de 9,81 m/s².

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo vão-se abordar os resultados mais significativos das várias simulações efectuadas, tais como a comparação de malhas, a comparação dos vários modelos, a selecção do modelo utilizado e a apresentação de imagens e gráficos desse mesmo modelo.

Tem também que se referir que este capítulo se vai dividir nas secções de Verão e de Inverno pois são duas situações de tal forma distintas que justificam esta abordagem.

Cada item será alvo de uma nota ou um pequeno comentário descritivo do que se observou, no entanto, toda essa informação será compilada e apresentada com mais rigor no próximo capítulo.

Posto isto, vai-se começar por analisar primeiramente a situação de Verão e posteriormente a situação de Inverno.

4.1. Verão

4.1.1. Comparação de malhas

Como critérios de comparação de malhas vão-se usar os tempos computacionais que foram necessários em cada malha e os respectivos resultados.

Nesta fase do trabalho, foi utilizado o modelo Standard $k-\varepsilon$ para todas as malhas, de forma a só se estudar o efeito da variação da malha.

Assim, em termos de tempos computacionais necessários para cada malha temos a seguinte informação tabelada:

Tabela 8 - Tempos computacionais por malha - Verão

Malha	Tempo	Iterações para convergência
Grosseira (Malha 1)	7h54m	Não Convergiu
Intermédia (Malha 2)	2h57m	535
Fina (Malha 3)	3h38m	470

Em termos de resultados obtidos mostram-se em seguida as temperaturas e velocidades nos pontos estudados e os caudais de extracção nos *VentOuts*:

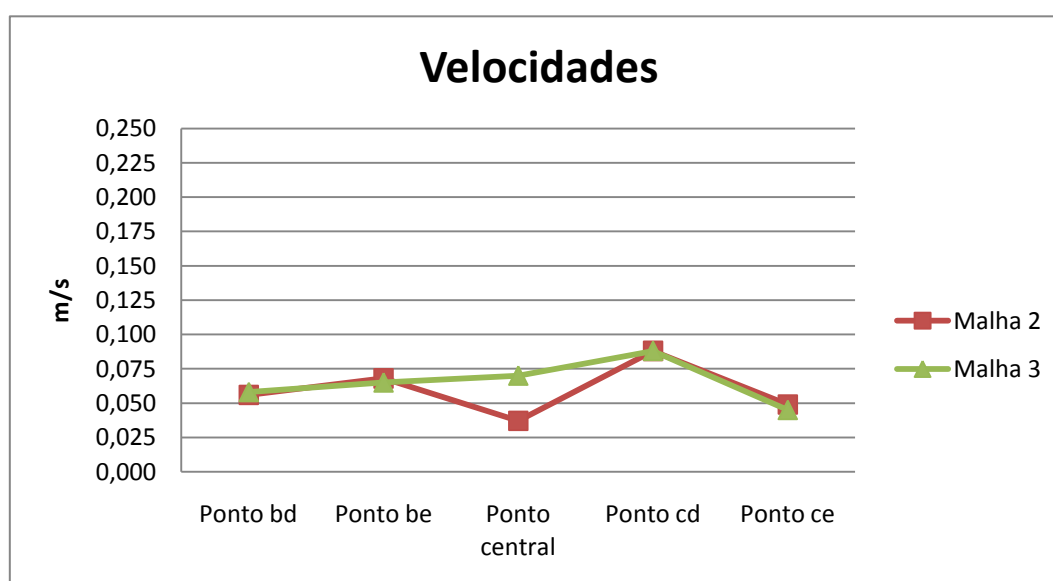


Figura 20 - Velocidades nos pontos de estudo por malha - Verão

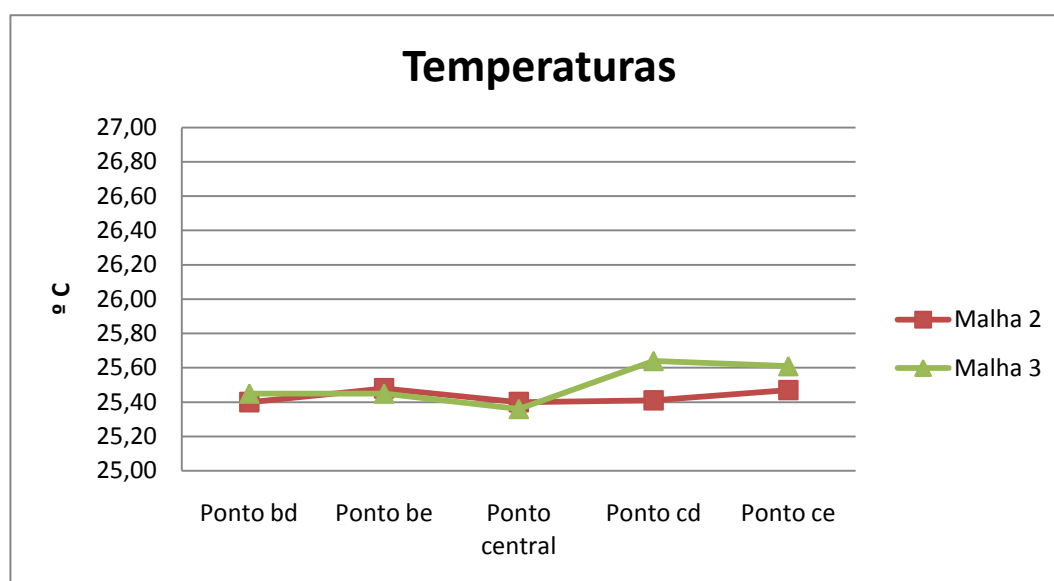


Figura 21 - Temperaturas nos pontos de estudo por malha - Verão

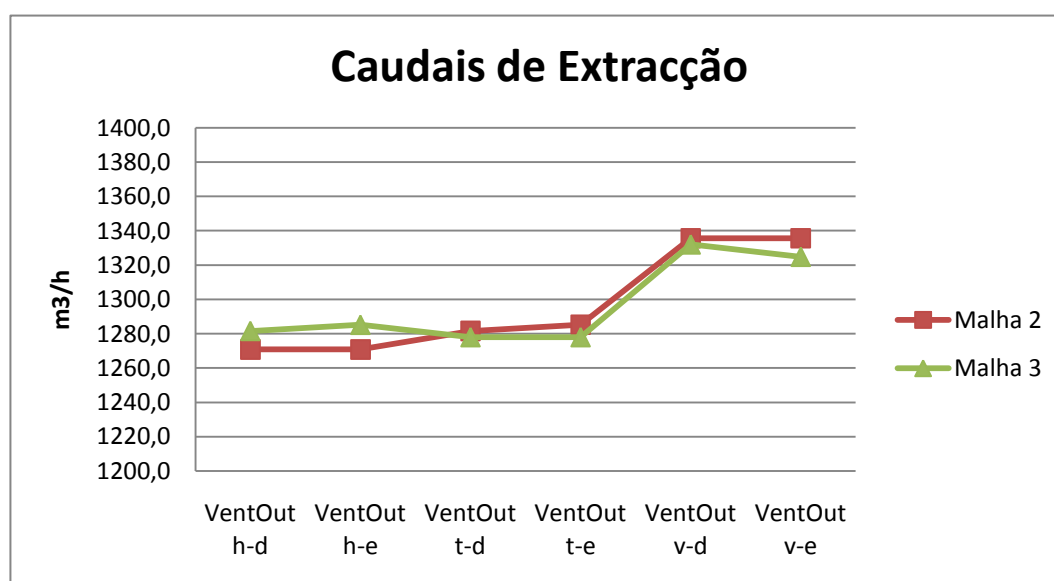


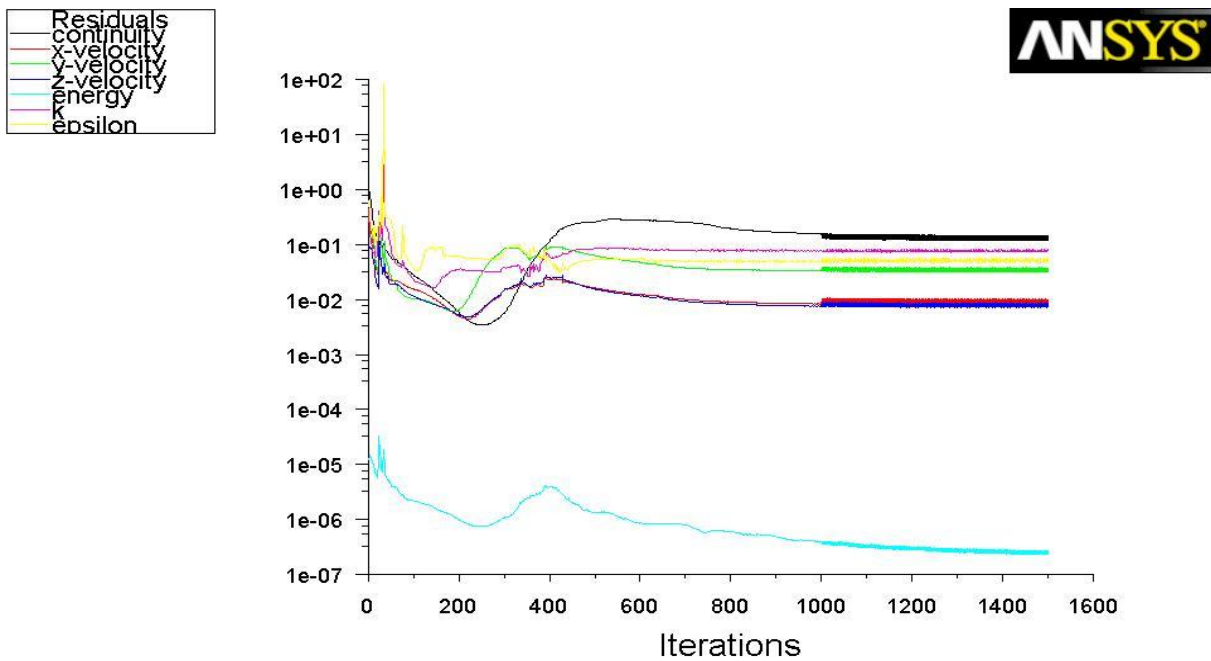
Figura 22 - Caudais de extracção nos VentOuts por malha - Verão

Com base nestes resultados foi decidido utilizar a malha 2 (malha intermédia) pois os resultados das velocidades, temperaturas e caudais de extracção são muito semelhantes, no entanto o tempo computacional gasto foi cerca de 20% inferior ao da malha 3 (malha fina).

Note-se que ao fim de 1500 iterações a malha 1 (malha grosseira) não atingiu os critérios de convergência pelo que não foram tomados em conta os seus resultados.

Mostram-se finalmente os valores residuais de cada simulação, para cada malha utilizada:

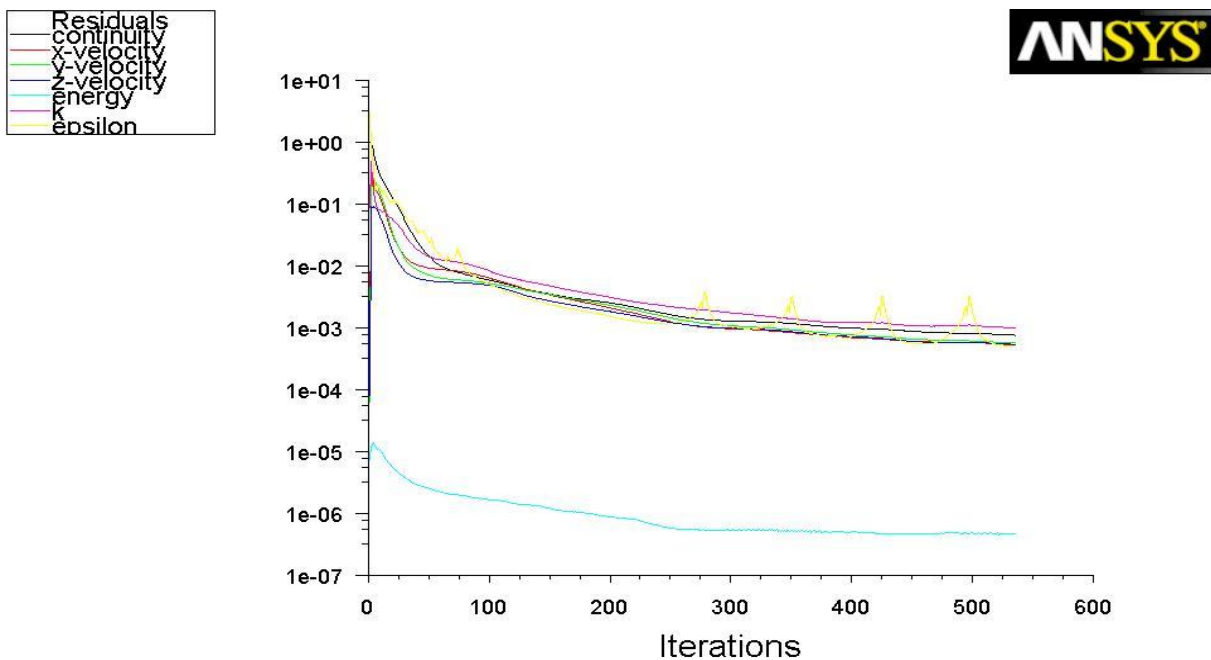
Malha 1 (Grosseira)



Scaled Residuals

Jul 19, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, ske)Figura 23 - Resíduos para o modelo standard $k-\epsilon$ – Malha 1 (grosseira) - Verão

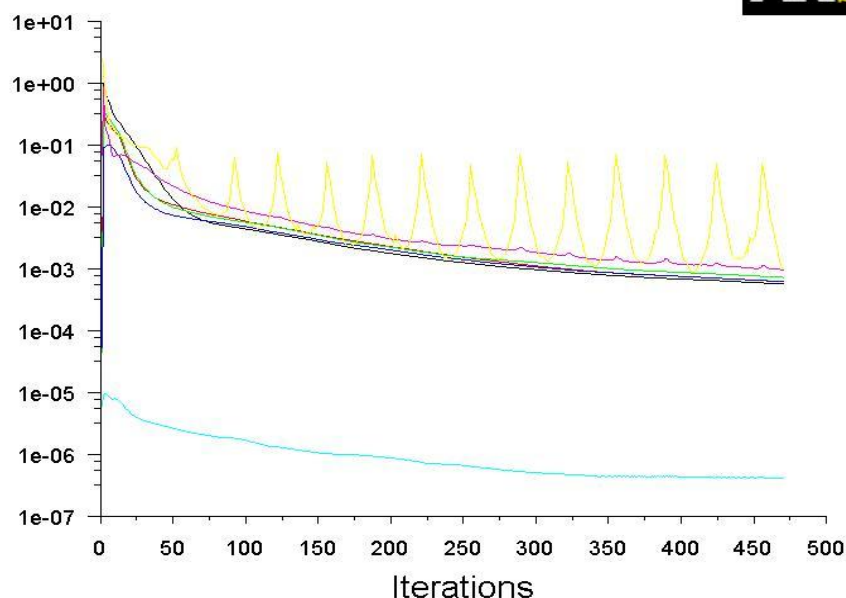
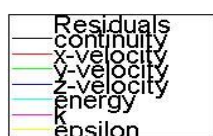
Malha 2 (Intermédia)



Scaled Residuals

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, ske)Figura 24 - Resíduos para o modelo standard $k-\epsilon$ – Malha 2 (intermédia) - Verão

Malha 3 (Fina)



Scaled Residuals

 Jul 19, 2010
 ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, ske)
Figura 25 - Resíduos para o modelo standard $k-\epsilon$ – Malha 3 (fina) – Verão

4.1.2. Comparação de modelos

Após a decisão da utilização da malha intermédia, nesta fase do trabalho vão-se apresentar os tempos computacionais necessários para a simulação de cada modelo, as tabelas e gráficos das velocidades e temperaturas dos pontos de estudo e os caudais de extracção dos *VentOuts* e os resíduos de cada simulação.

Apresentam-se então em primeiro lugar os tempos computacionais necessários para cada simulação:

Tabela 9 - Tempos computacionais por modelo - Verão

Modelo	Tempo	Iterações para convergência
Standard $k-\epsilon$	2h57m	535
RNG $k-\epsilon$	7h54m	Não Convergiu
Realizable $k-\epsilon$	3h57m	814
Standard $k-\omega$	2h14m	414
RSM	6h43m	1065

4.1.3. Velocidades e temperaturas nos pontos de estudo

Seguidamente são aqui mostradas as tabelas com as velocidades e as temperaturas obtidas para os pontos em estudo, tal como os caudais de extracção nos *VentOuts*.

Tabela 10 - Velocidades nos pontos de estudo - Verão

Velocidades (m/s)					
Modelo	Ponto b-d	Ponto b-e	Ponto central	Ponto c-d	Ponto c-e
Standard $k-\varepsilon$	0,056	0,068	0,037	0,088	0,049
Realizable $k-\varepsilon$	0,057	0,062	0,057	0,099	0,059
Standard $k-\omega$	0,057	0,066	0,034	0,084	0,047
RSM	0,068	0,061	0,067	0,105	0,073

Tabela 11 - Temperaturas nos pontos de estudo - Verão

Temperaturas (°C)					
Modelo	Ponto b-d	Ponto b-e	Ponto central	Ponto c-d	Ponto c-e
Standard $k-\varepsilon$	25,40	25,48	25,40	25,41	25,47
Realizable $k-\varepsilon$	25,43	25,48	25,40	25,44	25,44
Standard $k-\omega$	25,47	25,42	25,38	25,47	25,40
RSM	25,42	25,49	25,43	25,42	25,45

Tabela 12 - Caudais nas grelhas de extracção - Verão

VentOuts - Caudais (m ³ /h)						
Modelo	VentOut h-d	VentOut h-e	VentOut t-d	VentOut t-e	VentOut v-d	VentOut v-e
Standard $k-\varepsilon$	1270,8	1270,8	1281,6	1285,2	1335,6	1335,6
Realizable $k-\varepsilon$	1270,8	1274,4	1278,0	1288,8	1335,6	1328,4
Standard $k-\omega$	1267,2	1270,8	1288,8	1296,0	1335,6	1324,8
RSM	1278,0	1278,0	1270,8	1274,4	1342,8	1335,6

Os correspondentes gráficos associados a estas tabelas apresentam-se seguidamente:

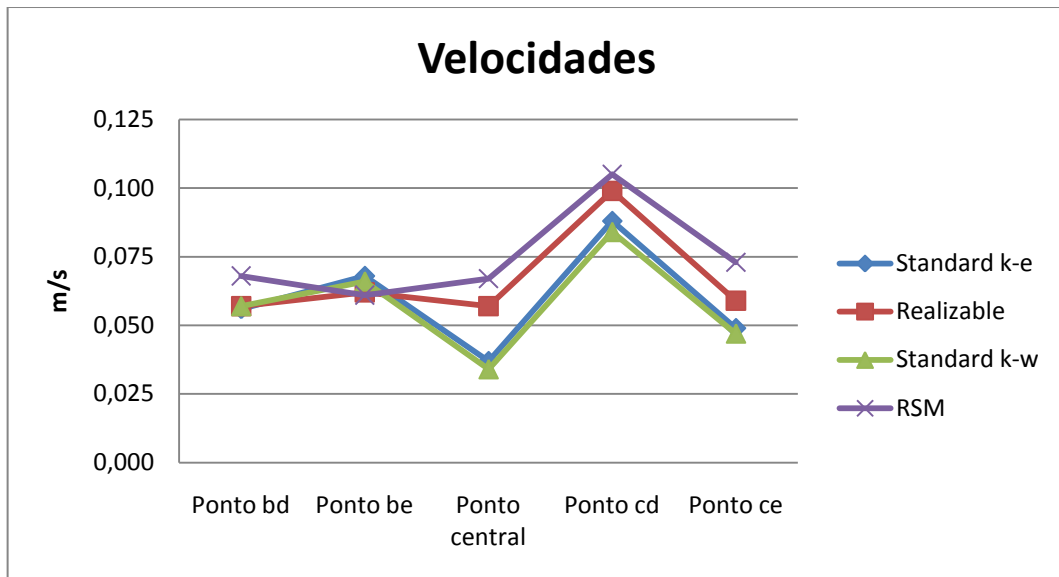


Figura 26 - Velocidades nos pontos de estudo por modelo - Verão

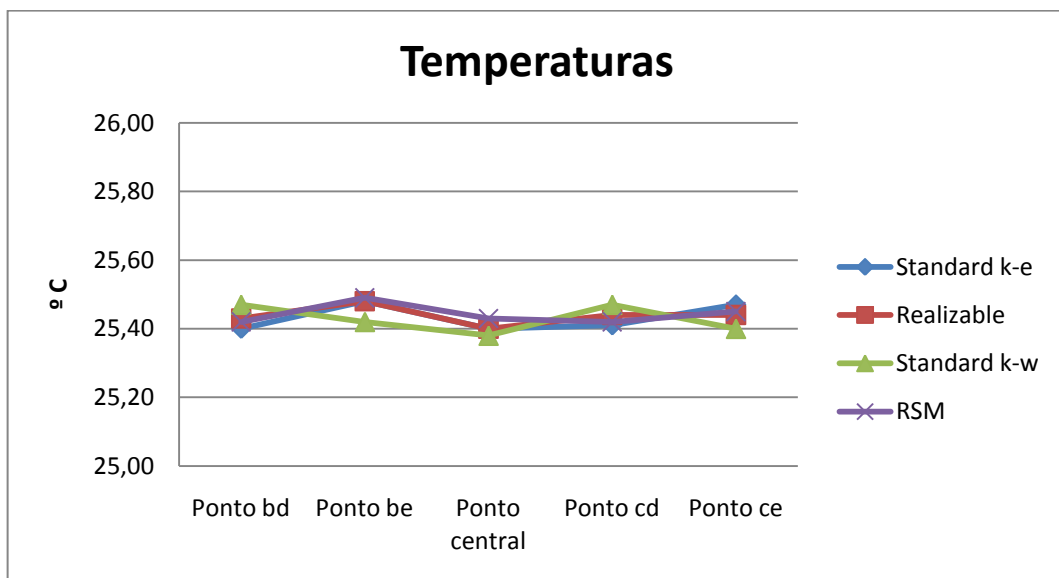


Figura 27 - Temperaturas nos pontos de estudo por modelo - Verão

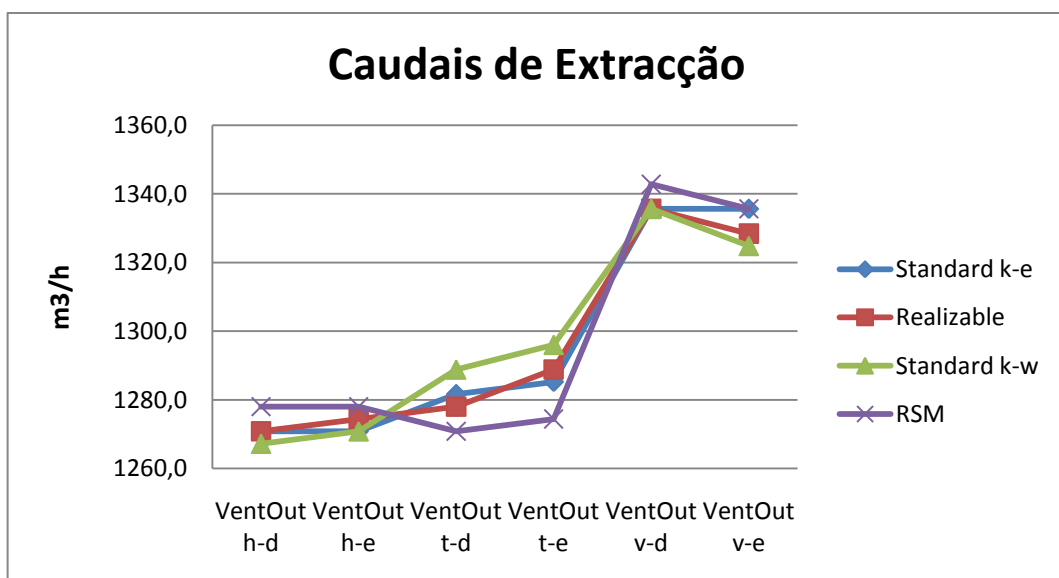


Figura 28 - Caudais de extracção nos VentOuts por modelo - Verão

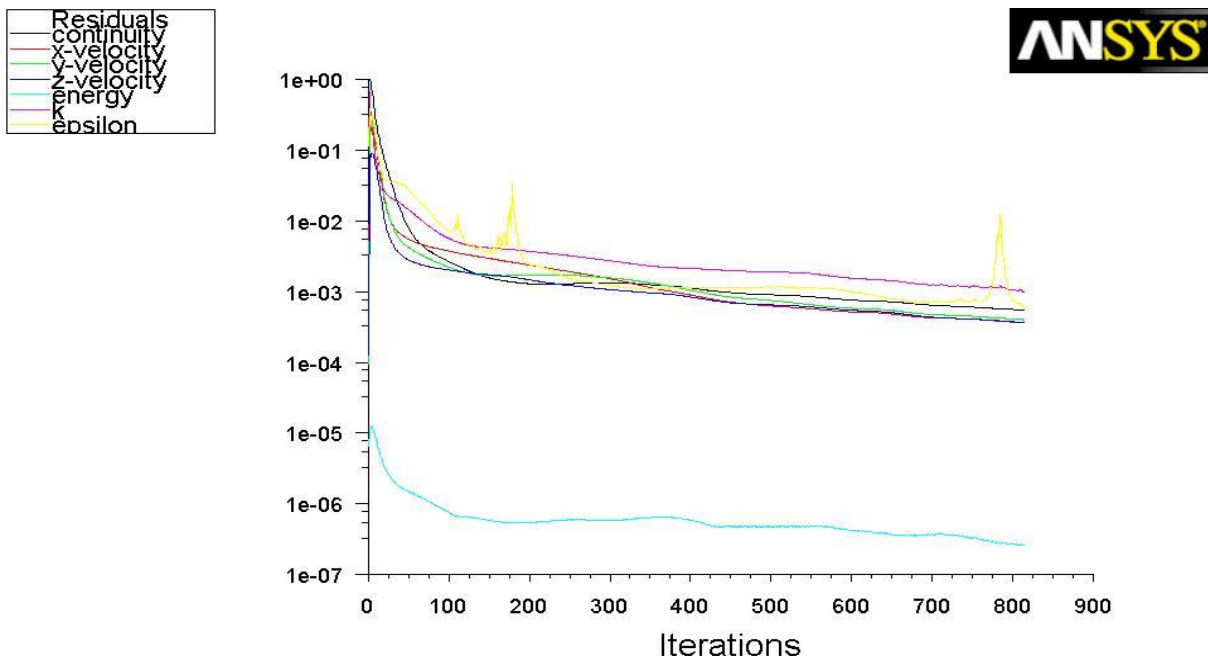
Como não se verificou convergência, após 1500 iterações, no modelo RNG $k-\varepsilon$ os seus dados não foram tomados em conta neste estudo.

Encontram-se no Anexo C presentes estes mesmos gráficos mas com diferentes resoluções de escala.

Com base nestes resultados, para a decisão de qual modelo utilizar, foi primeiramente excluído o modelo RSM pelo longo tempo computacional que requer. De entre os outros modelos decidiu-se optar pelo modelo Realizable $k-\varepsilon$, pois tirando uma ou outra excepção é aquele que apresenta os resultados mais intermédios em comparação com os outros 3 modelos, tanto nas velocidades e temperaturas dos pontos como nos caudais de extracção.

Finalmente apresentam-se os valores residuais obtidos para cada simulação, em cada modelo, sabendo que os do modelo Standard $k-\varepsilon$ já se encontram na fig. 24:

Modelo Realizable $k-\varepsilon$

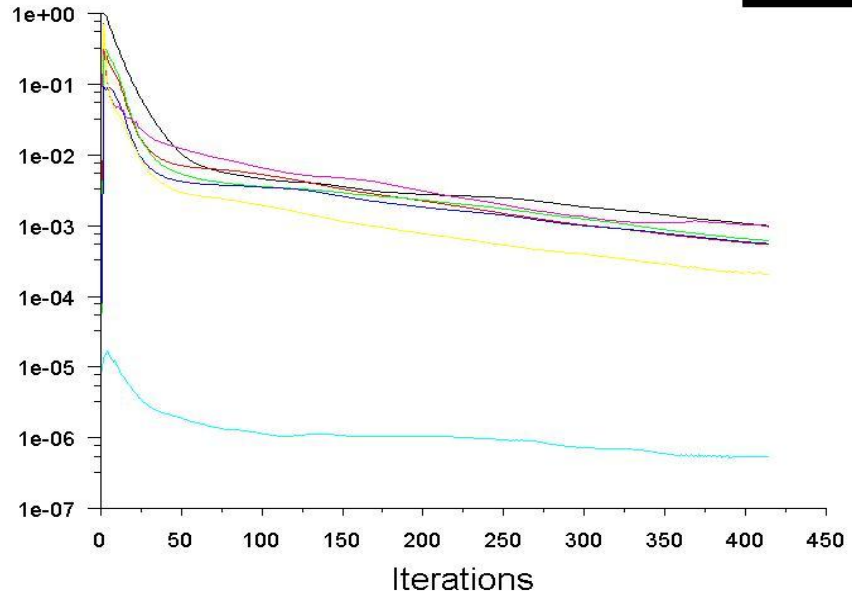
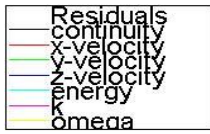


Scaled Residuals

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 29 - Resíduos para o modelo Realizable $k-\varepsilon$ - Verão

Modelo Standard $k-\omega$

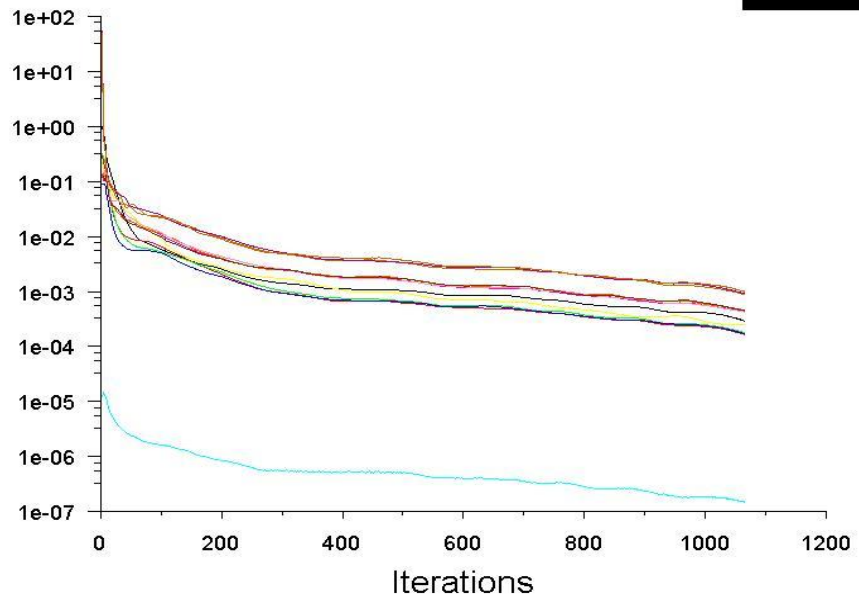
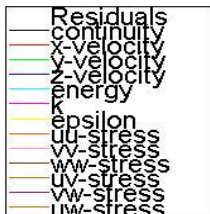


Scaled Residuals

Jul 20, 2010
 ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, skw)

Figura 30 - Resíduos para o modelo Standard $k-\omega$ - Verão

Modelo RSM



Scaled Residuals

Jul 20, 2010
 ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, RSM)

Figura 31 - Resíduos para o modelo RSM (Reynolds Stress Model) – Verão

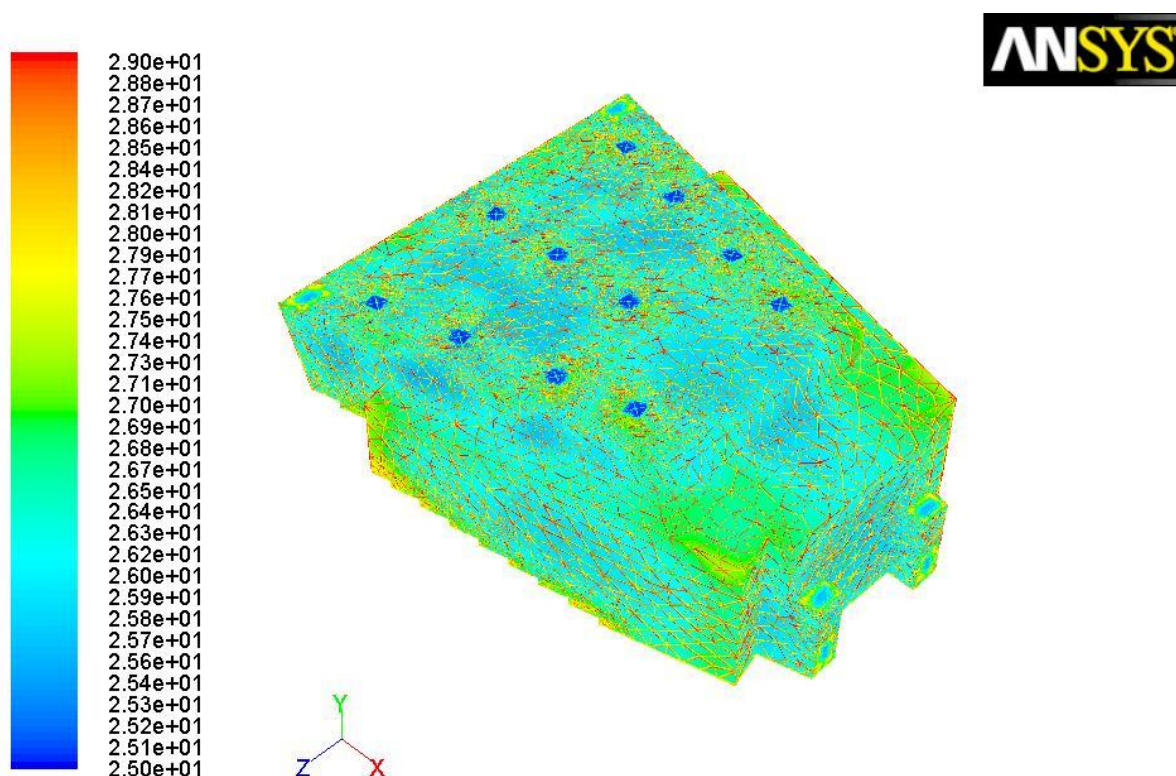
4.1.4. Resultados obtidos pelo modelo escolhido

Após terem sido mostrados os resultados inerentes ao estudo dos pontos utilizados nos diversos modelos e malhas torna-se necessário reproduzir os parâmetros estudados através dos diversos planos e linhas criadas para o efeito.

Assim, vão ser estudados os parâmetros de velocidade e temperatura tanto ao longo dos planos como ao longo das linhas.

De realçar também que as imagens correspondentes aos planos possuem outras escalas e/ou configurações que podem ser consultadas no Anexo D, e que os gráficos individuais de cada linha podem ser consultadas no Anexo C.

Vai-se começar por mostrar os contornos de temperatura e de velocidade para cada plano criado, no entanto, como nota introdutória mostra-se, em primeiro lugar os contornos de temperatura no auditório, em perspectiva isométrica:

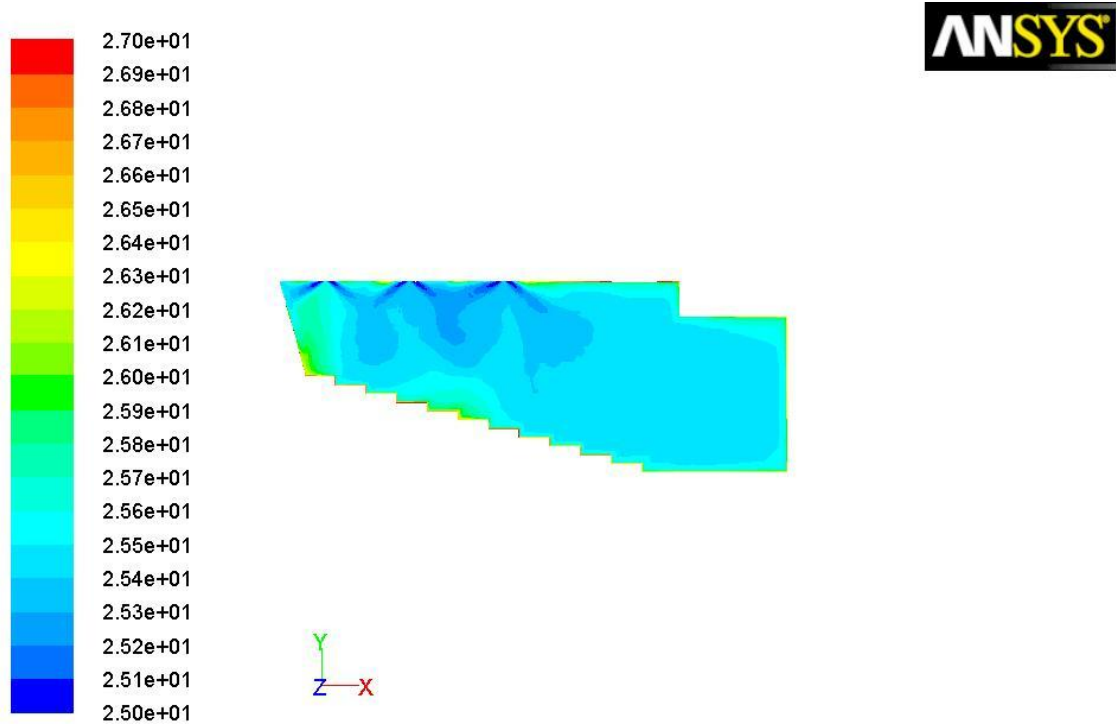


Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 32 - Perspectiva isométrica dos contornos de temperatura - Verão

Plano de Simetria – Temperaturas

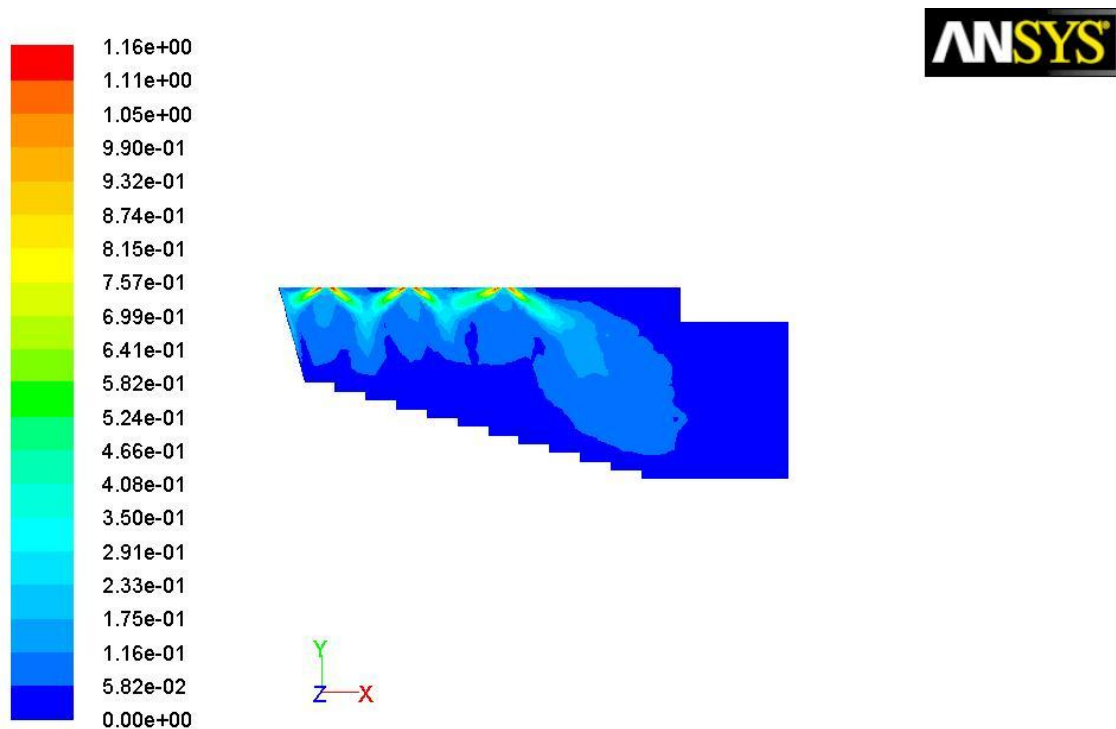


Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 33 - Contornos de temperatura no plano de simetria - Verão

Plano de Simetria – Velocidades

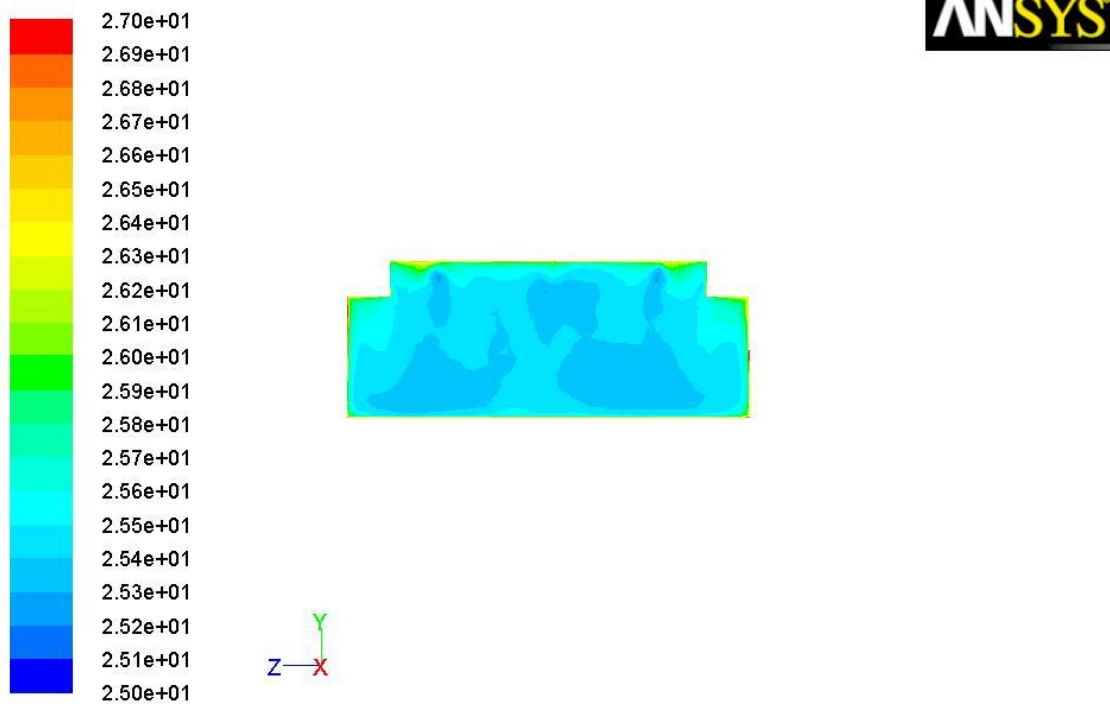


Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 34 - Contornos de velocidade no plano de simetria - Verão

Plano do Meio – Temperaturas

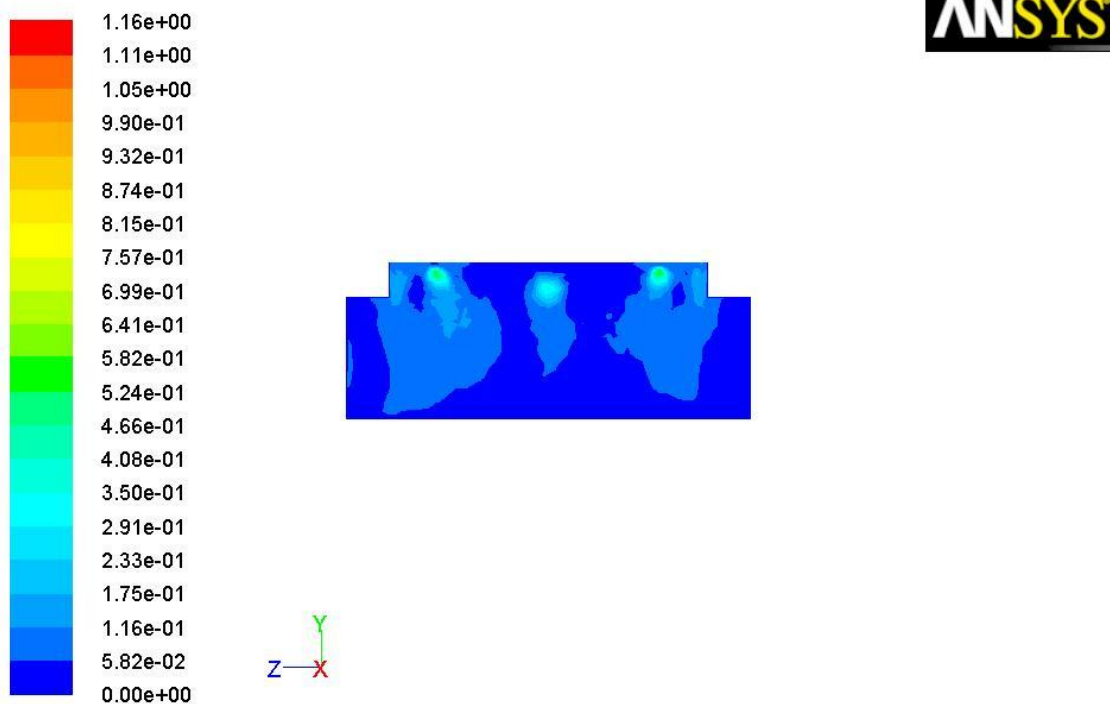


Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 35 - Contornos de temperatura no plano do meio - Verão

Plano de Meio – Velocidades

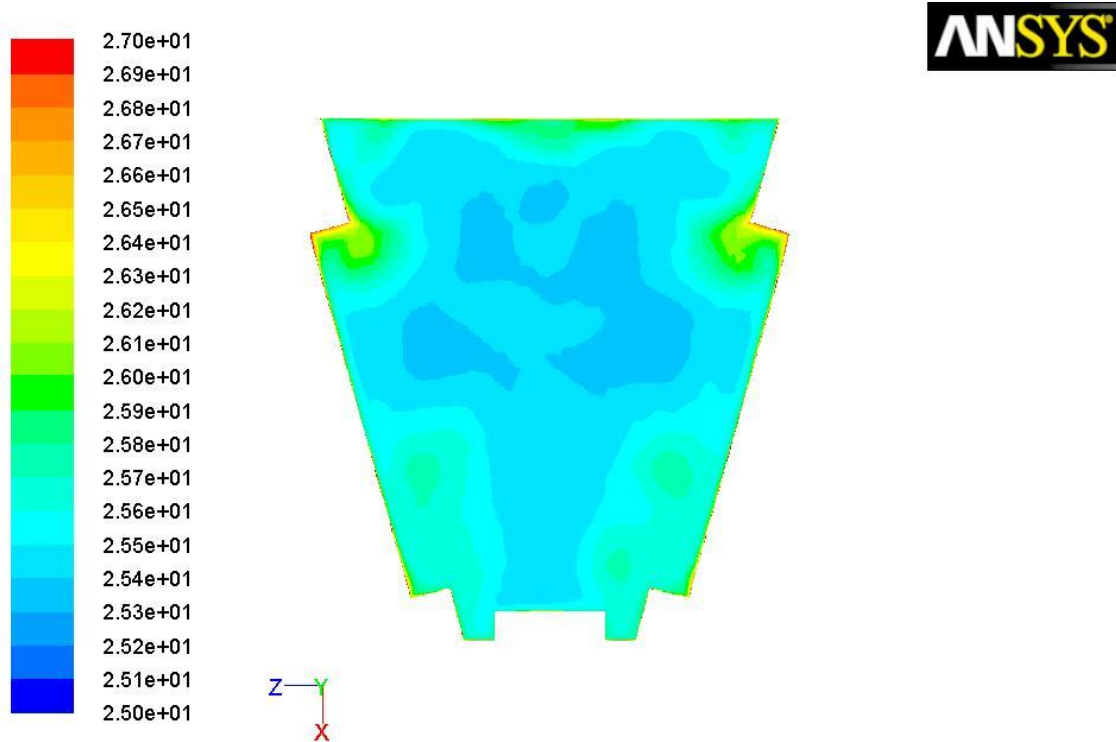


Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 36 - Contornos de velocidade no plano do meio - Verão

Plano Útil – Temperaturas

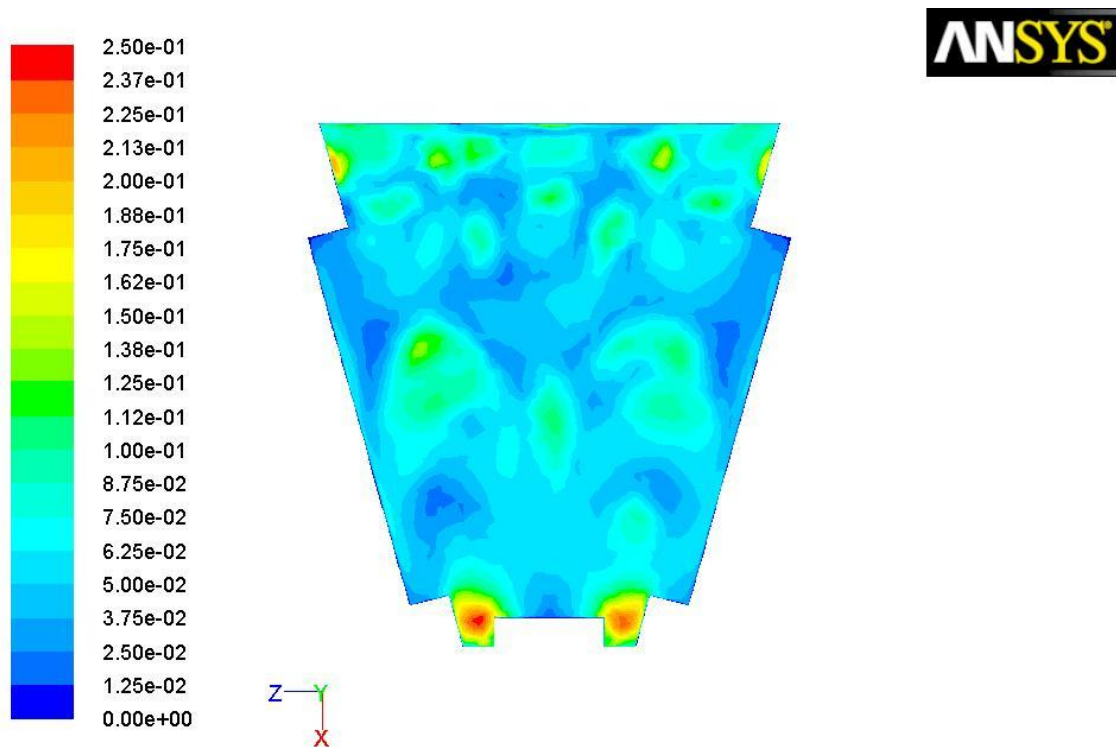


Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 37 - Contornos de temperatura no plano útil - Verão

Plano Útil – Velocidades



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

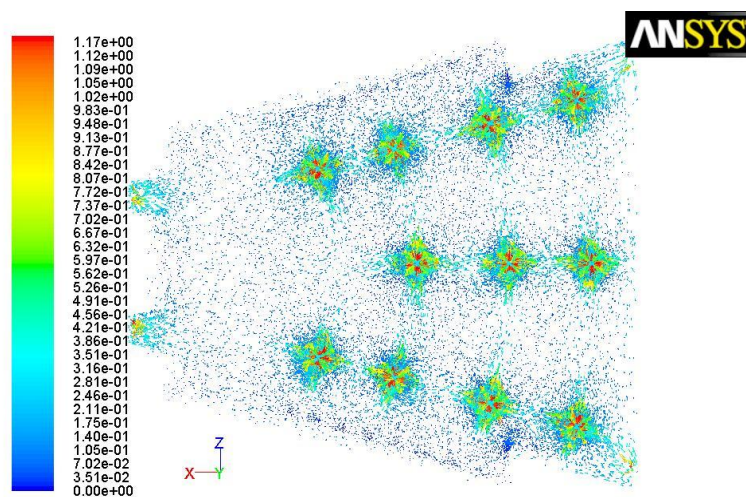
Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 38 - Contornos de velocidade no plano útil - Verão

Da análise destas 6 imagens podemos constatar diversos pontos importantes, tais como:

1. Em termos de temperaturas verifica-se que quase todo o auditório está dentro de uma gama muito pequena de temperatura, ou seja, o gradiente térmico é reduzido;
2. A distribuição de temperatura é bastante uniforme, no entanto salienta-se que a zona baixa do auditório (desde as primeiras filas de cadeiras até ao quadro) tem uma temperatura mais constante devido também ao seu maior pé-direito;
3. Finalizando a análise de temperaturas, verifica-se que as zonas mais intermédias do auditório possuem as menores temperaturas, que tendem a aumentar à medida que nos aproximamos das paredes;
4. Da análise em termos de velocidades, verifica-se sem surpresa que as maiores velocidades se encontram à saída das grelhas de insuflação (*Inlets*) e à entrada das grelhas de extracção (*VentOuts*);
5. É sabido que são aconselhadas velocidades do ar inferiores a 0,25 m/s para uma situação de conforto garantida, ora pela análise da distribuição de velocidades segundo o plano útil, neste caso verifica-se que na zona ocupada as velocidades são inferiores a 0,25 m/s.

Vão ser agora disponibilizados os gráficos de evolução de velocidade e de temperatura ao longo das diversas linhas criadas, no entanto, como nota introdutória mostra-se na figura seguinte a direcção do escoamento estudado através de vectores, numa vista de cima do anfiteatro:

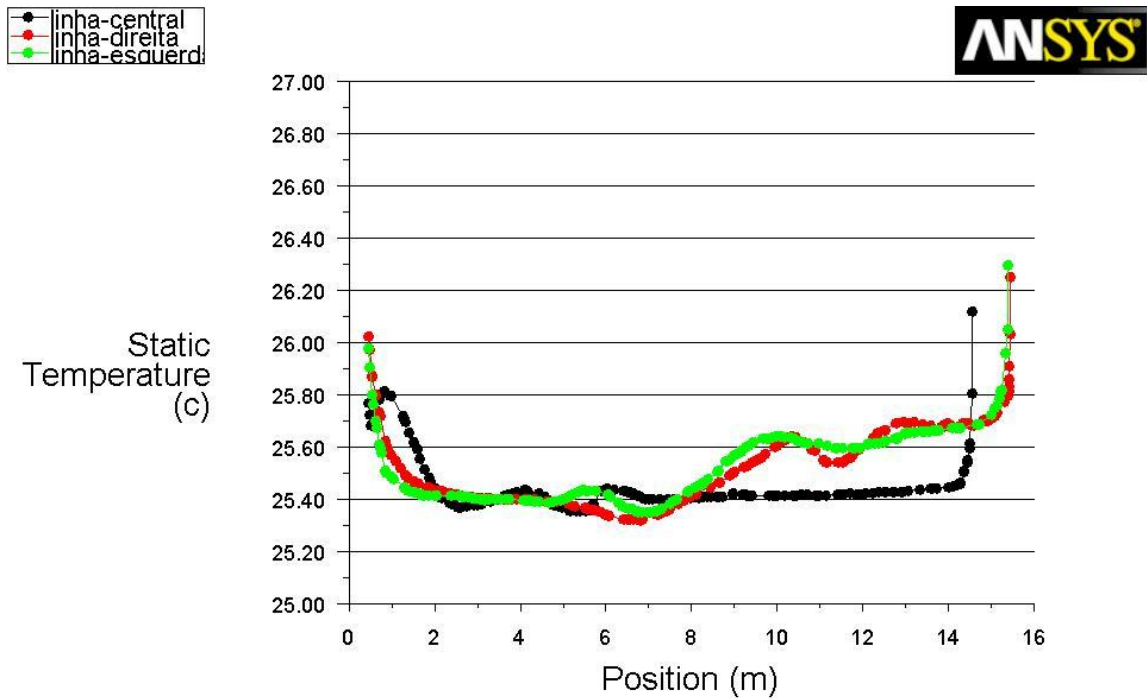


Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 39 - Vectores de velocidade do escoamento (vista de cima) - Verão

1º Grupo de linhas (linhas central, direita e esquerda) – Evolução de temperaturas

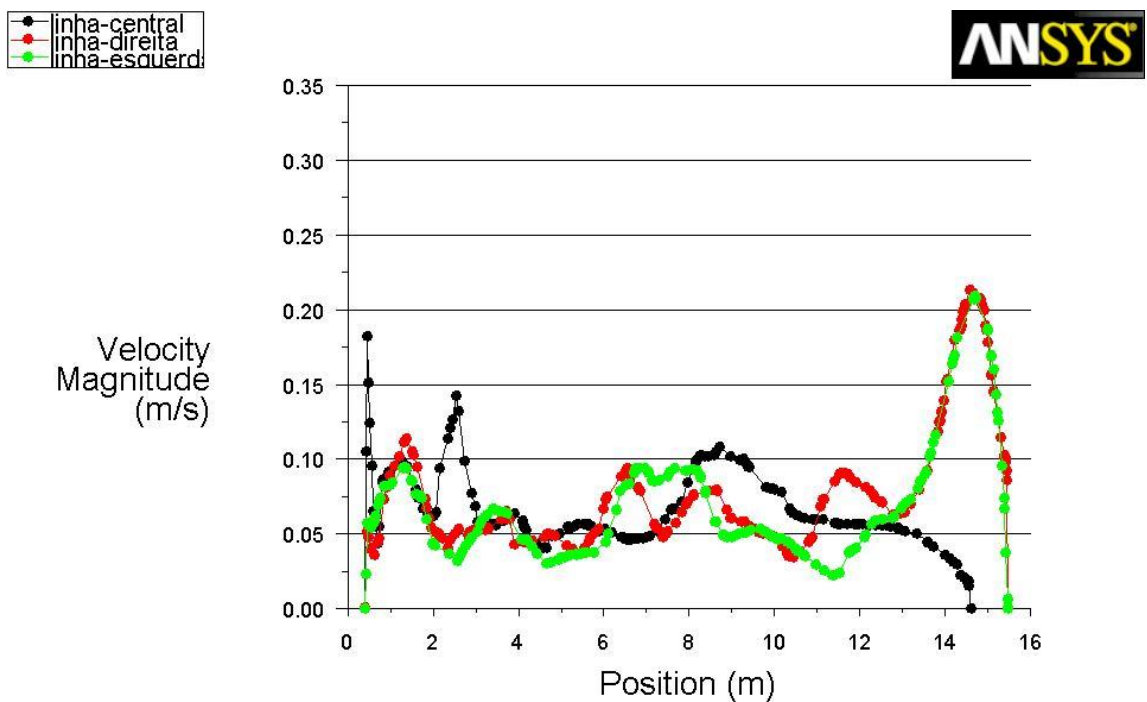


Static Temperature

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 40 - Comparação da evolução das temperaturas ao longo do comprimento do auditório de várias linhas - Verão

1º Grupo de linhas (linhas central, direita e esquerda) – Evolução das velocidades

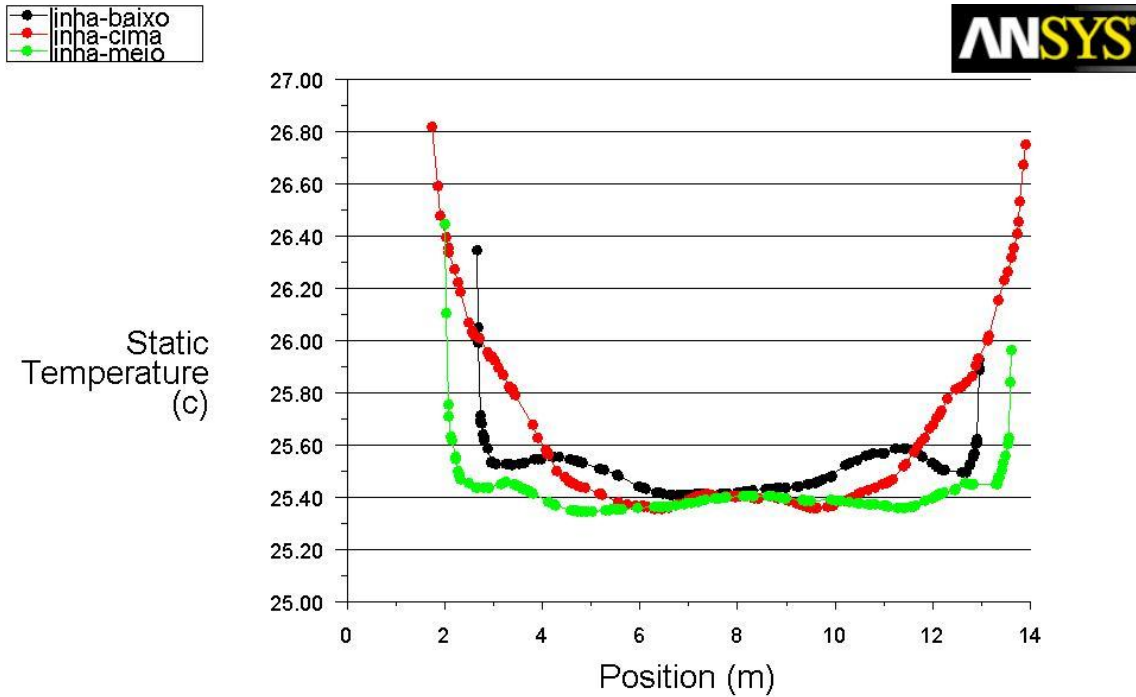


Velocity Magnitude

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 41 - Comparação da evolução das velocidades ao longo do comprimento do auditório de várias linhas - Verão

2º Grupo de linhas (linhas meio, baixo e cima) – Evolução de temperaturas

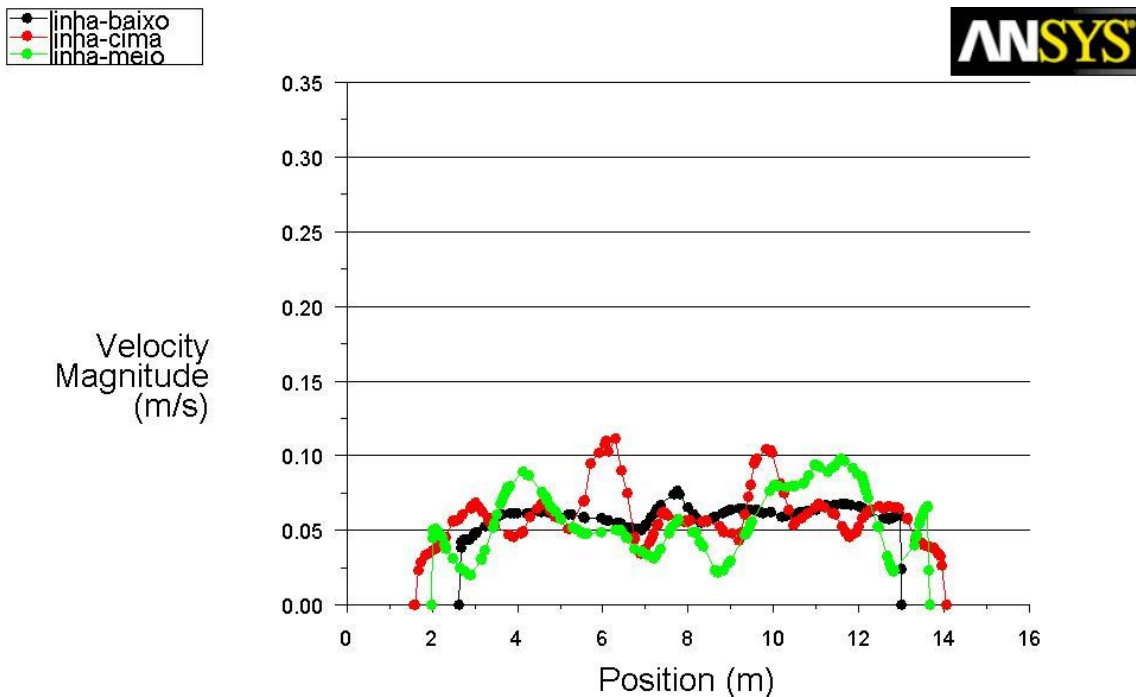


Static Temperature

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 42 - Comparação da evolução das temperaturas ao longo da largura do auditório de várias linhas - Verão

2º Grupo de linhas (linhas meio, baixo e cima) – Evolução das velocidades



Velocity Magnitude

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 43 - Comparação da evolução das velocidades ao longo da largura do auditório de várias linhas - Verão

Podem-se desde já tomar algumas considerações acerca da análise destes 4 gráficos, tais como:

1. O gradiente térmico no auditório aumenta na parte baixa do mesmo, mas ao longo da largura do mesmo, ou seja à medida que nos afastamos do meio para a parede da esquerda ou do meio para a parede da direita;
2. Este facto é visível também ao longo do comprimento do auditório, mas aqui verifica-se que, quanto mais próximos de qualquer uma das paredes, o gradiente de temperaturas será maior quanto mais nos afastemos do quadro;
3. Quanto às velocidades, têm evoluções muito inconstantes, no entanto em todas as zonas se verificam velocidades abaixo dos 0,25 m/s;
4. O local onde as velocidades são maiores, ao longo destas linhas é próximo das grelhas de extracção.

Após esta análise dá-se por encerrado este subcapítulo de análise de resultados na estação de Verão.

Seguidamente será feita uma análise idêntica a esta, mas no caso da estação de Inverno.

4.2. Inverno

4.2.1. Comparação de malhas

Como critérios de comparação de malhas vão-se usar os tempos computacionais que foram necessários em cada malha e os respectivos resultados.

Nesta fase do trabalho, foi utilizado o modelo Standard $k-\varepsilon$ para todas as malhas, de forma a só se estudar o efeito da variação da malha.

Assim, em termos de tempos computacionais necessários para cada malha temos a seguinte informação tabelada:

Tabela 13 - Tempos computacionais por malha - Inverno

Malha	Tempo	Iterações para convergência
Grosseira (Malha 1)	7h04m	Não Convergiu
Intermédia (Malha 2)	2h21m	535
Fina (Malha 3)	3h25m	470

Em termos de resultados obtidos mostram-se em seguida as temperaturas e velocidades nos pontos estudados e os caudais de extracção nos *VentOuts*:

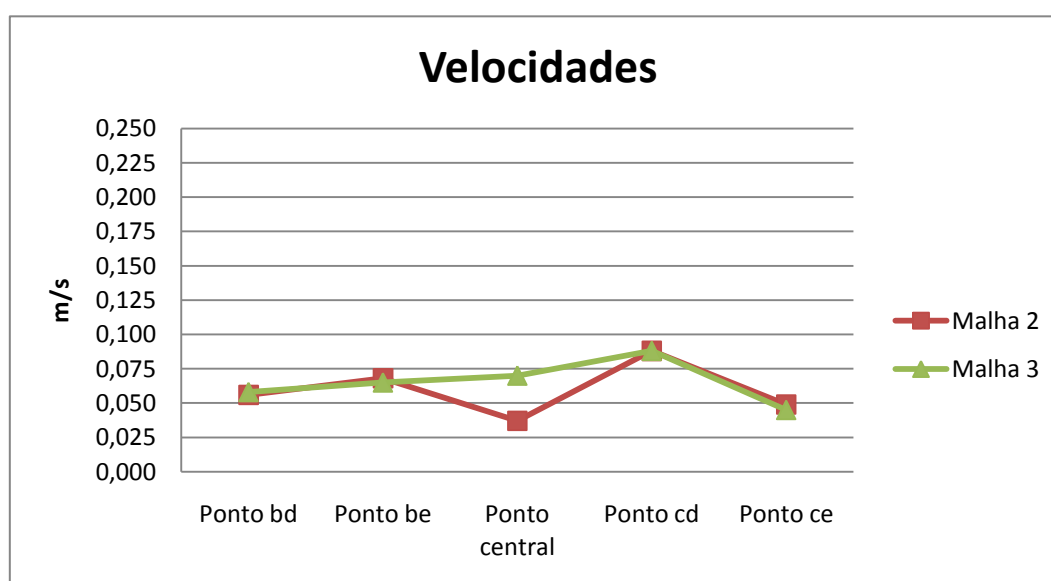


Figura 44 - Velocidades nos pontos de estudo por malha - Inverno

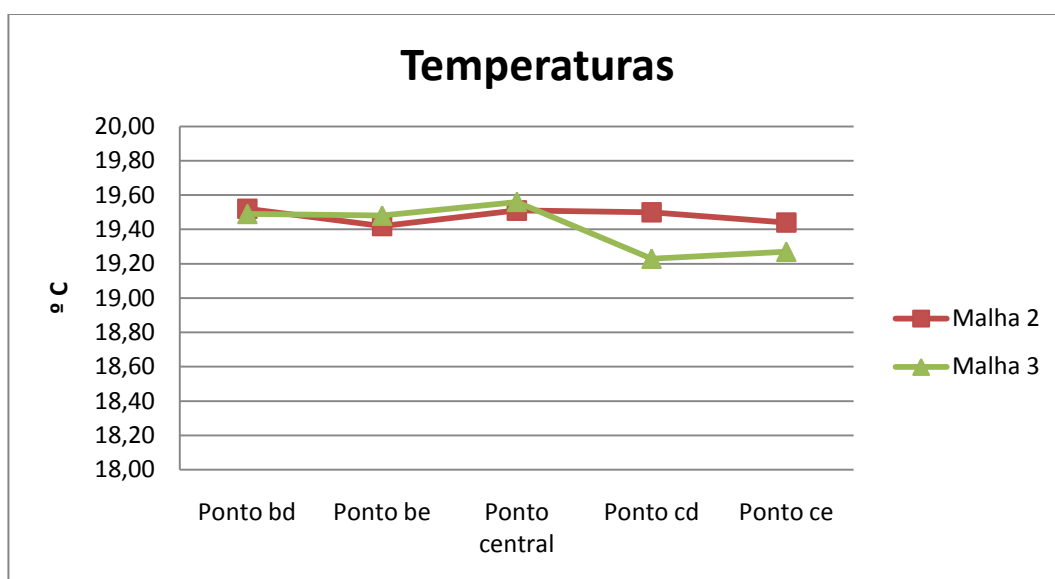


Figura 45 - Temperaturas nos pontos de estudo por malha - Inverno

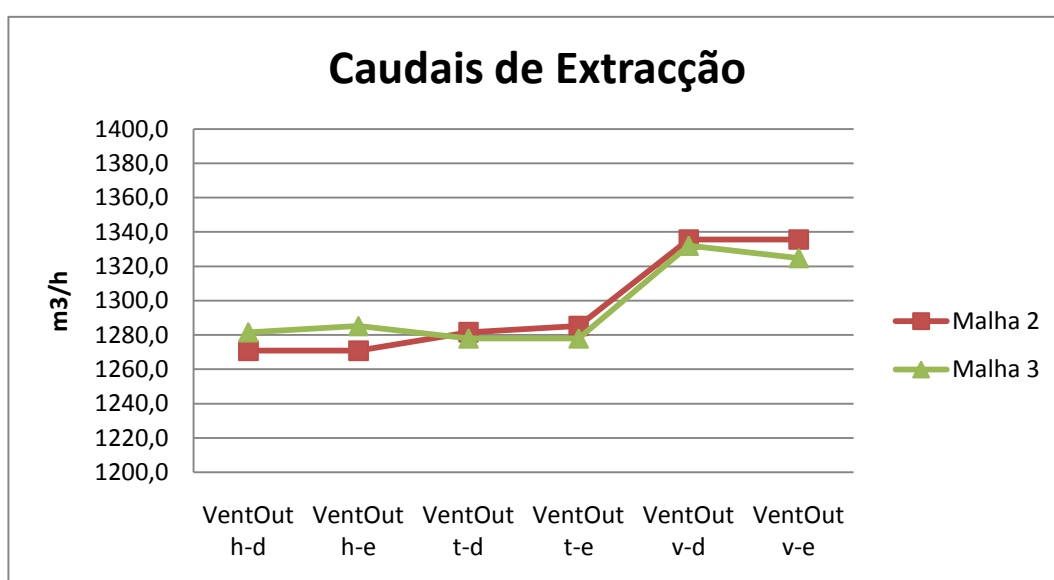


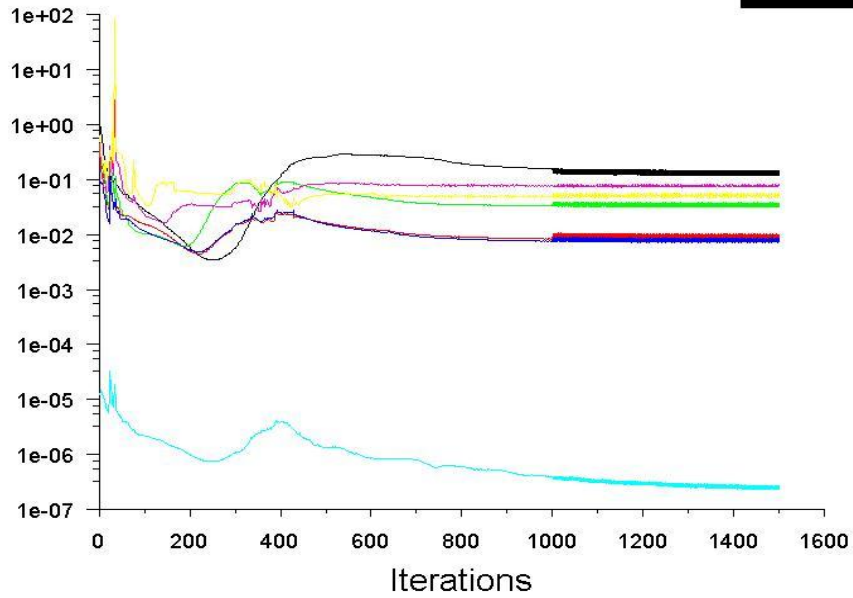
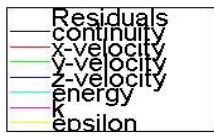
Figura 46 - Caudais de extracção nos VentOuts por malha - Inverno

Com base nestes resultados foi decidido utilizar a malha 2 (malha intermédia) pois os resultados das velocidades, temperaturas e caudais de extracção são muito semelhantes, no entanto o tempo computacional gasto foi cerca de 30% inferior ao da malha 3 (malha fina).

Note-se que ao fim de 1500 iterações a malha 1 (malha grosseira) não atingiu os critérios de convergência pelo que não foram tomados em conta os seus resultados.

Mostram-se finalmente os valores residuais de cada simulação, para cada malha utilizada:

Malha 1 (Grosseira)

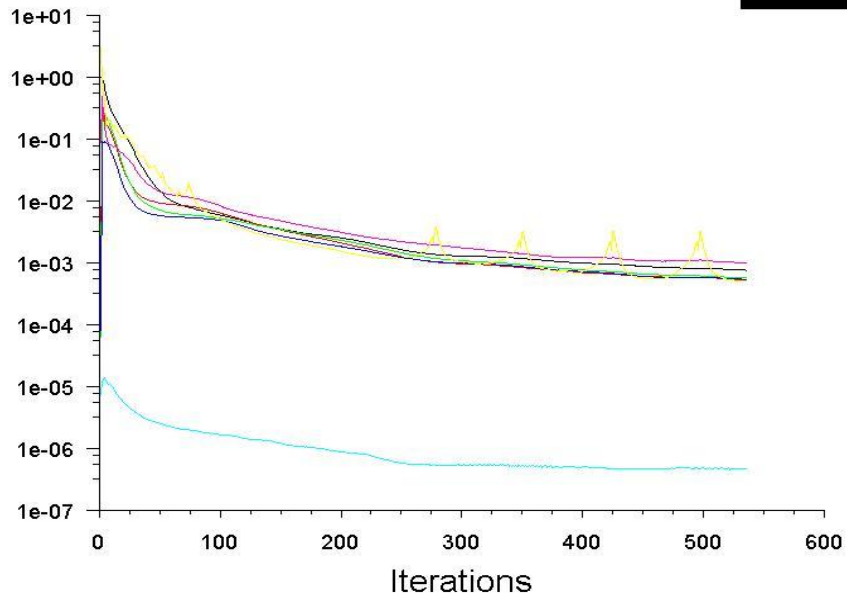
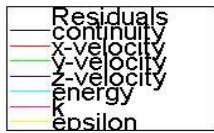


Scaled Residuals

Jul 19, 2010
 ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, ske)

Figura 47 - Resíduos para o modelo standard $k-\epsilon$ – Malha 1 (grosseira) - Inverno

Malha 2 (Intermédia)

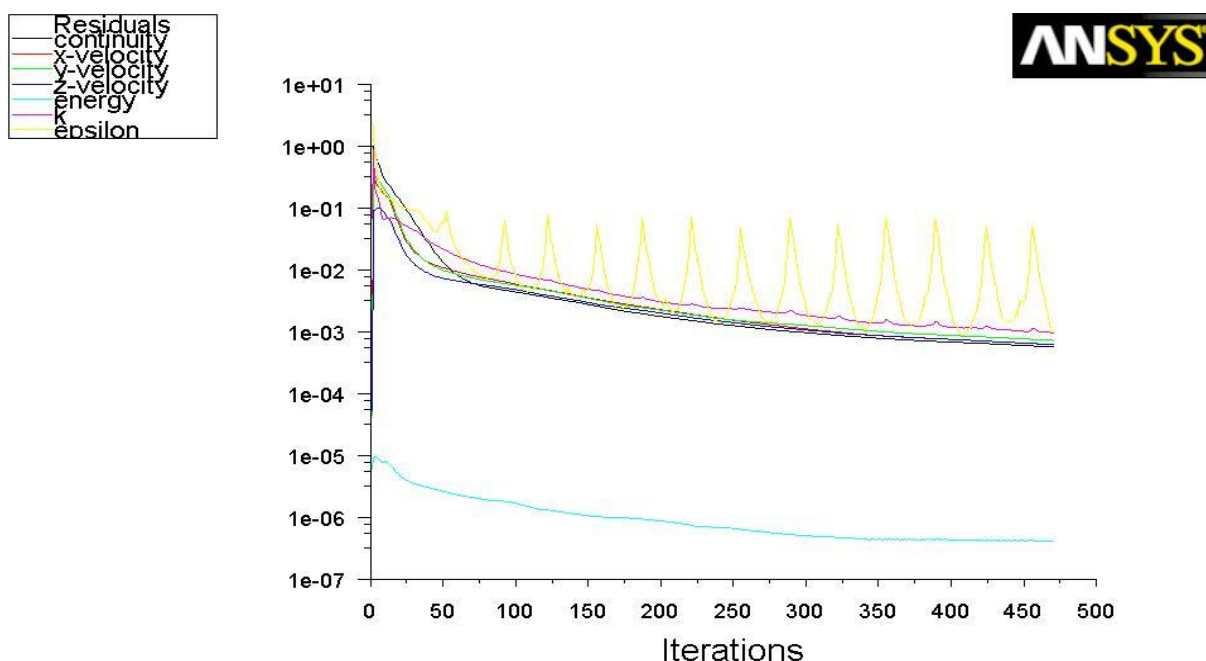


Scaled Residuals

Jul 20, 2010
 ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, ske)

Figura 48 - Resíduos para o modelo standard $k-\epsilon$ – Malha 2 (intermédia) - Inverno

Malha 3 (Fina)



Scaled Residuals

Jul 19, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, ske)

Figura 49 - Resíduos para o modelo standard $k-\epsilon$ – Malha 3 (fina) – Inverno

4.2.2. Comparação de modelos

Após a decisão da utilização da malha intermédia, nesta fase do trabalho vão-se apresentar os tempos computacionais necessários para a simulação de cada modelo, as tabelas e gráficos das velocidades e temperaturas dos pontos de estudo e os caudais de extracção dos VentOuts e os resíduos de cada simulação.

Apresentam-se então em primeiro lugar os tempos computacionais necessários para cada simulação:

Tabela 14 - Tempos computacionais por modelo - Inverno

Modelo	Tempo	Iterações para convergência
Standard $k-\epsilon$	2h21m	535
RNG $k-\epsilon$	7h01m	Não Convergiu
Realizable $k-\epsilon$	3h35m	814
Standard $k-\omega$	1h57m	414
RSM	7h16m	1065

4.2.3. Velocidades e temperaturas nos pontos de estudo

Seguidamente são aqui mostradas as tabelas com as velocidades e as temperaturas obtidas para os pontos em estudo, tal como os caudais de extracção nos *VentOuts*.

Tabela 15 - Velocidades nos pontos de estudo - Inverno

Velocidades (m/s)					
Modelo	Ponto b-d	Ponto b-e	Ponto central	Ponto c-d	Ponto c-e
Standard $k-\varepsilon$	0,056	0,068	0,037	0,088	0,049
Realizable $k-\varepsilon$	0,057	0,062	0,057	0,099	0,059
Standard $k-\omega$	0,057	0,066	0,034	0,084	0,047
RSM	0,068	0,061	0,067	0,105	0,073

Tabela 16 - Temperaturas nos pontos de estudo - Inverno

Temperaturas (°C)					
Modelo	Ponto b-d	Ponto b-e	Ponto central	Ponto c-d	Ponto c-e
Standard $k-\varepsilon$	19,52	19,42	19,51	19,50	19,44
Realizable $k-\varepsilon$	19,49	19,42	19,51	19,47	19,48
Standard $k-\omega$	19,43	19,50	19,55	19,43	19,53
RSM	19,49	19,40	19,48	19,50	19,47

Tabela 17 - Caudais nas grelhas de extracção - Inverno

VentOuts - Caudais (m ³ /h)						
Modelo	VentOut h-d	VentOut h-e	VentOut t-d	VentOut t-e	VentOut v-d	VentOut v-e
Standard $k-\varepsilon$	1270,8	1270,8	1281,6	1285,2	1335,6	1335,6
Realizable $k-\varepsilon$	1270,8	1274,4	1278,0	1288,8	1335,6	1328,4
Standard $k-\omega$	1267,2	1270,8	1288,8	1296,0	1335,6	1324,8
RSM	1278,0	1278,0	1270,8	1274,4	1342,8	1335,6

Os correspondentes gráficos associados a estas tabelas apresentam-se seguidamente:

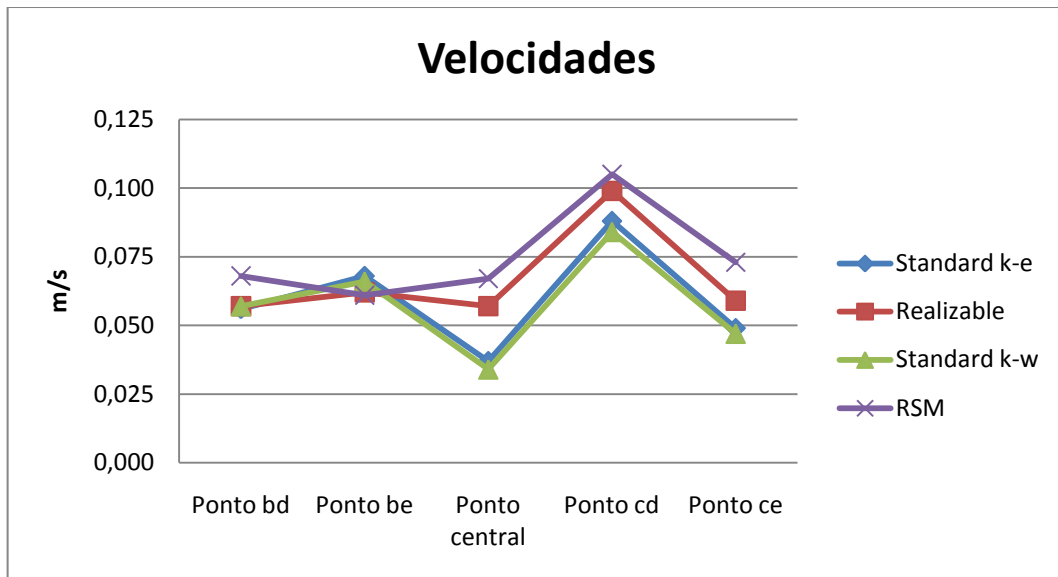


Figura 50 - Velocidades nos pontos de estudo por modelo - Inverno

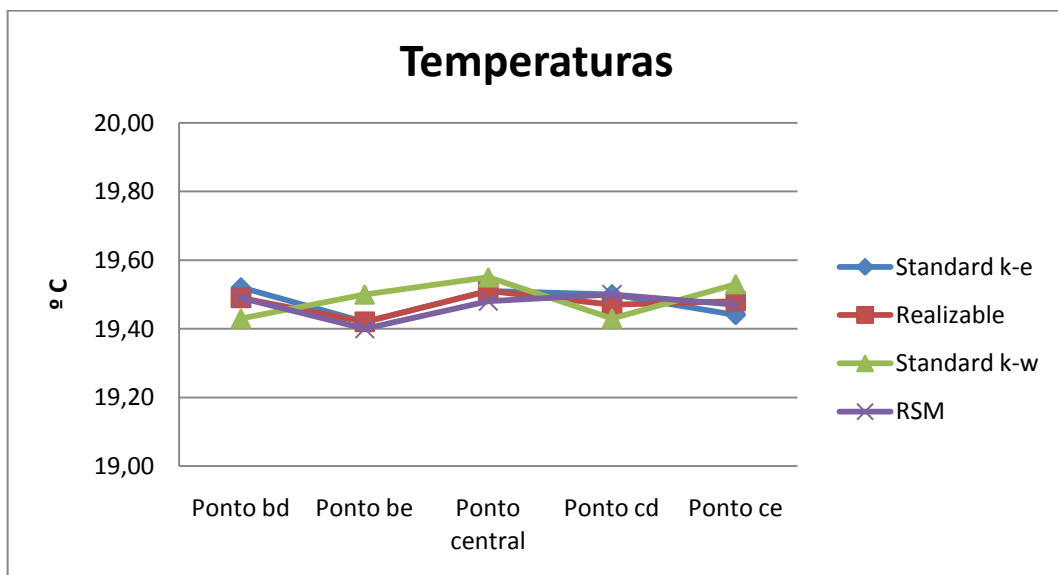


Figura 51 - Temperaturas nos pontos de estudo por modelo - Inverno

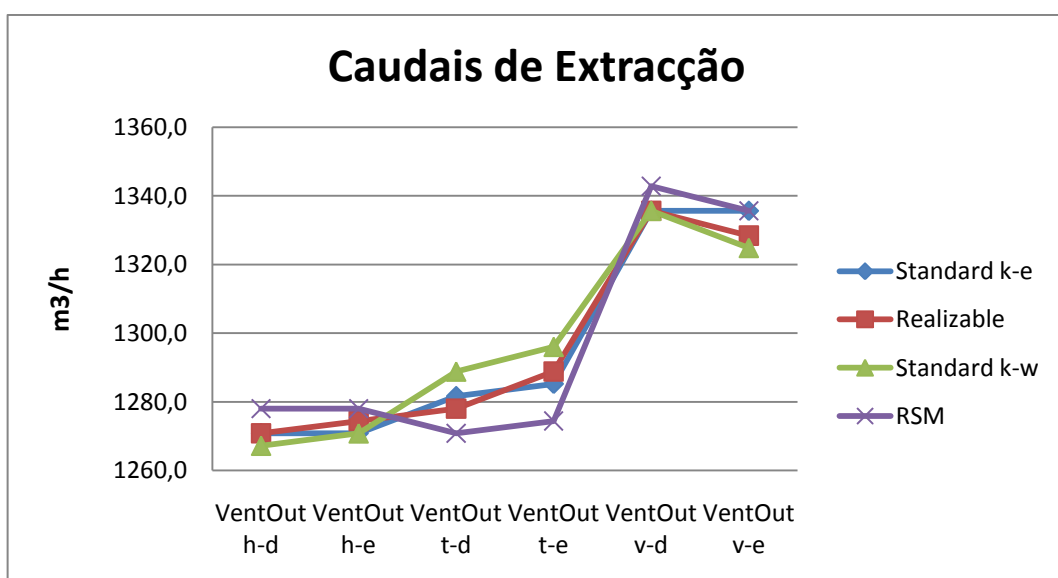


Figura 52 - Caudais de extracção nos VentOuts por modelo - Inverno

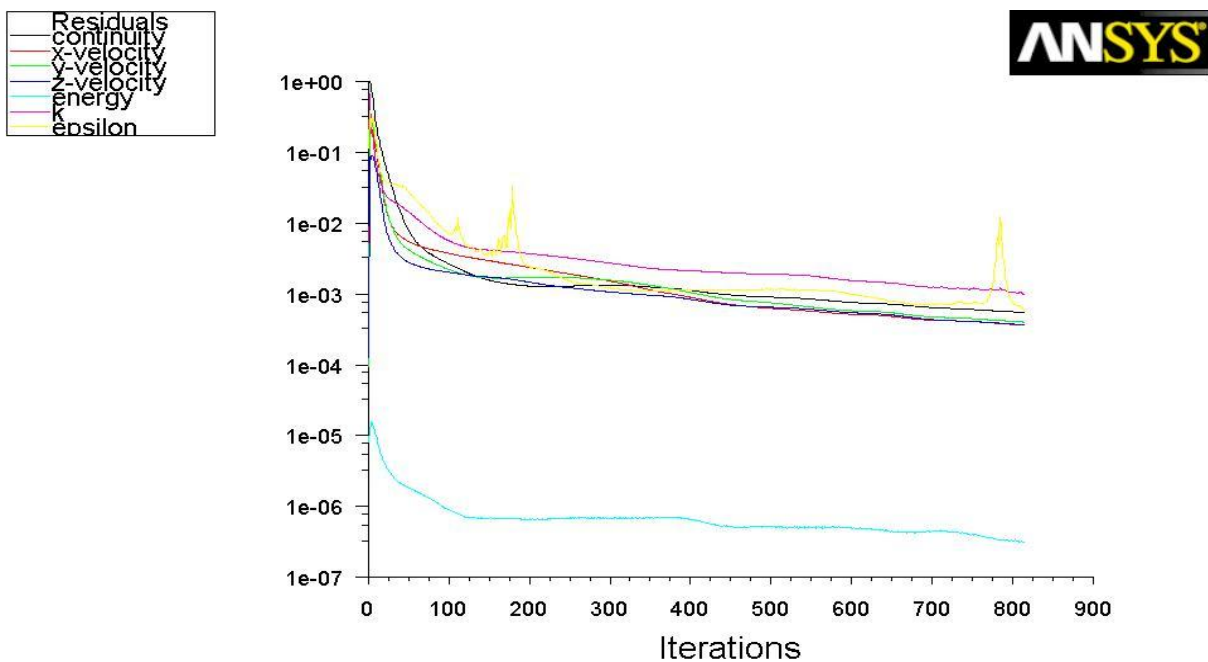
Após 1500 iterações não se verificou convergência no modelo RNG $k-\epsilon$ sendo que os seus dados não foram tomados em conta neste estudo.

Encontram-se no Anexo C presentes os gráficos anteriores mas com diferentes resoluções de escala.

Decidiu-se adoptar para as simulações o modelo Realizable $k-\epsilon$ pelas mesmas razões apontadas na pág. 38, já que os resultados foram muito similares.

Finalmente apresentam-se os valores residuais obtidos para cada simulação, em cada modelo, sabendo que os do modelo Standard $k-\epsilon$ já se encontram na fig. 48:

Modelo Realizable $k-\epsilon$

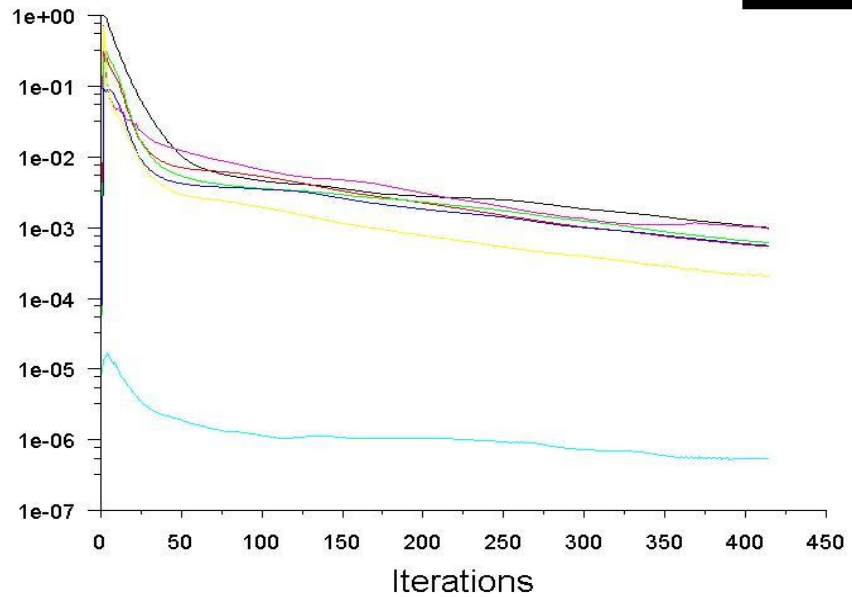
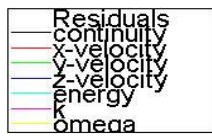


Scaled Residuals

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 53 - Resíduos para o modelo Realizable $k-\epsilon$ - Inverno

Modelo Standard $k-\omega$

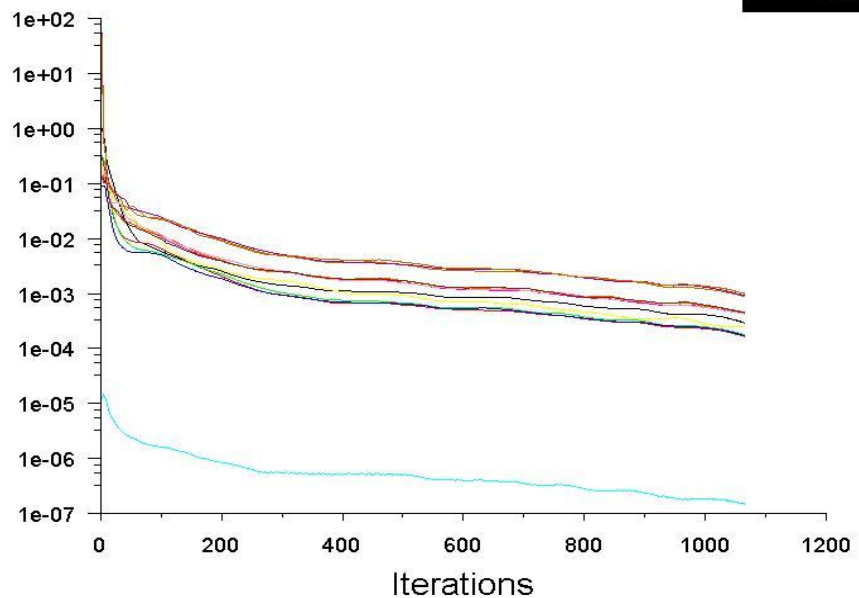
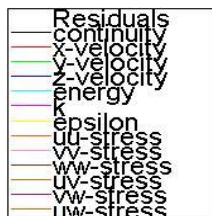


Scaled Residuals

Jul 20, 2010
 ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, skw)

Figura 54 - Resíduos para o modelo Standard $k-\omega$ - Inverno

Modelo RSM



Scaled Residuals

Jul 20, 2010
 ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, RSM)

Figura 55 - Resíduos para o modelo RSM (Reynolds Stress Model) - Inverno

4.2.4. Resultados obtidos pelo modelo escolhido

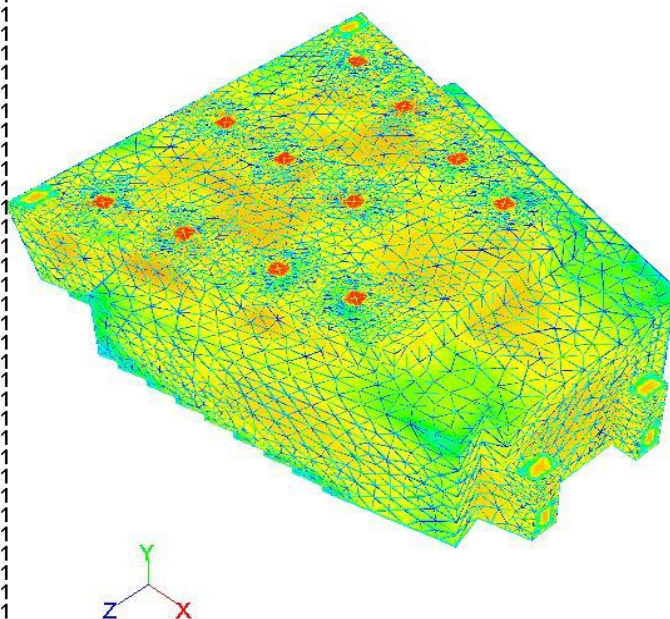
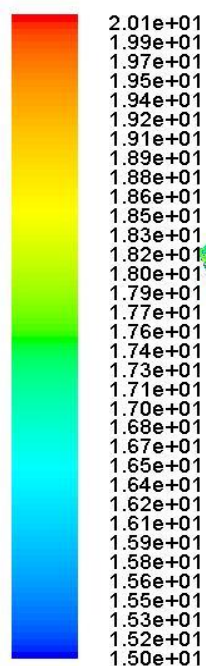
Após terem sido mostrados os resultados inerentes ao estudo dos pontos utilizados nos diversos modelos e malhas torna-se necessário reproduzir os parâmetros estudados através dos diversos planos e linhas criadas para o efeito.

Assim, vão ser estudados os parâmetros de velocidade e temperatura tanto ao longo dos planos como ao longo das linhas.

O modo como será feito será de forma gráfica no que toca às evoluções destes parâmetros ao longo das linhas enquanto que será por imagem, tipo fotografia instantânea, que serão mostrados estes parâmetros em cada plano.

De realçar também que as imagens correspondentes aos planos possuem outras escalas e/ou configurações que podem ser consultadas no Anexo D, e que os gráficos individuais de cada linha podem ser consultadas no Anexo C.

Vai-se começar por mostrar os contornos de temperatura e de velocidade para cada plano criado, no entanto, como nota introdutória mostra-se, em primeiro lugar os contornos de temperatura no auditório, em perspectiva isométrica:

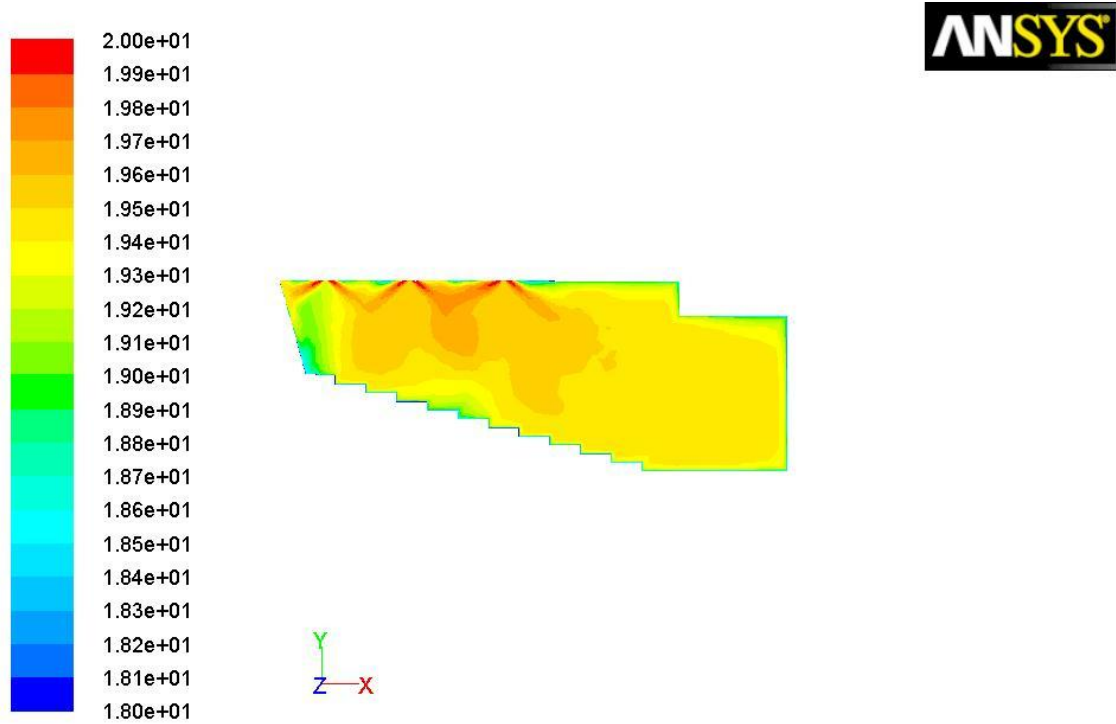


Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 56 - Perspectiva isométrica dos contornos de temperatura - Inverno

Plano de Simetria – Temperaturas

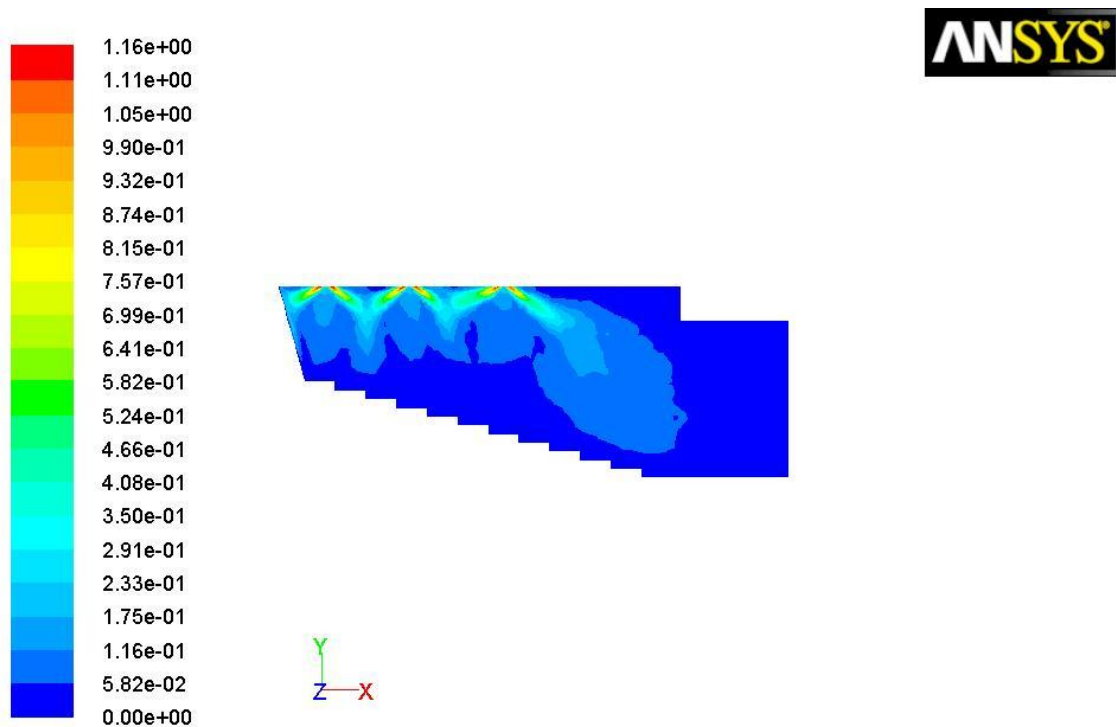


Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 57 - Contornos de temperatura no plano de simetria - Inverno

Plano de Simetria – Velocidades

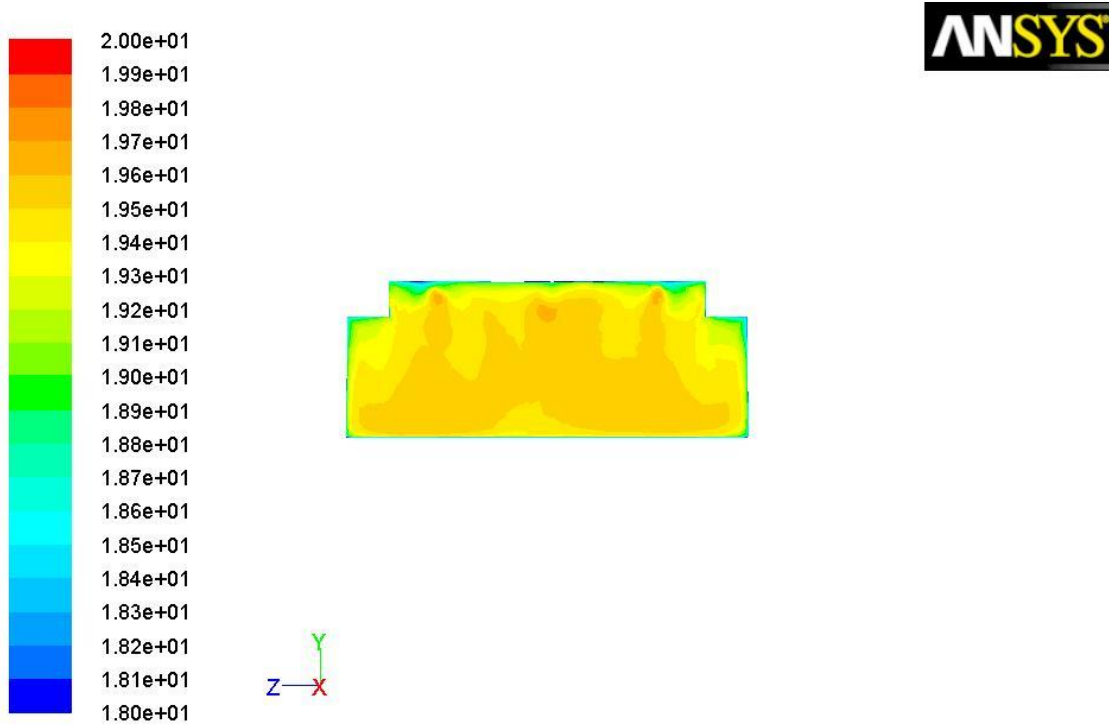


Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 58 - Contornos de velocidade no plano de simetria - Inverno

Plano do Meio – Temperaturas

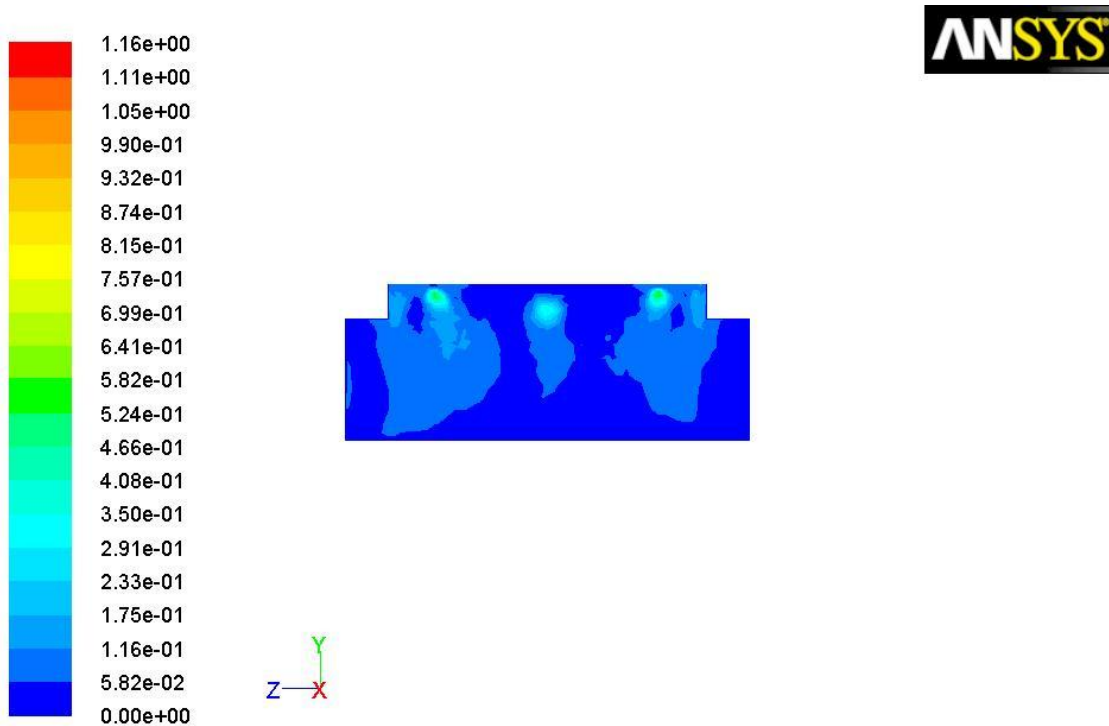


Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 59 - Contornos de temperatura no plano do meio - Inverno

Plano de Meio – Velocidades

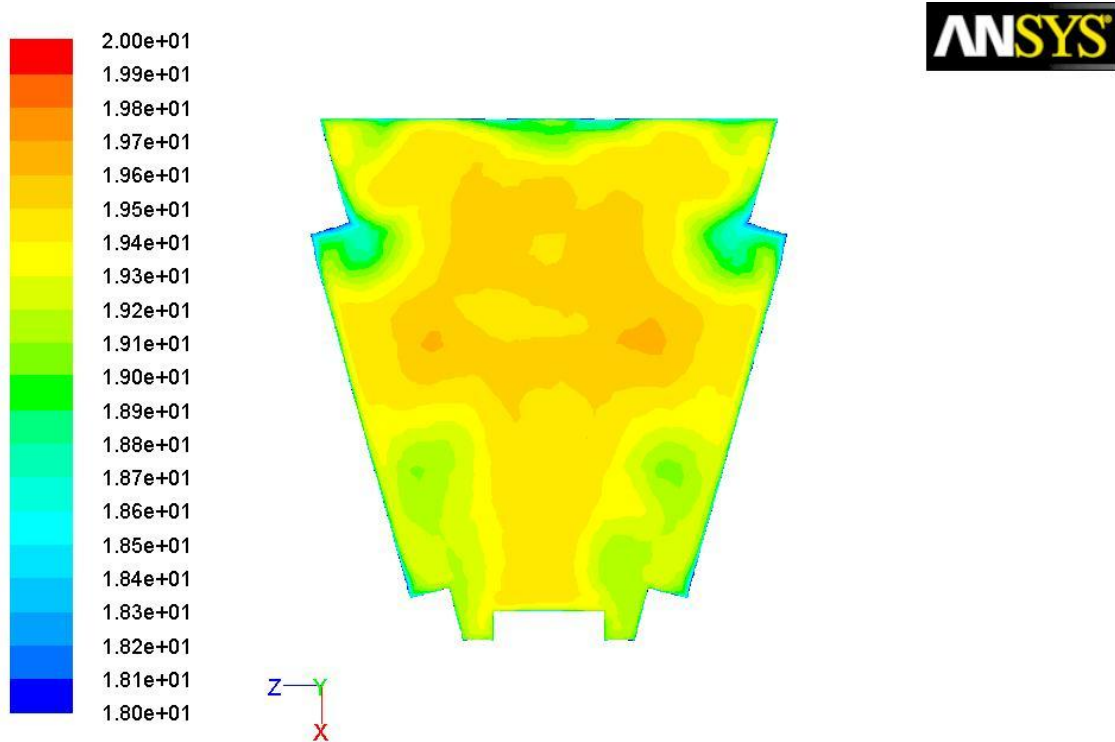


Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 60 - Contornos de velocidade no plano do meio - Inverno

Plano Útil – Temperaturas

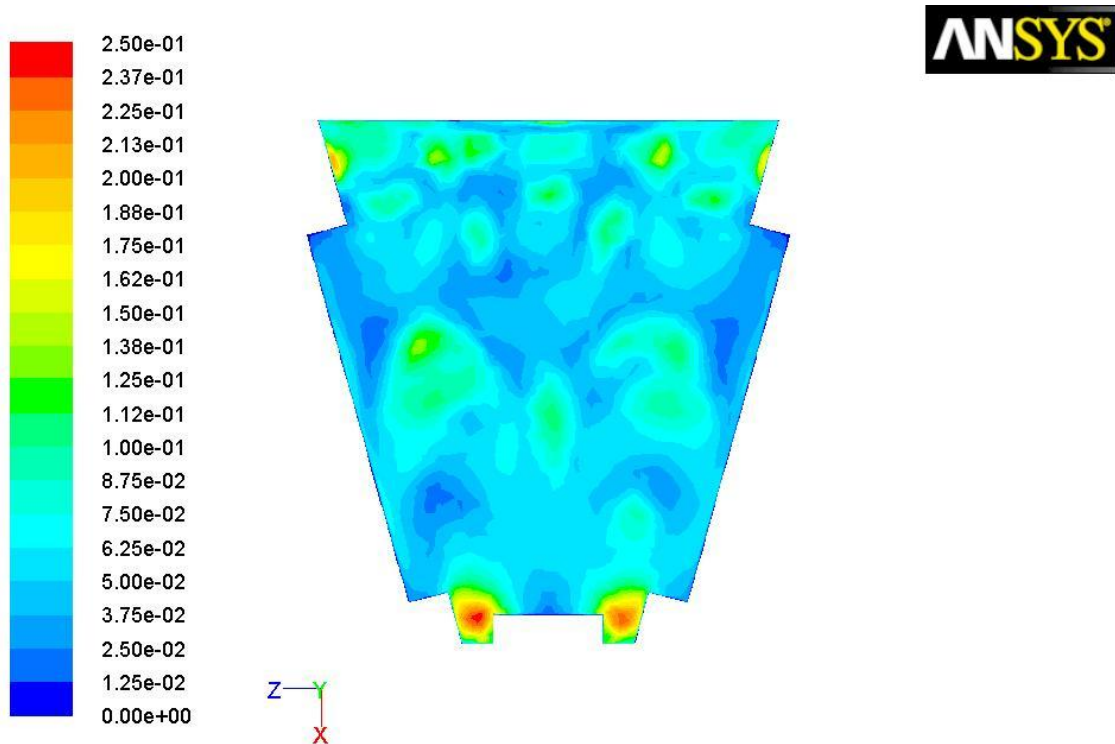


Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 61 - Contornos de temperatura no plano útil - Inverno

Plano Útil – Velocidades



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 62 - Contornos de velocidade no plano útil - Inverno

Da análise destas 6 imagens podemos constatar diversos pontos importantes, tais como:

1. Em termos de temperaturas verifica-se que quase todo o auditório está dentro de uma gama pequena de temperatura, ou seja, o gradiente térmico é baixo, no entanto é maior que no caso de Verão;
2. A distribuição de temperatura é menos uniforme que no caso anterior, dado que o ar, mais quente em relação ao piso, é menos denso logo mais dificilmente este desce;
3. No entanto salienta-se que a zona baixa do auditório (desde as primeiras filas de cadeiras até ao quadro) tem uma temperatura mais constante devido também ao seu maior pé-direito;
4. Finalizando a análise de temperaturas, verifica-se que as zonas mais intermédias do auditório possuem as maiores temperaturas, que tendem a diminuir à medida que nos aproximamos das paredes, principalmente em altura;
5. Tal como no caso anterior o conforto em relação à velocidade do ar está garantido já q se observam sempre velocidades inferiores a 0,25 m/s no plano útil.

Vão ser agora disponibilizados os gráficos de evolução de velocidade e de temperatura ao longo das diversas linhas criadas, no entanto, como nota introdutória mostra-se na figura seguinte a direcção do escoamento estudado através de vectores, numa vista de cima do anfiteatro:

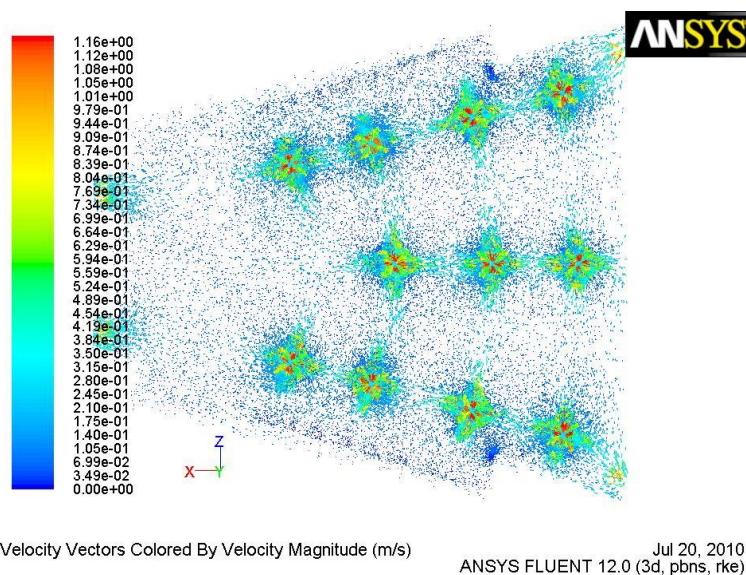
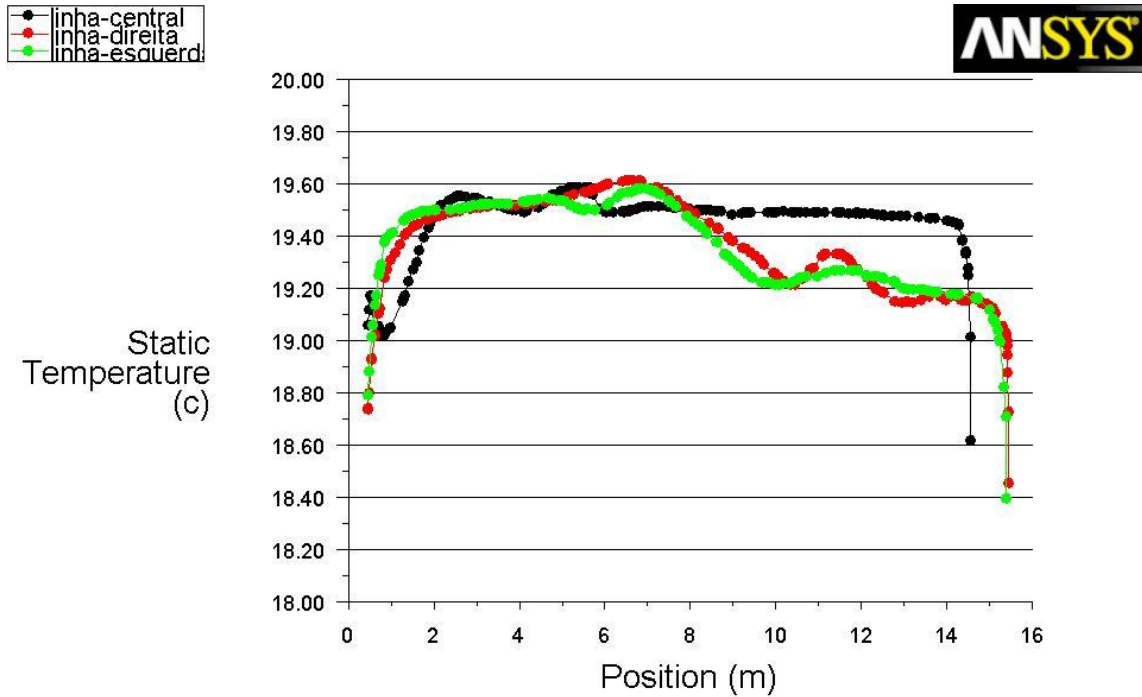


Figura 63 - Vectores de velocidade do escoamento (vista de cima) - Inverno

1º Grupo de linhas (linhas central, direita e esquerda) – Evolução de temperaturas

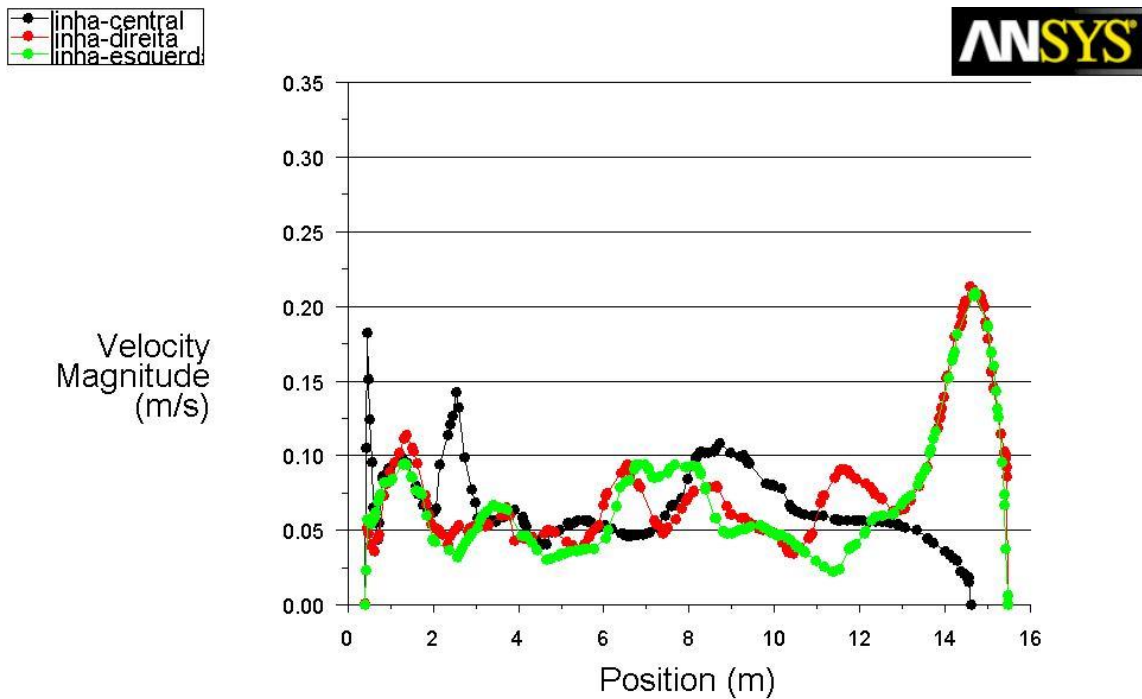


Static Temperature

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 64 - Comparação da evolução das temperaturas ao longo do comprimento do auditório de várias linhas - Inverno

1º Grupo de linhas (linhas central, direita e esquerda) – Evolução das velocidades

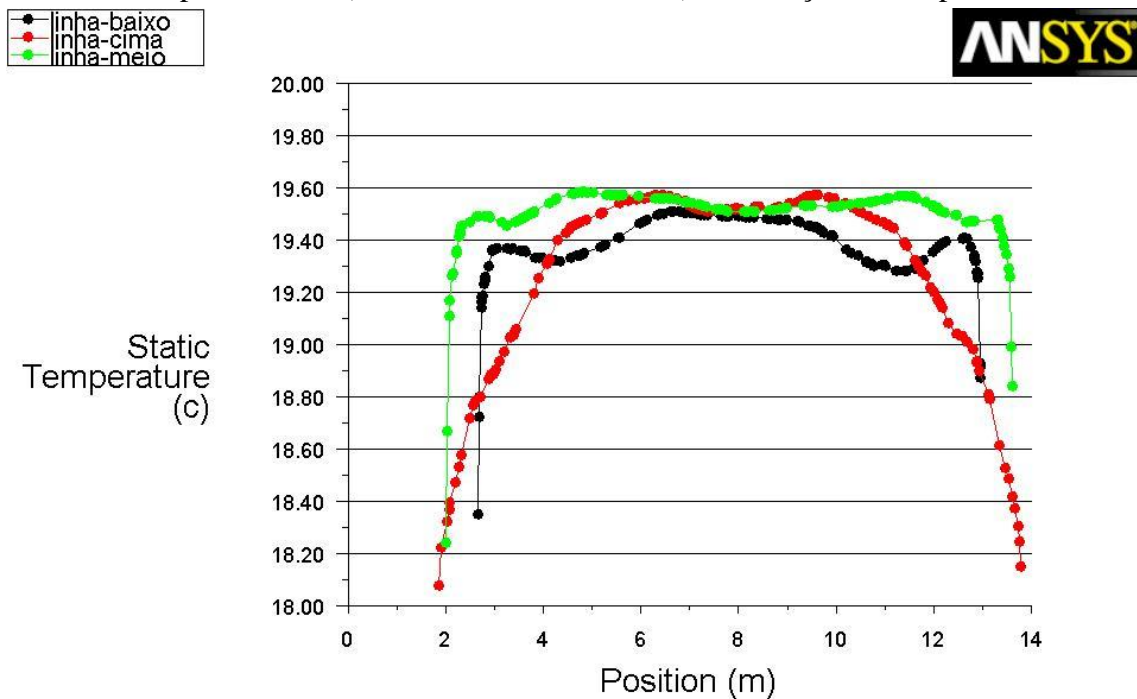


Velocity Magnitude

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 65 - Comparação da evolução das velocidades ao longo do comprimento do auditório de várias linhas - Inverno

2º Grupo de linhas (linhas meio, baixo e cima) – Evolução de temperaturas

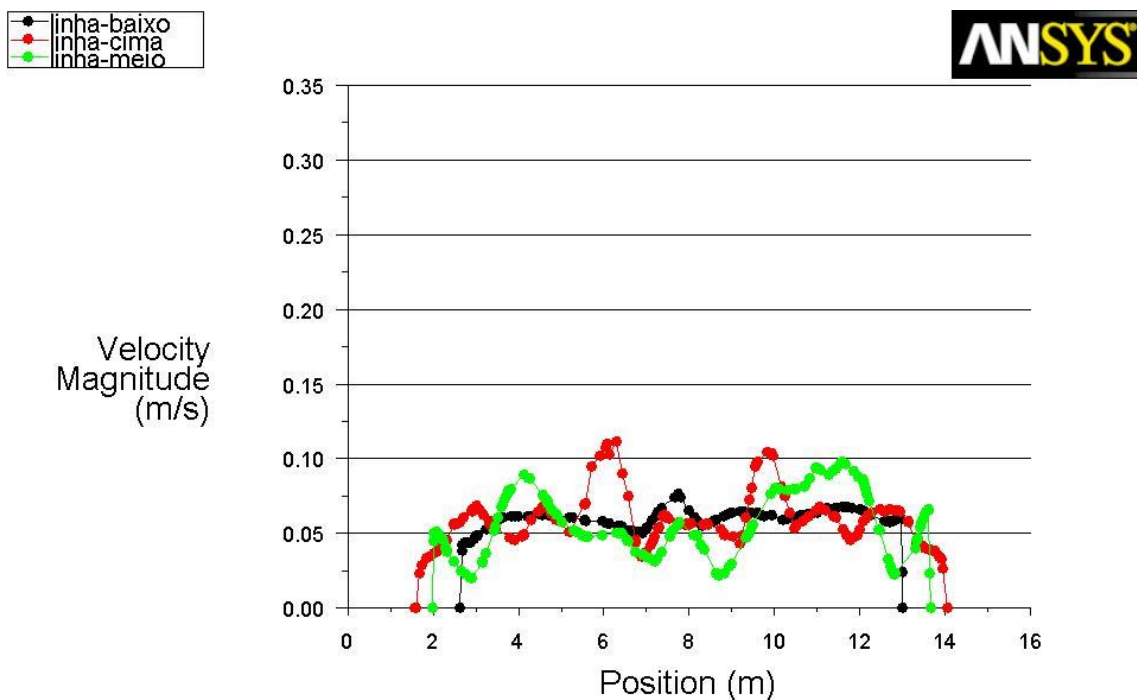


Static Temperature

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 66 - Comparação da evolução das temperaturas ao longo da largura do auditório de várias linhas - Inverno

2º Grupo de linhas (linhas meio, baixo e cima) – Evolução das velocidades



Velocity Magnitude

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 67 - Comparação da evolução das velocidades ao longo da largura do auditório de várias linhas - Inverno

Podem-se desde já tomar algumas considerações acerca da análise destes 4 gráficos, tais como:

1. O gradiente térmico no auditório aumenta na parte baixa do mesmo, mas ao longo da largura do mesmo, ou seja à medida que nos afastamos do meio para a parede da esquerda ou do meio para a parede da direita;
2. Este facto é visível também ao longo do comprimento do auditório, mas aqui verifica-se que, quanto mais próximos de qualquer uma das paredes, o gradiente de temperaturas será maior quanto mais nos afastemos do quadro;
3. Quanto às velocidades, têm evoluções muito inconstantes, no entanto em todas as zonas se verificam velocidades abaixo dos 0,25 m/s;
4. O local onde as velocidades são maiores, ao longo destas linhas é próximo das grelhas de extracção.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho visou estudar a ventilação de um anfiteatro da FEUP (Faculdade de Engenharia do Porto), nomeadamente focando-se essencialmente em 3 grandes parâmetros, a saber: a velocidade e a temperatura do ar interior e os caudais de extracção. No entanto, outras variáveis do problema foram também abordadas, como a malha a utilizar e o modelo mais fiável.

A primeira vertente abordada neste estudo prendeu-se com saber qual a malha mais indicada a utilizar no restante processo. Assim, e depois de analisadas as variáveis em jogo foi decidida a adopção de uma malha com um refinamento intermédio.

Seguidamente procurou-se dar resposta a qual dos modelos se poderia atribuir maior fiabilidade. Foi escolhido o modelo Realizable $k-\varepsilon$ depois de se pesarem os critérios de avaliação propostos, nomeadamente o tempo computacional requerido por cada modelo e os resultados de velocidades, temperaturas e caudais obtidos por cada um deles.

A partir daqui foram realizadas diversas análises aos resultados obtidos com o modelo escolhido, tais como:

1. Em termos de velocidade do ar é garantido o conforto dos ocupantes já que em situação alguma se ultrapassou o valor de 0,25 m/s, tomado como padrão na área da Climatização para assegurar as condições ideais de conforto num espaço fechado e ventilado;
2. Verifica-se também, sem surpresas, que os pontos mais críticos em termos de velocidade do ar são imediatamente à saída das grelhas de insuflação e imediatamente antes da entrada das grelhas de extracção;
3. Ainda no campo da velocidade do ar interior deve-se referir também a observação natural da mistura de jactos durante o processo de insuflação de ar novo na sala;
4. Para terminar o capítulo da velocidade, constatou-se também não existirem nenhuma diferença de valores independentemente da estação estudada;
5. Já no campo das temperaturas interiores do auditório, a primeira ilação a tirar é que os gradientes de temperatura são bastante pequenos (inferiores a 1° C) o que também favorece o conforto térmico dos utentes da sala;
6. Verificam-se mesmo assim pequenos gradientes térmicos, tanto de verão como de Inverno, mais notáveis em zonas próximas das paredes;
7. É observável também que na situação de Verão, como a temperatura do ar insuflado é inferior à temperatura do piso, que o ar tende a descer com maior facilidade devido ao diferencial relativo de densidade;
8. Constata-se também que nas zonas de maior pé-direito (desde as primeiras duas/três filas até ao quadro) possuem uma maior homogeneidade térmica em altura, no entanto verifica-se o contrário ao longo da largura do auditório nesta zona.

As dimensões do auditório foram reproduzidas o mais fielmente possível com base nas condições de projecto de modo a minimizar a influência de erros no presente trabalho. No entanto, vários pontos devem ser focados numa análise aos resultados obtidos, nomeadamente o baixo gradiente térmico observado, de facto num auditório com estas dimensões seria expectável um gradiente térmico mais elevado, na ordem dos 5/7 ° C. As velocidades obtidas também ao longo deste trabalho não parecem representar fielmente a realidade pois uma maior gama de velocidades era esperada.

Tais conclusões prendem-se muito com a minha inexperiência na utilização de um *software* tão complexo e desafiante como o ANSYS FLUENT, ainda mais sendo o processo de aprendizagem muito auto-didacta, no entanto constato que foi um marco importante na minha formação e que me permitiu consolidar conhecimentos adquiridos e aprender novos conceitos.

Como trabalho de futuro é recomendado e como seguimento a este trabalho, um estudo das condições actuais reais do anfiteatro, tanto geométricas como da instalação de ar condicionado. Posteriormente seria também bastante interessante e produtivo realizar ensaios térmicos, pelo menos de velocidade e temperatura para servirem de comparativo a este trabalho proposto.

6. REFERÊNCIAS

ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide, USA, 2009

ANSYS Workbench 12.0 User's Guide, USA, 2009

Patankar, S.V., 1980, "Numerical heat transfer and fluid flow", McGraw-Hill

Gaspar, P. D., Barroca, R. F. e Pitarma, R. A., 2001, "Comparação das simulações numéricas obtidas por códigos comerciais de dinâmica de fluidos computacional"

Gaspar, P. D., Barroca, R. F. e Pitarma, R. A., 2001, "Modelação de problemas AVAC-R com códigos de DFC"

Gaspar, P. D., Miranda, A. e Pitarma, R. A., 2003, "Estudo comparativo do desempenho de códigos de DFC na modelação de equipamentos de refrigeração abertos"

Gaspar, P. D., Miranda, A. e Pitarma, R. A., 2001, "Modelação numérica do desempenho térmico de equipamentos expositores refrigerados"

ANEXOS

ANEXO A – PLANTAS E CORTES

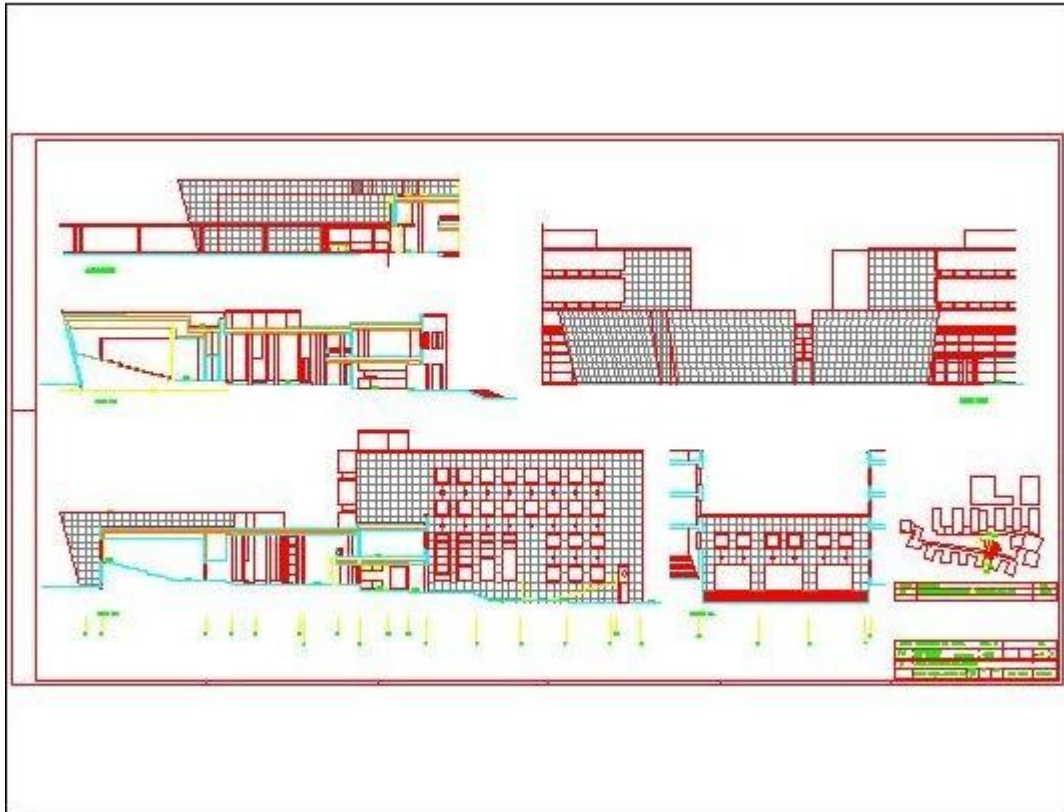


Figura 68 – Corte dos anfiteatros

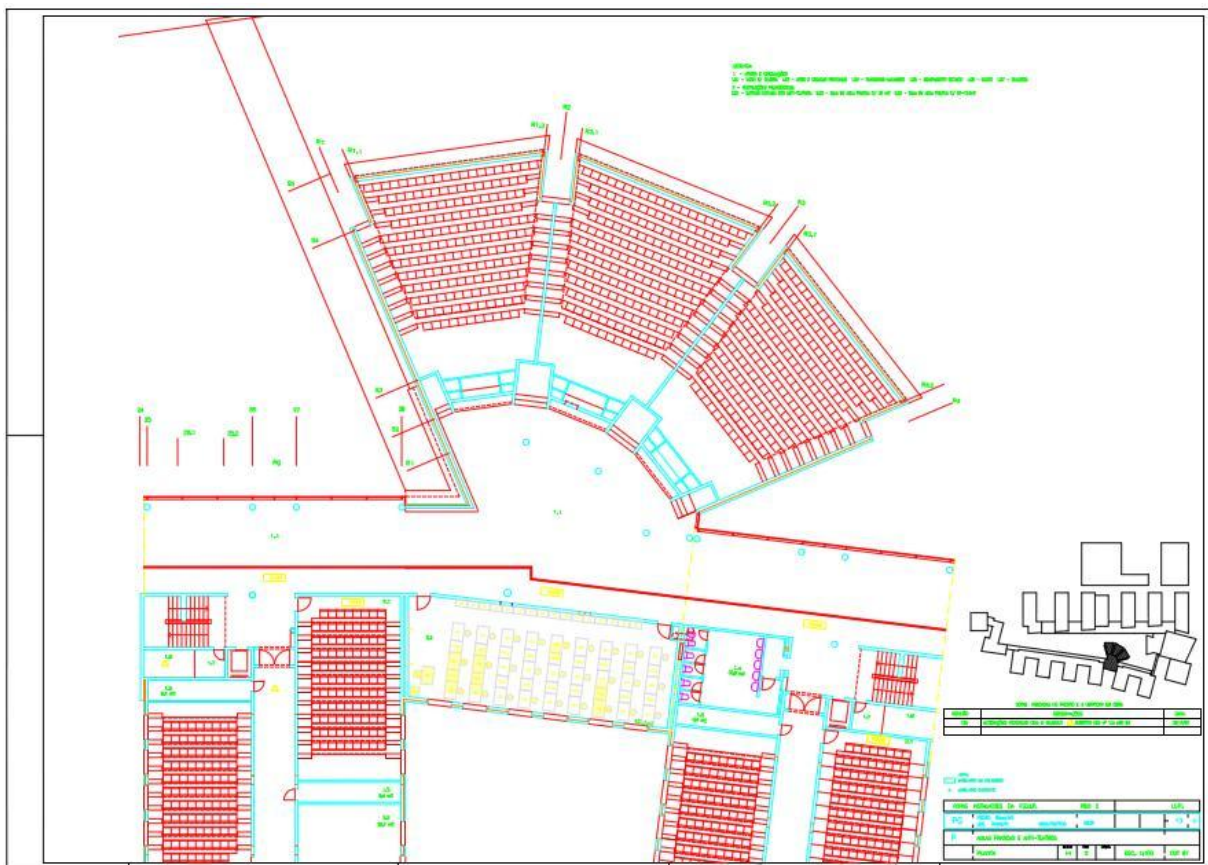


Figura 69 – Planta dos anfiteatros

ANEXO B – VISTAS

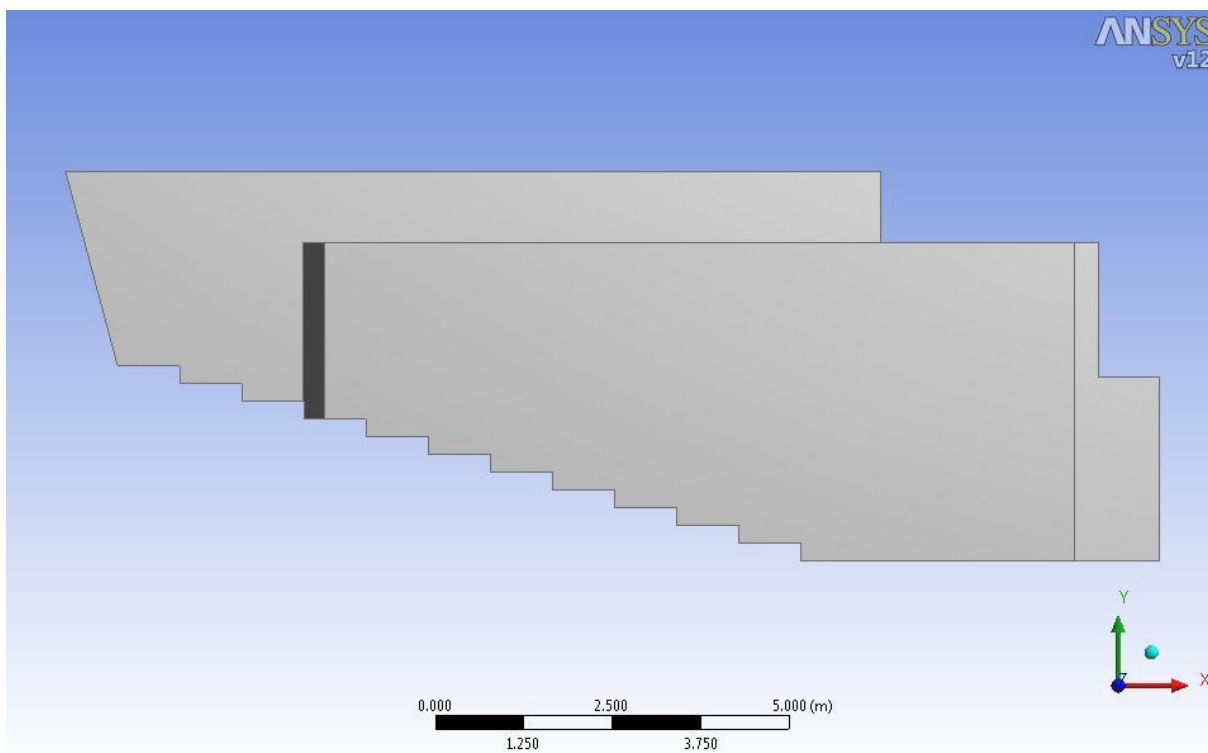


Figura 71 – Vista frontal da geometria do anfiteatro

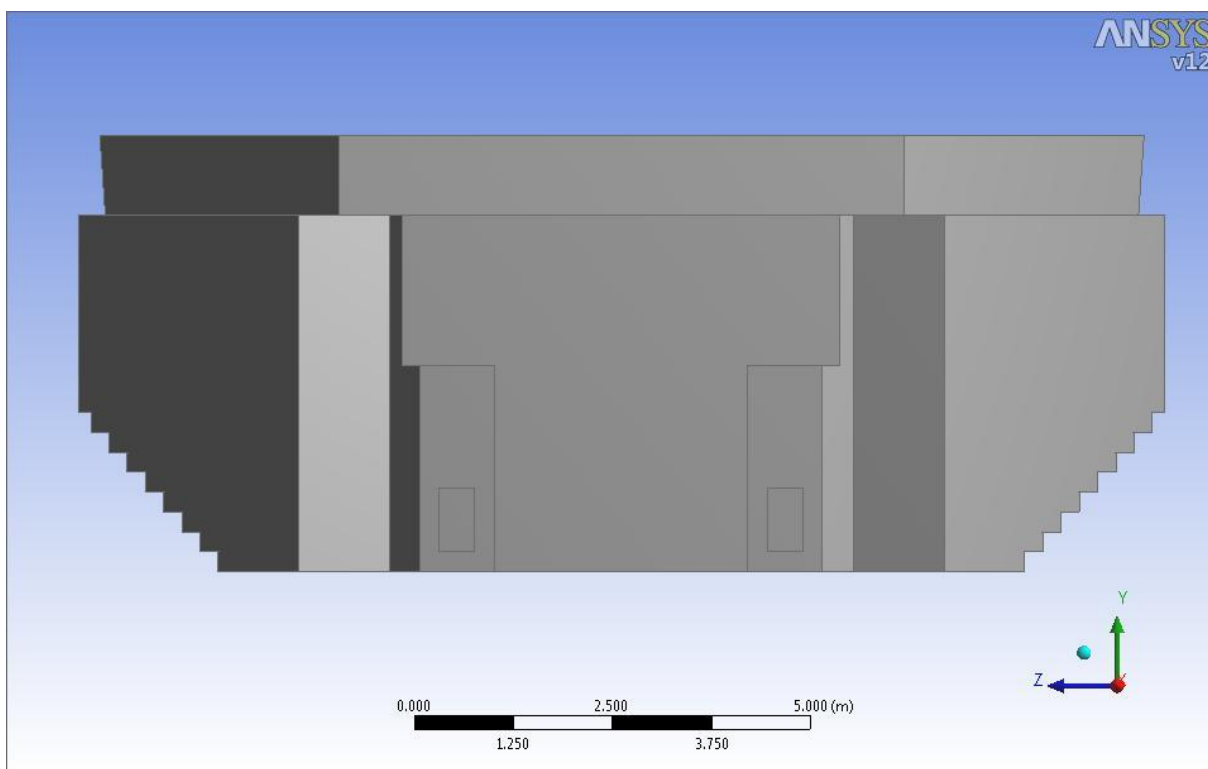


Figura 72 – Vista lateral da geometria do anfiteatro

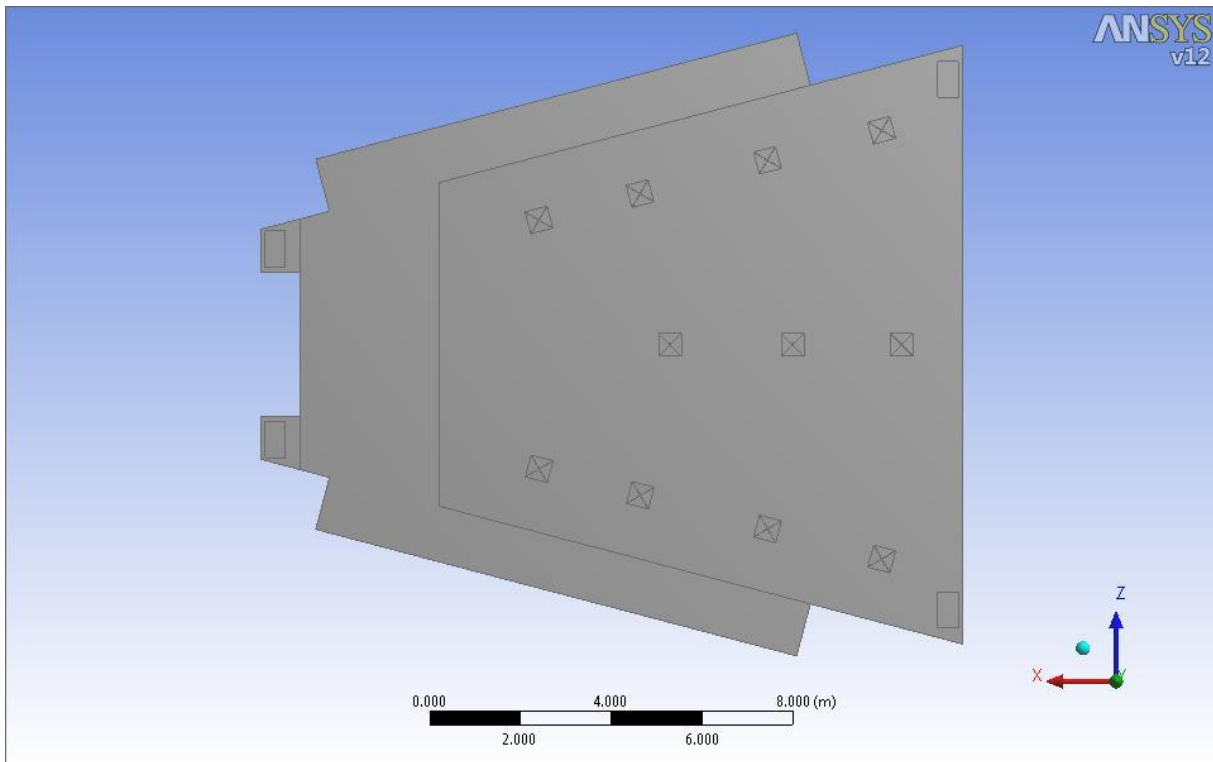


Figura 73 – Vista de topo da geometria do anfiteatro

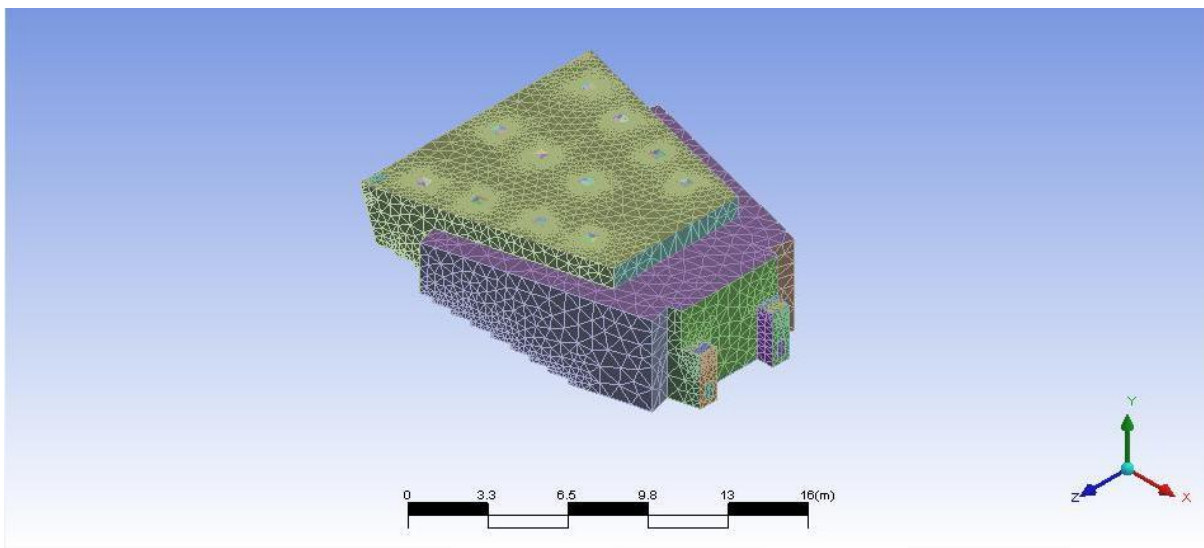


Figura 74 – Perspectiva isométrica da malha grosseira

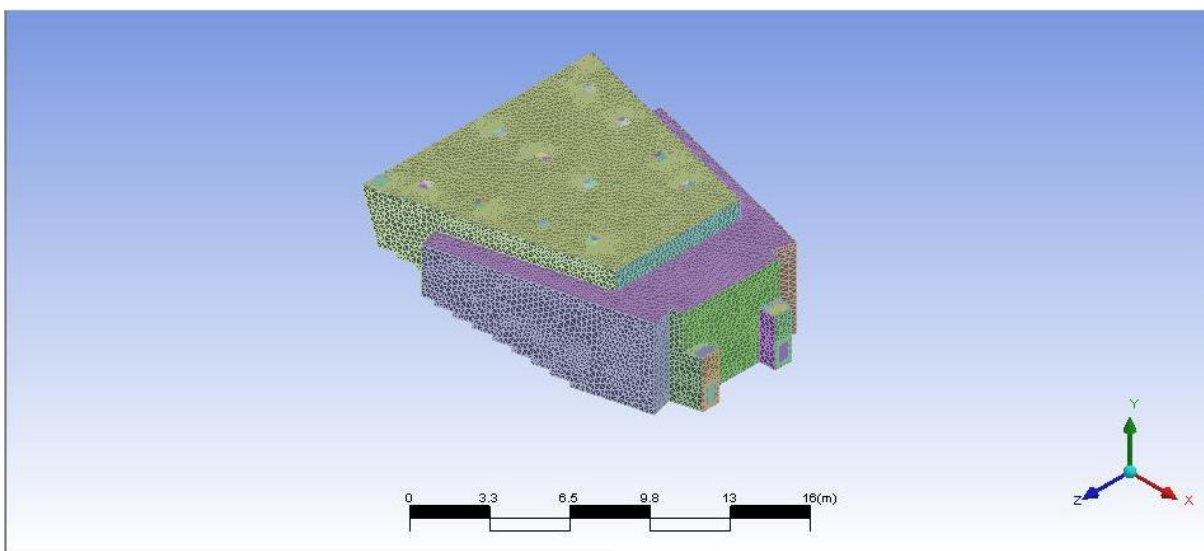
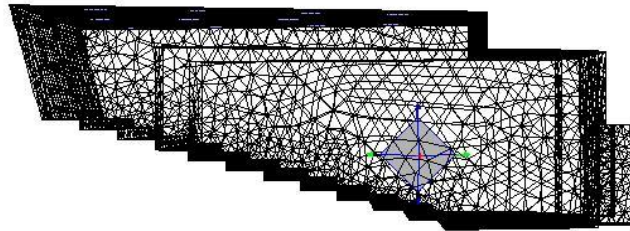


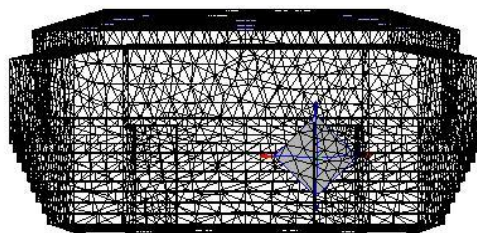
Figura 75 – Perspectiva isométrica da malha fina



Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

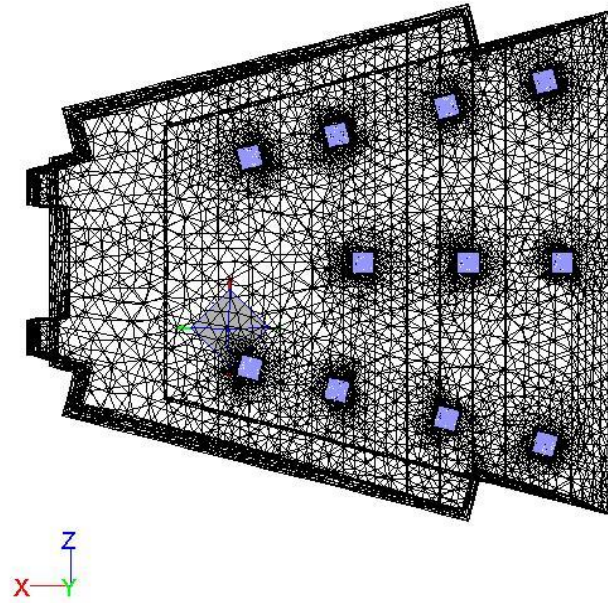
Figura 76 – Vista frontal do ponto b-d



Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

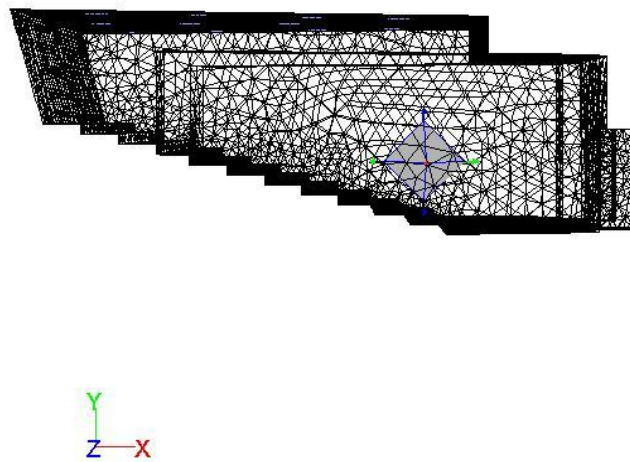
Figura 77 – Vista lateral do ponto b-d



Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

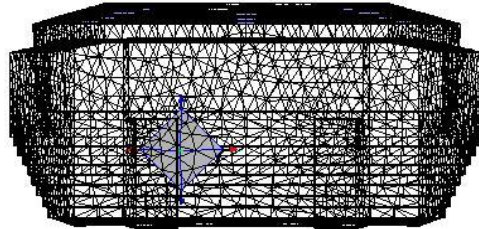
Figura 78 – Vista de topo do ponto b-d



Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

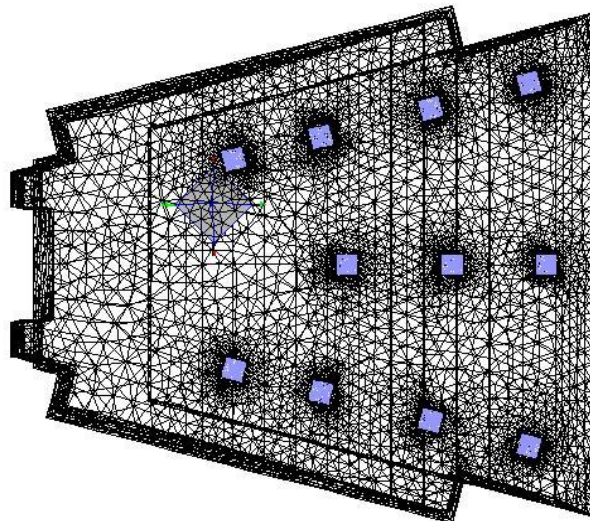
Figura 79 – Vista frontal do ponto b-e



Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

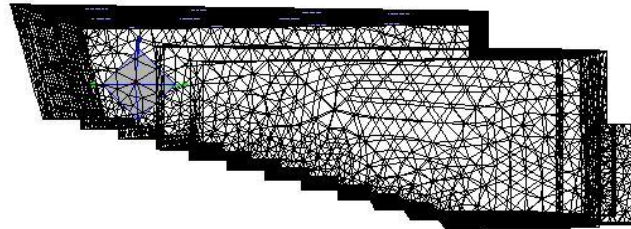
Figura 80 – Vista lateral do ponto b-e



Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

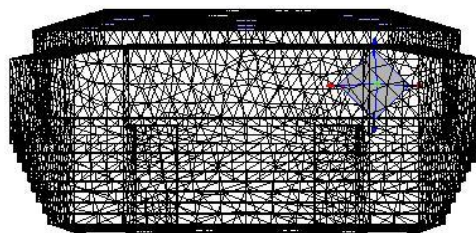
Figura 81 – Vista de topo do ponto b-e



Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

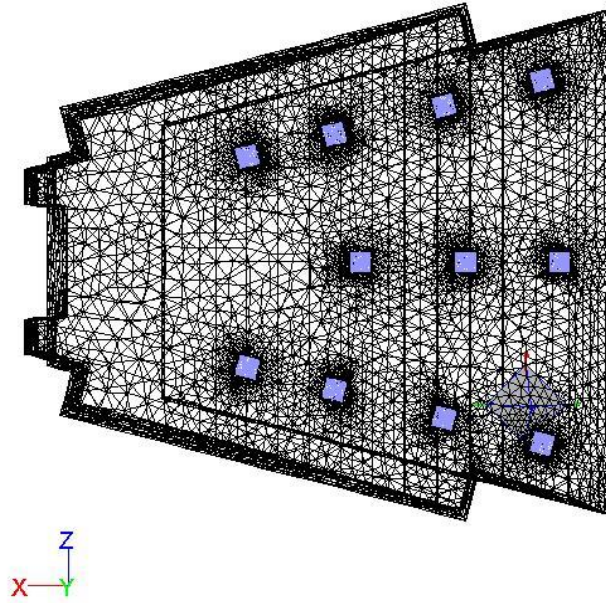
Figura 82 – Vista frontal do ponto c-d



Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

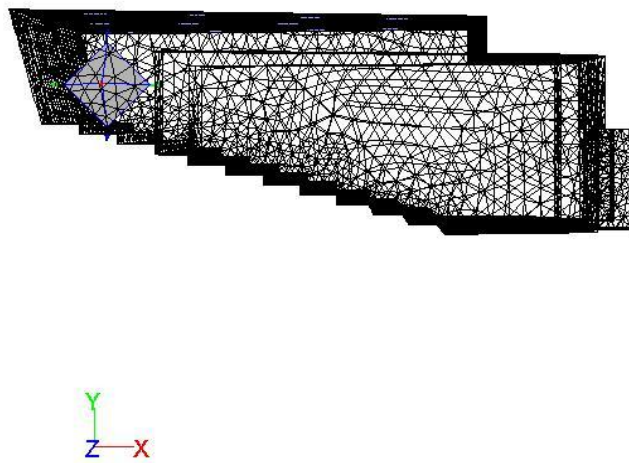
Figura 83 – Vista lateral do ponto c-d



Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

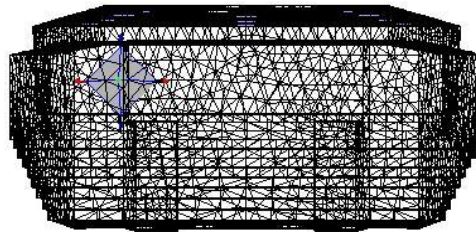
Figura 84 – Vista de topo do ponto c-d



Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

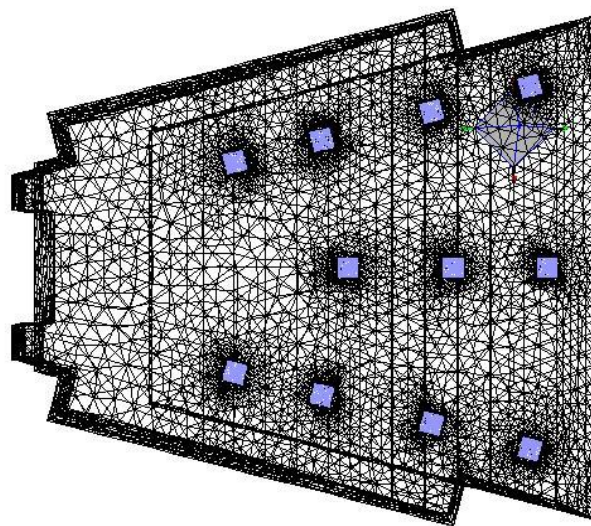
Figura 85 – vista frontal do ponto c-e



Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

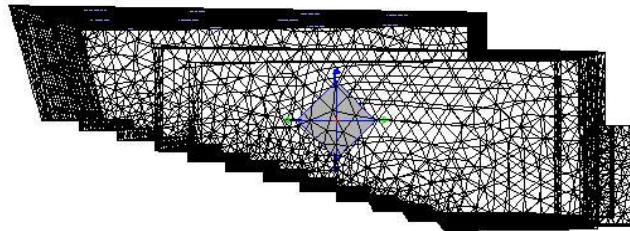
Figura 86 – Vista lateral do ponto c-e



Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

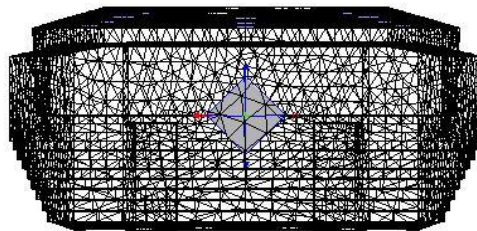
Figura 87 – Vista de topo do ponto c-e



Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

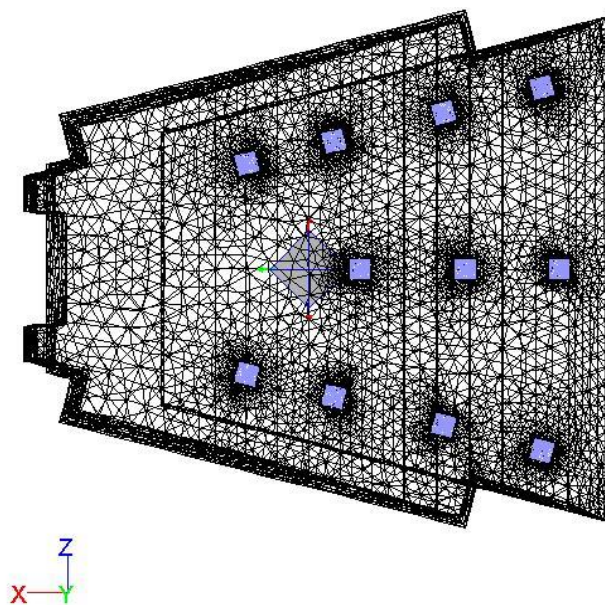
Figura 88 – Vista frontal do ponto central



Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

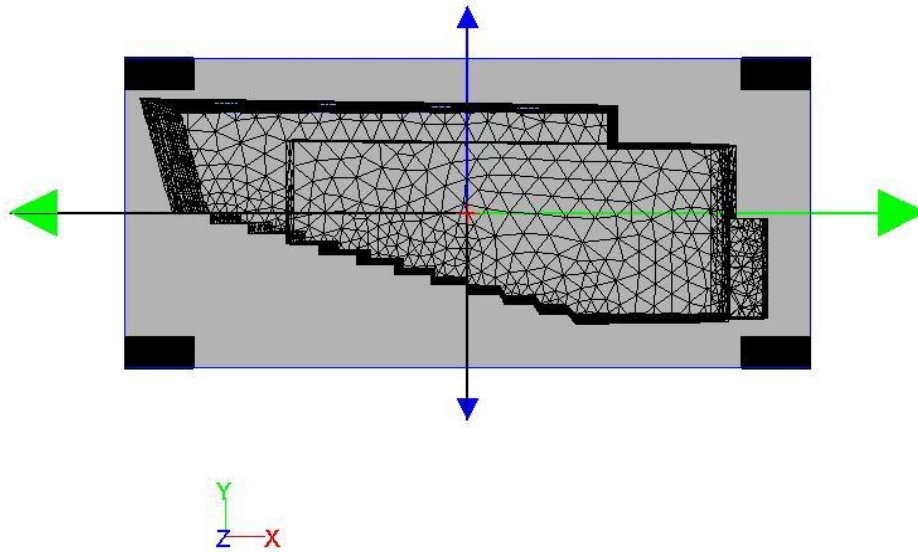
Figura 89 – Vista lateral do ponto frontal



Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

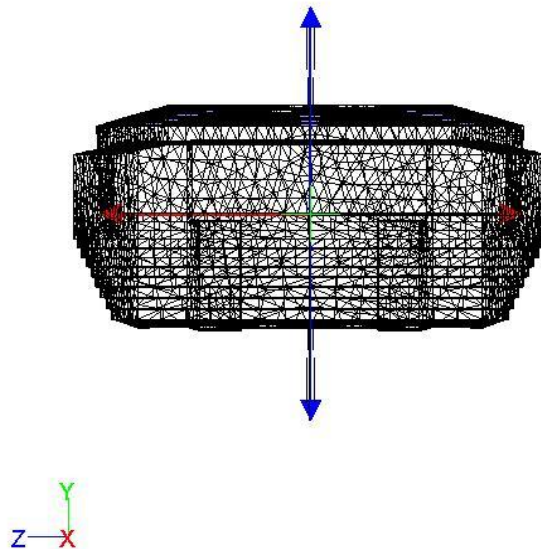
Figura 90 – Vista de topo do ponto central



Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

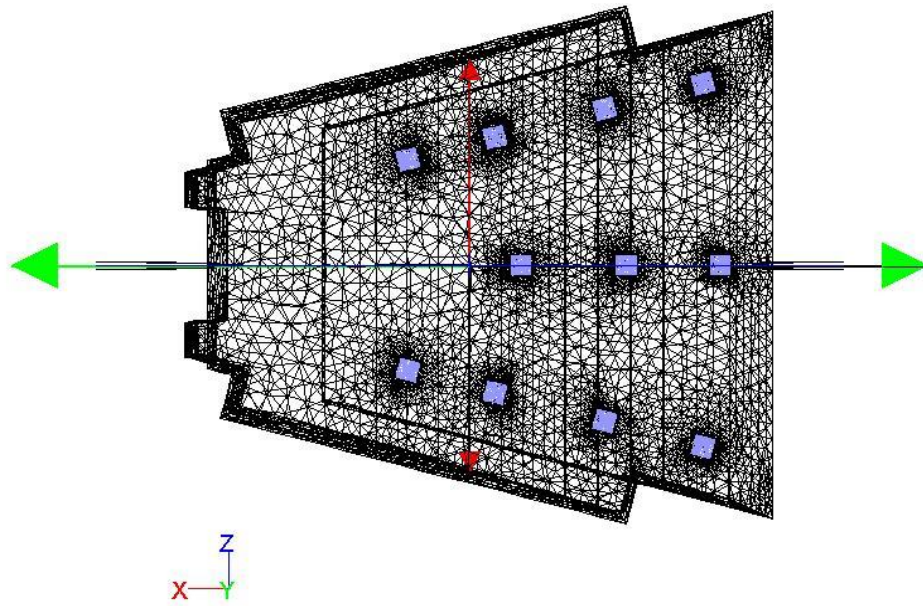
Figura 91 – Vista frontal do plano de simetria



Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

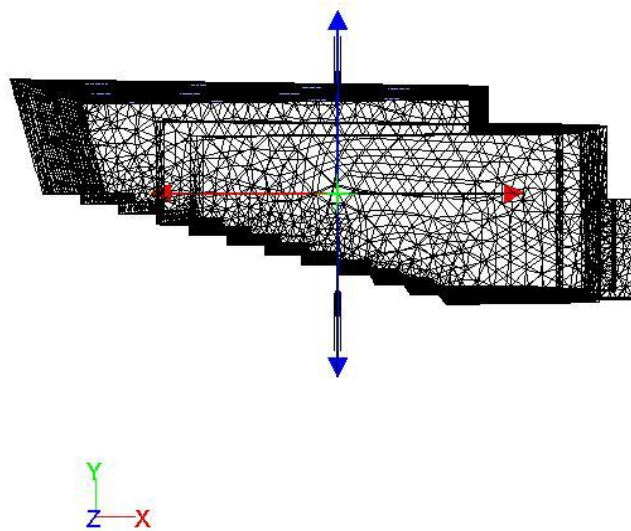
Figura 92 – Vista lateral do plano de simetria



Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

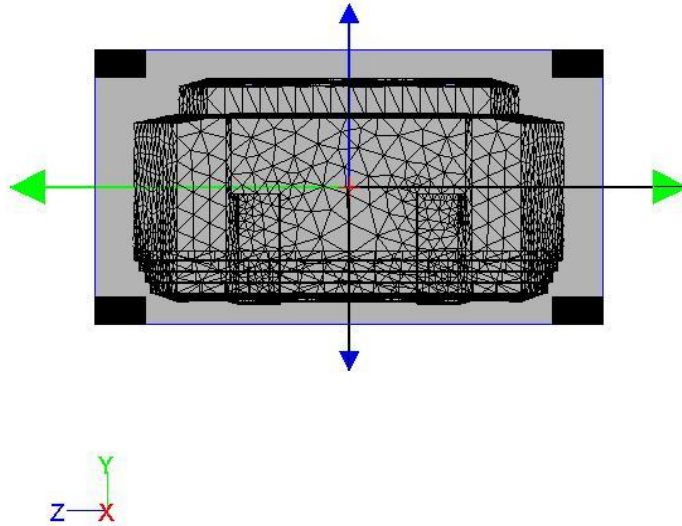
Figura 93 – Vista de topo do plano de simetria



Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

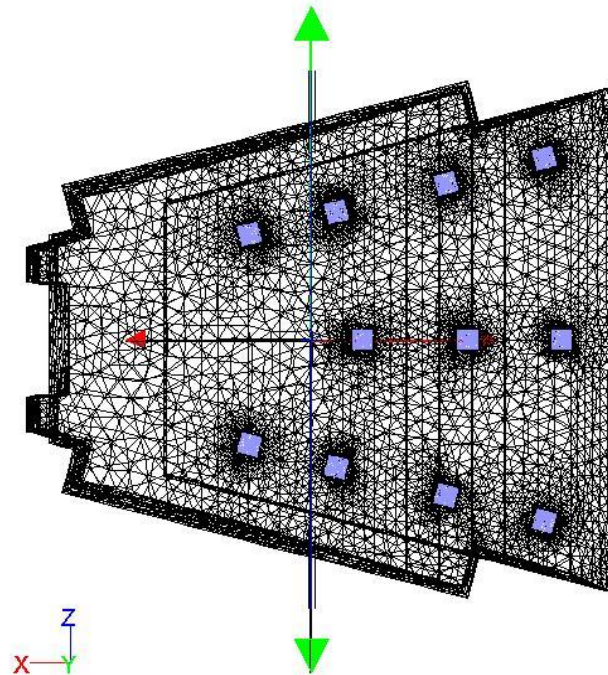
Figura 94 – Vista frontal do plano do meio



Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

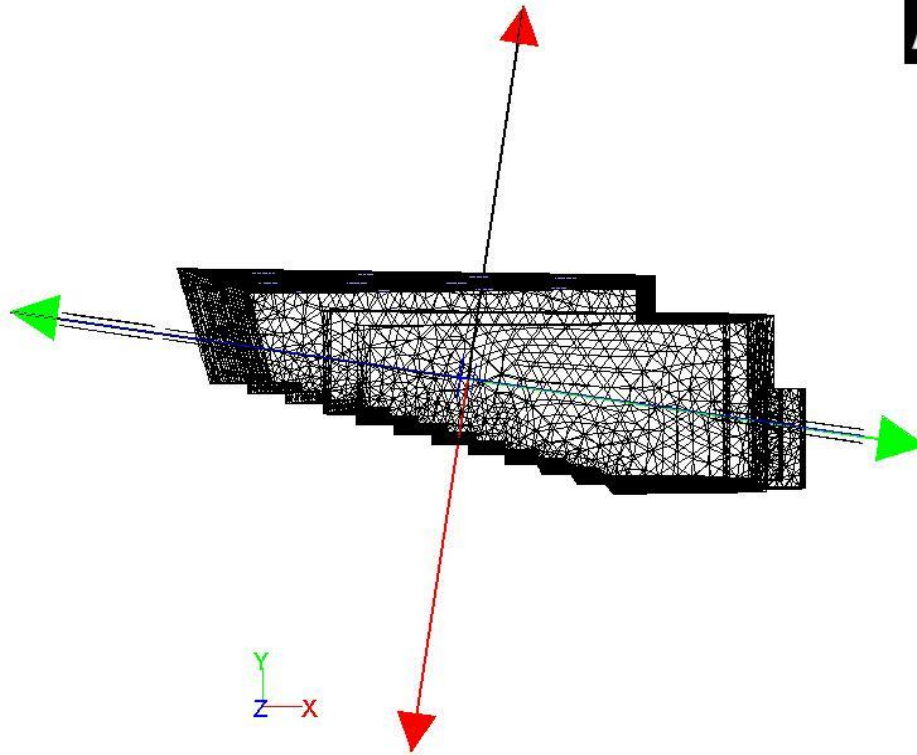
Figura 95 – Vista lateral do plano do meio



Mesh

Jun 30, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

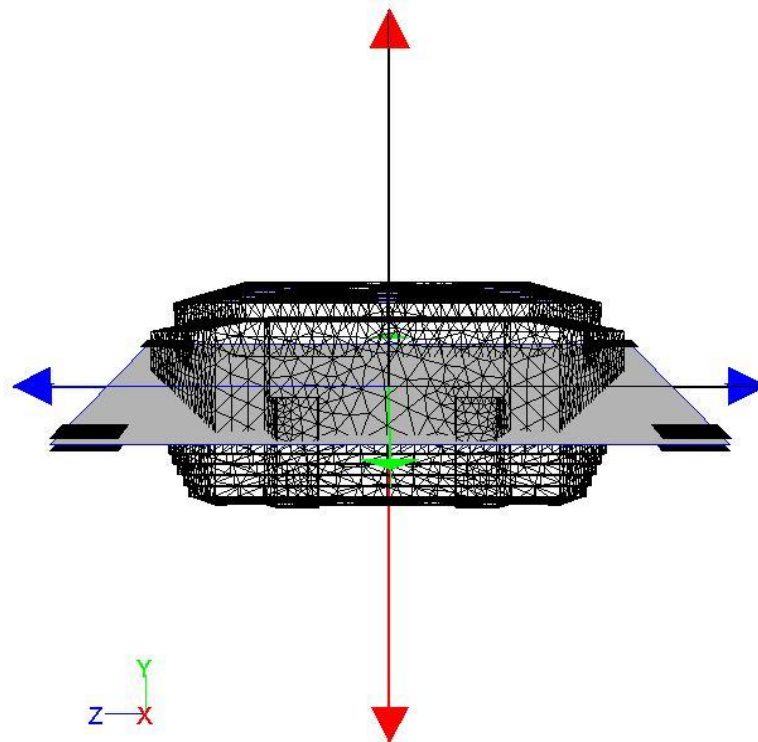
Figura 96 – Vista de topo do plano do meio



Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

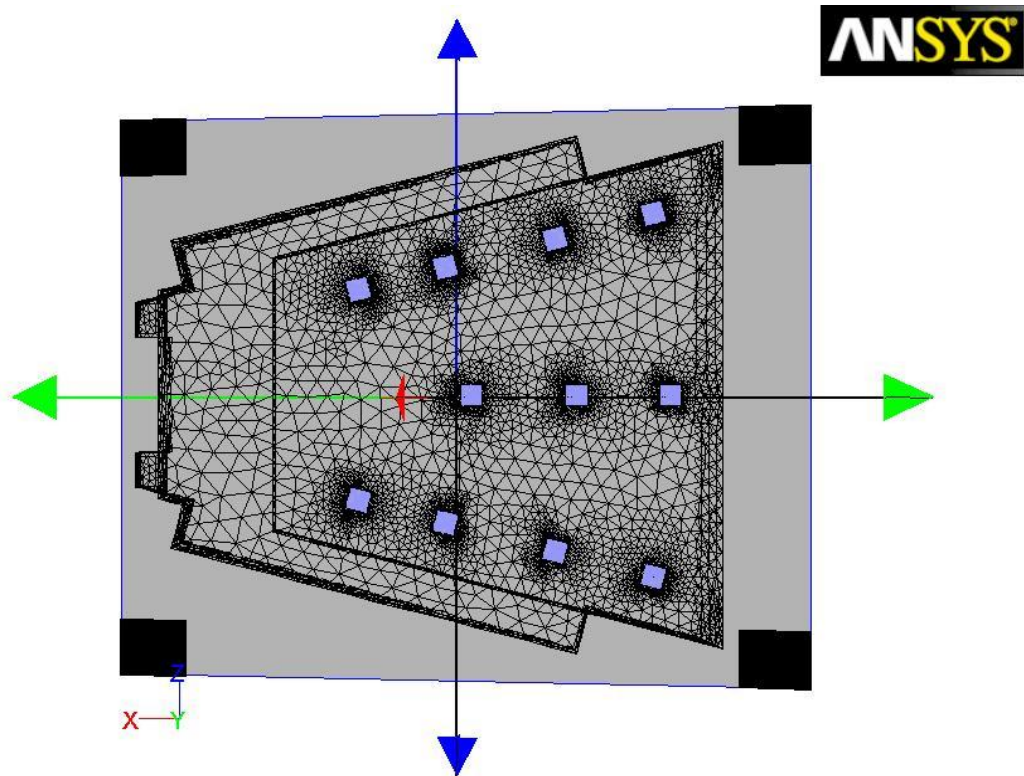
Figura 97 – Vista frontal do plano útil



Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

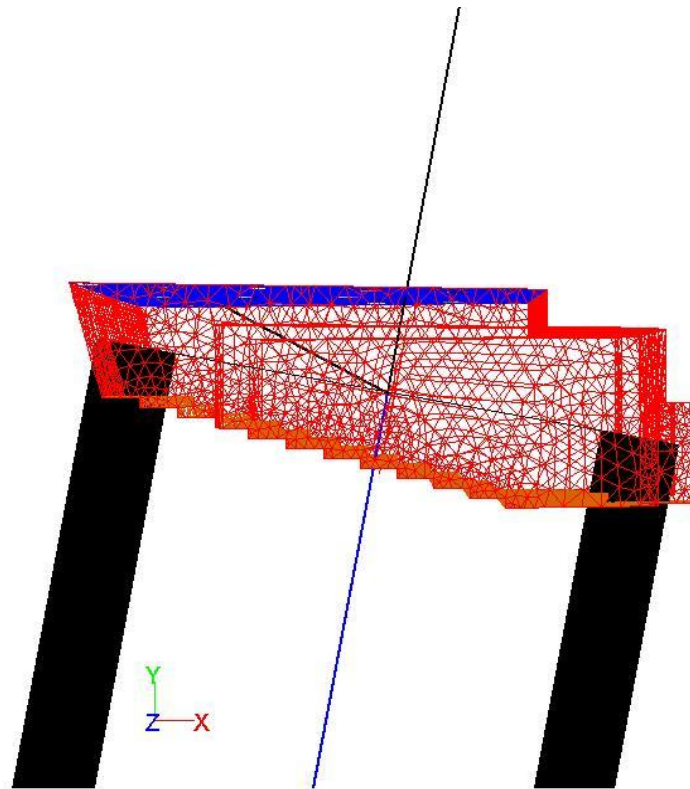
Figura 98 – Vista lateral do plano útil



Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

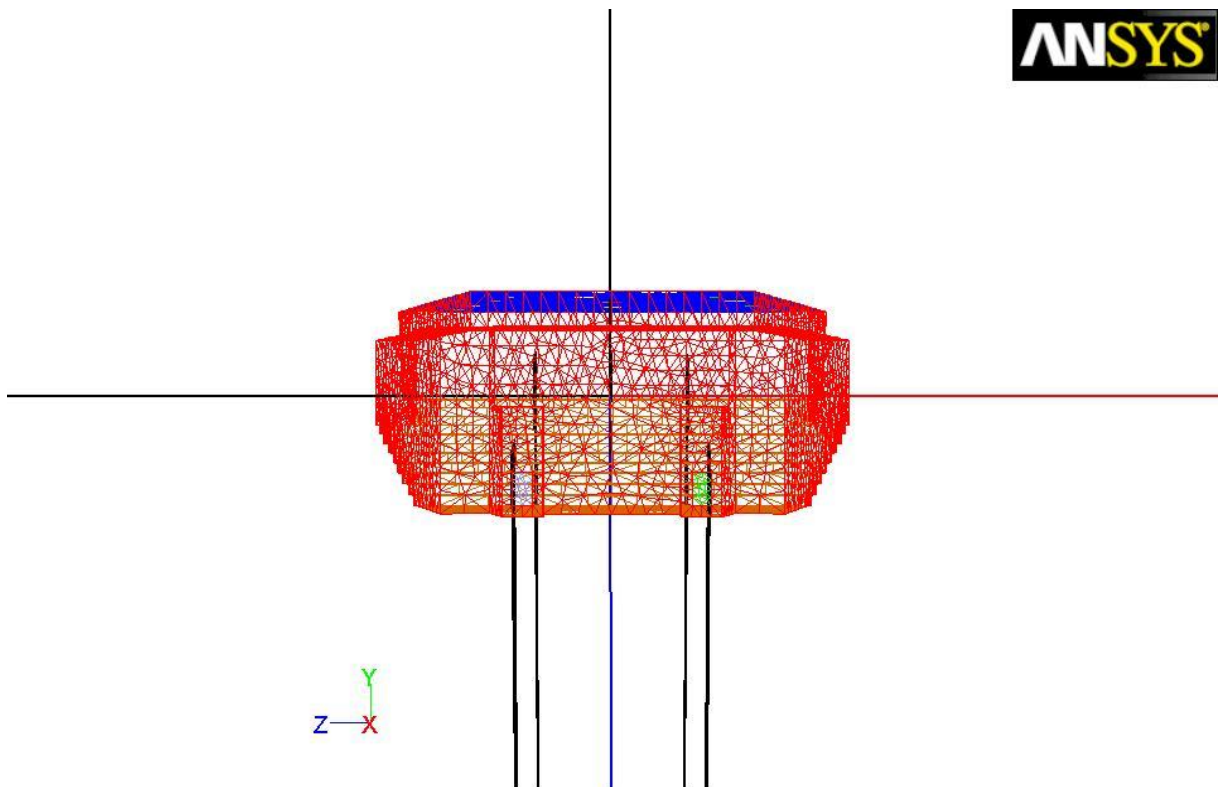
Figura 99 – Vista de topo do plano útil



Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

Figura 100 – Vista frontal da linha central

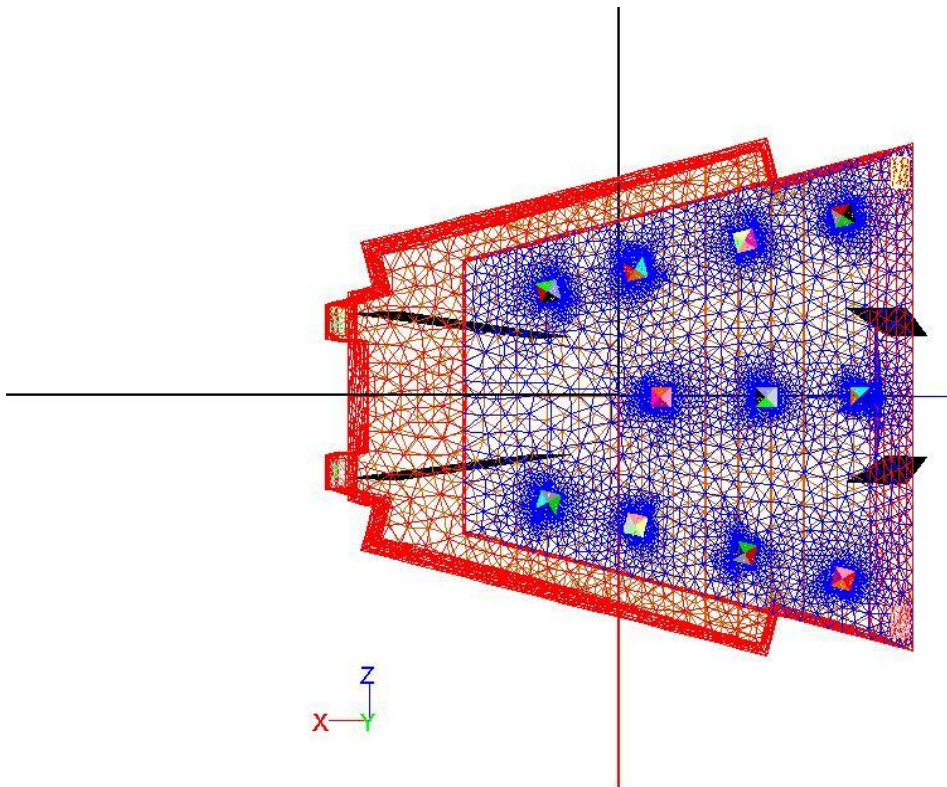


Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

Figura 101 – Vista lateral da linha central

ANSYS

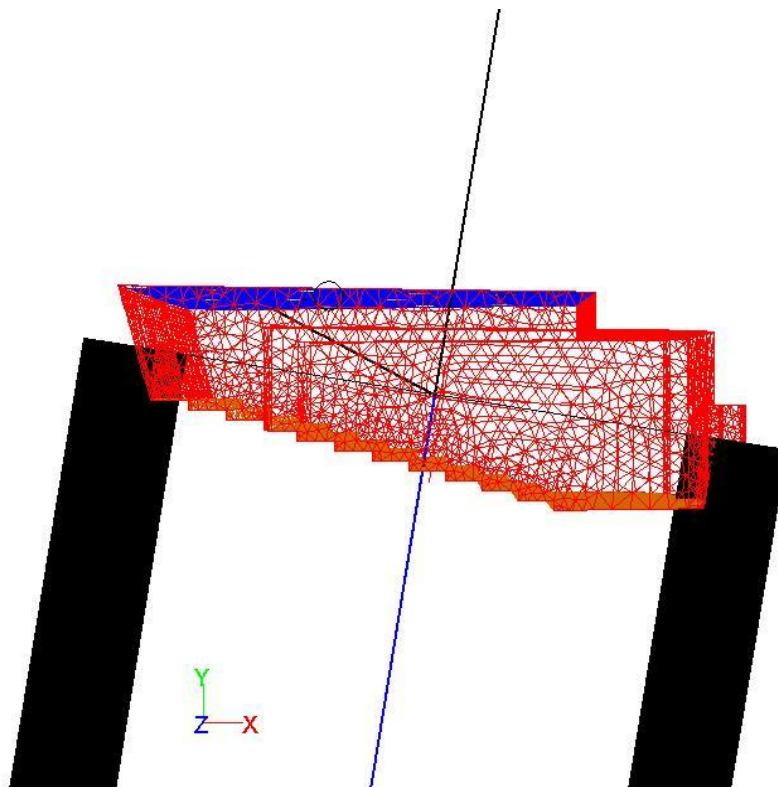


Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

Figura 102 – Vista de topo da linha central

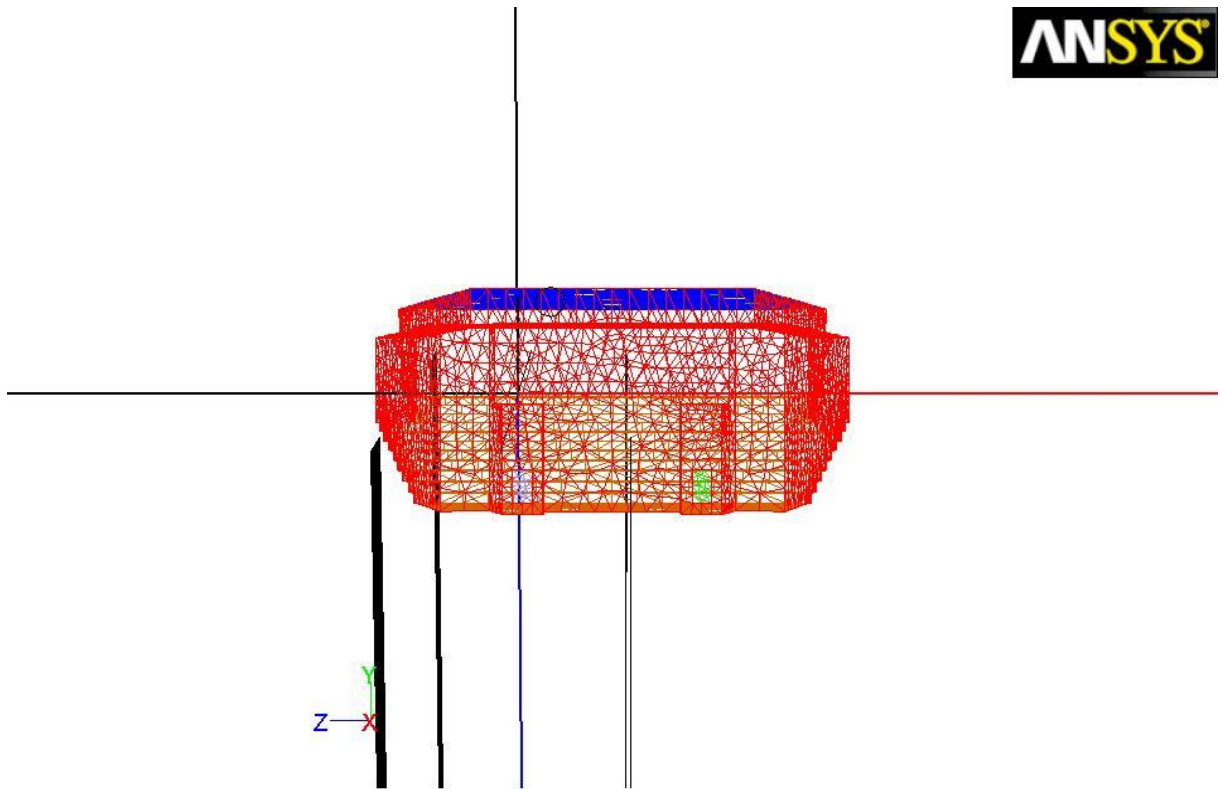
ANSYS



Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

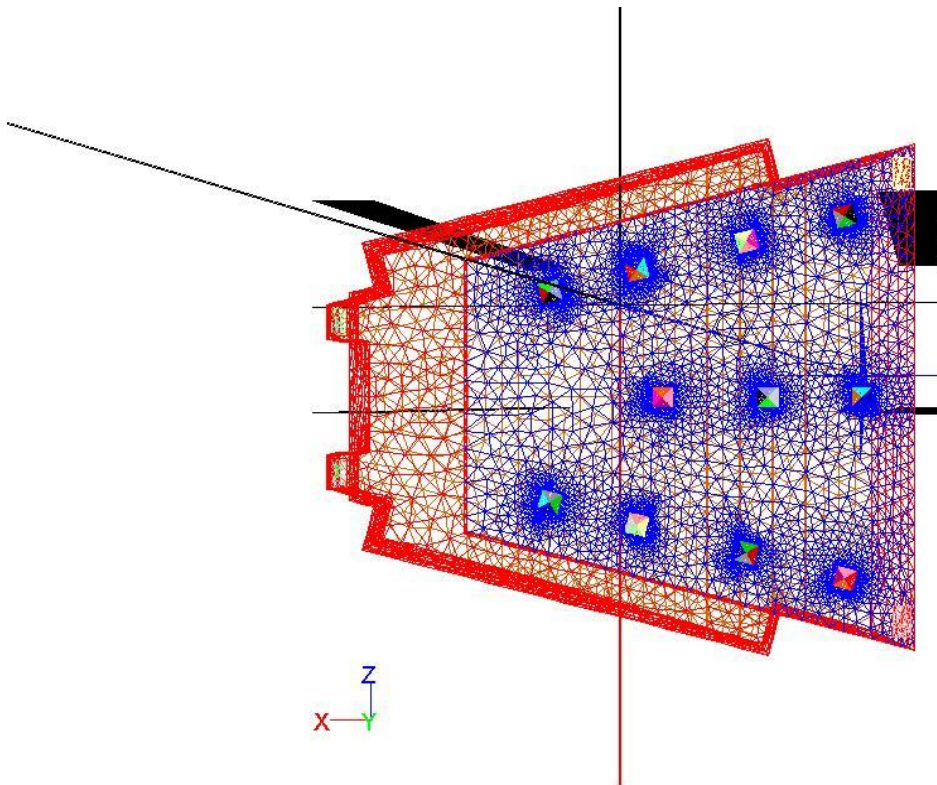
Figura 103 – Vista frontal da linha da esquerda



Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

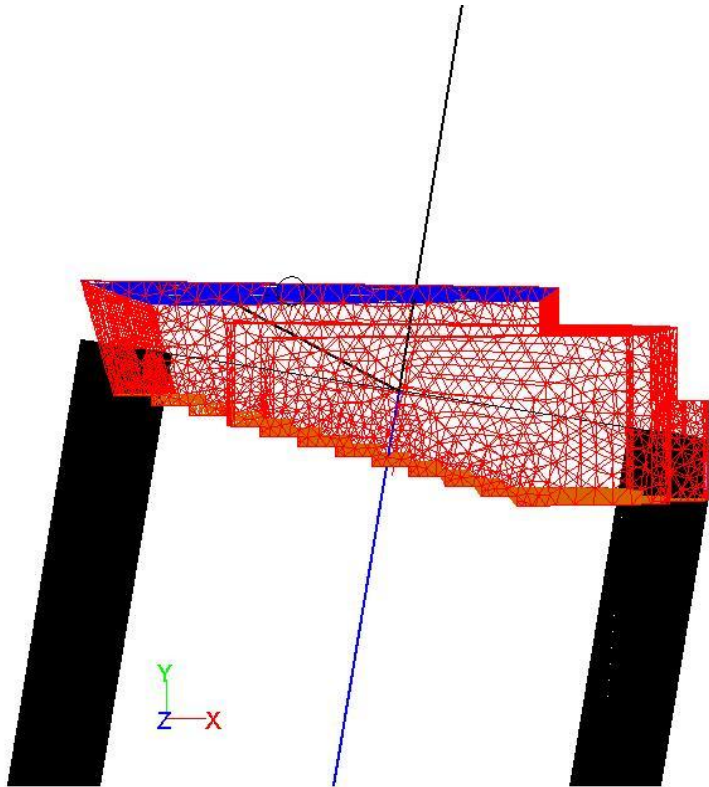
Figura 104 – Vista lateral da linha da esquerda



Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

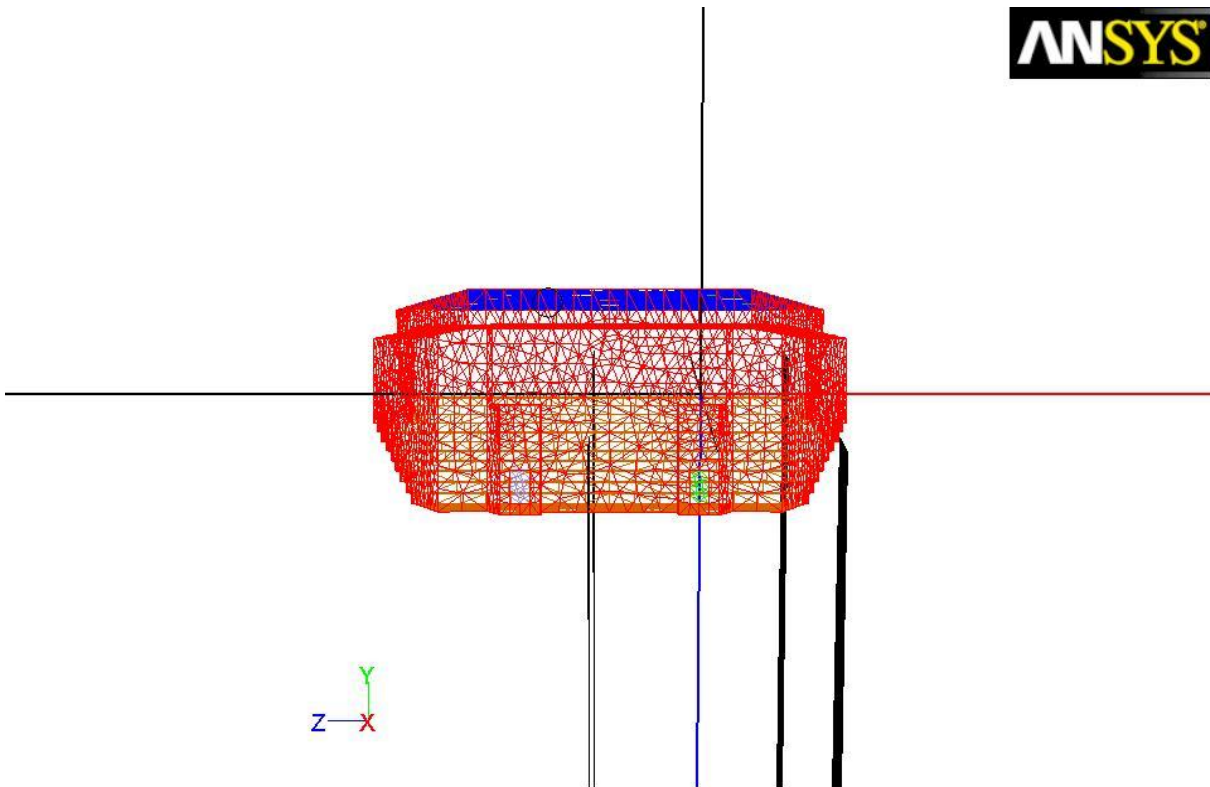
Figura 105 – Vista de topo da linha da esquerda



Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

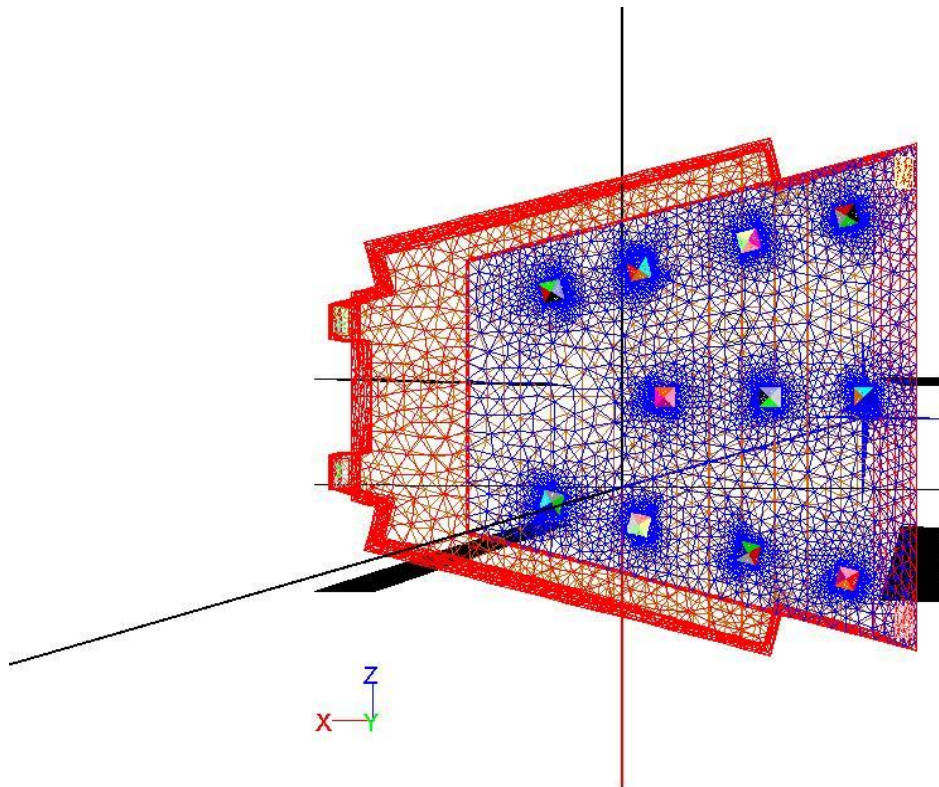
Figura 106 – Vista frontal da linha da direita



Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

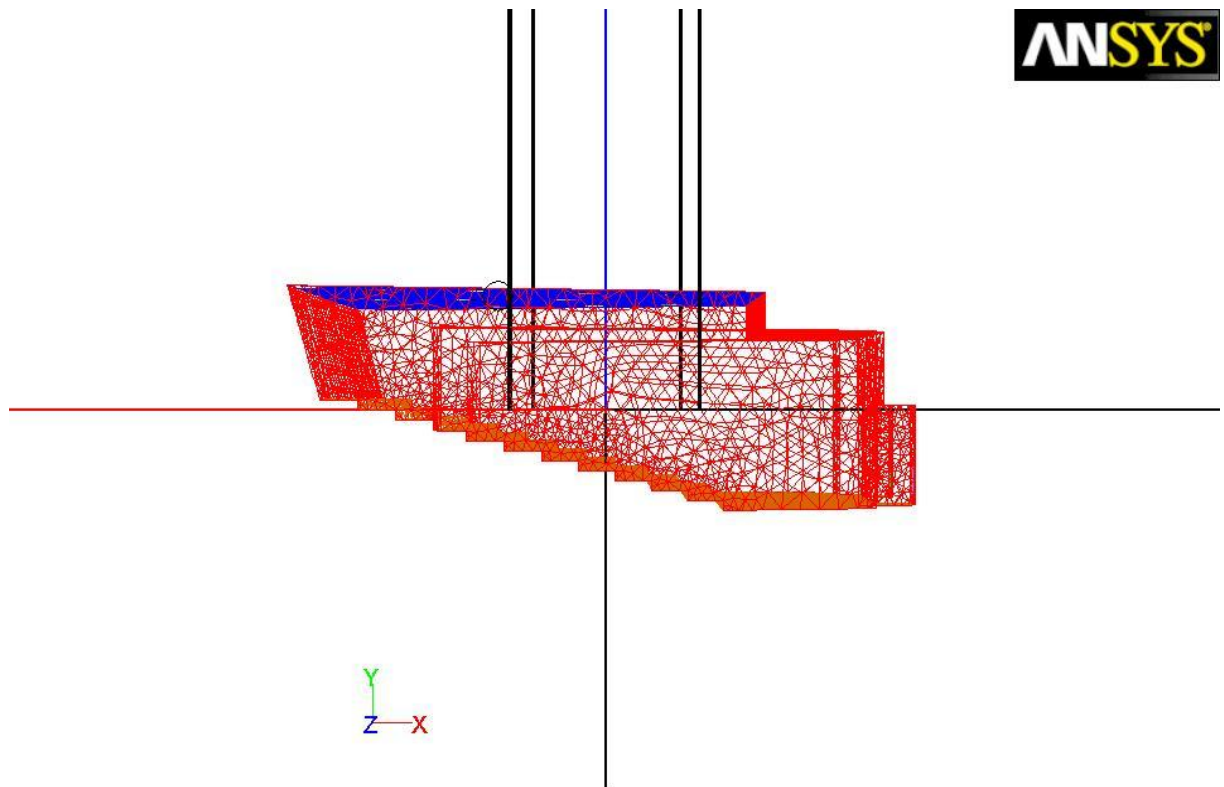
Figura 107 – Vista lateral da linha da direita



Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

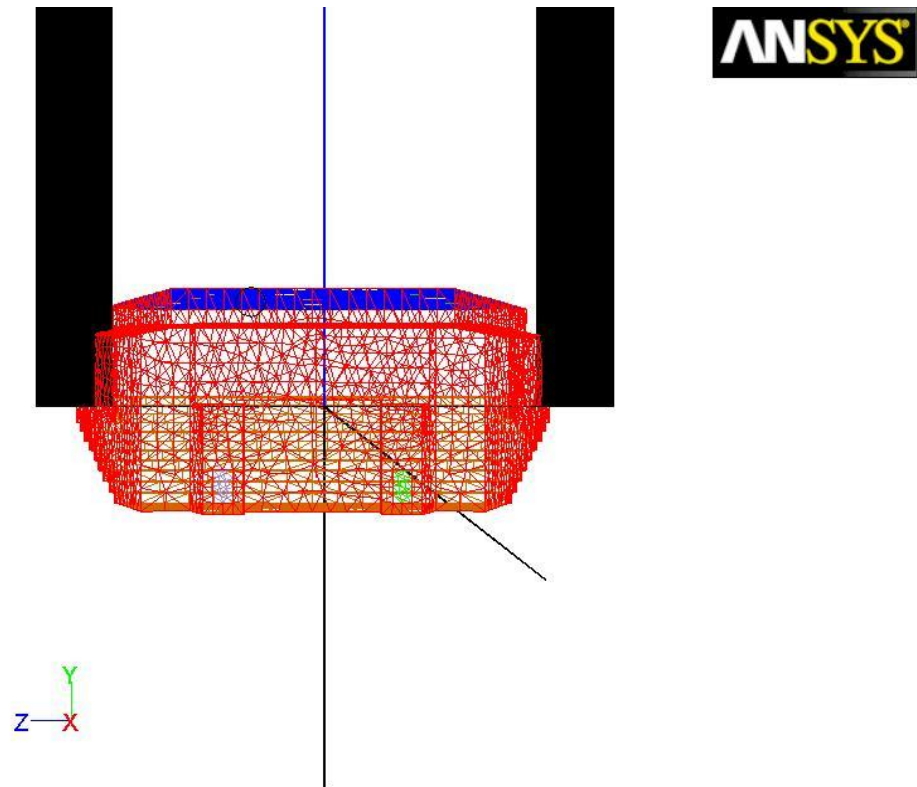
Figura 108 – Vista de topo da linha da direita



Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

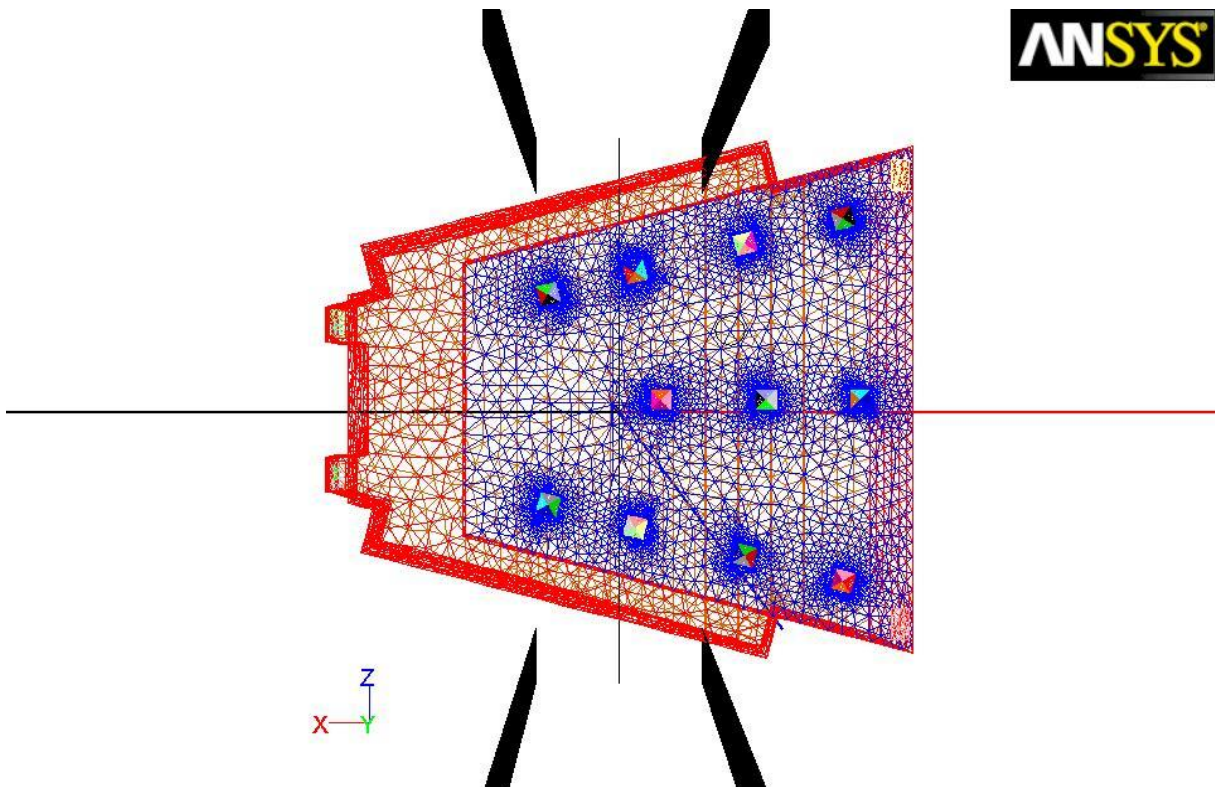
Figura 109 – Vista frontal da linha do meio



Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

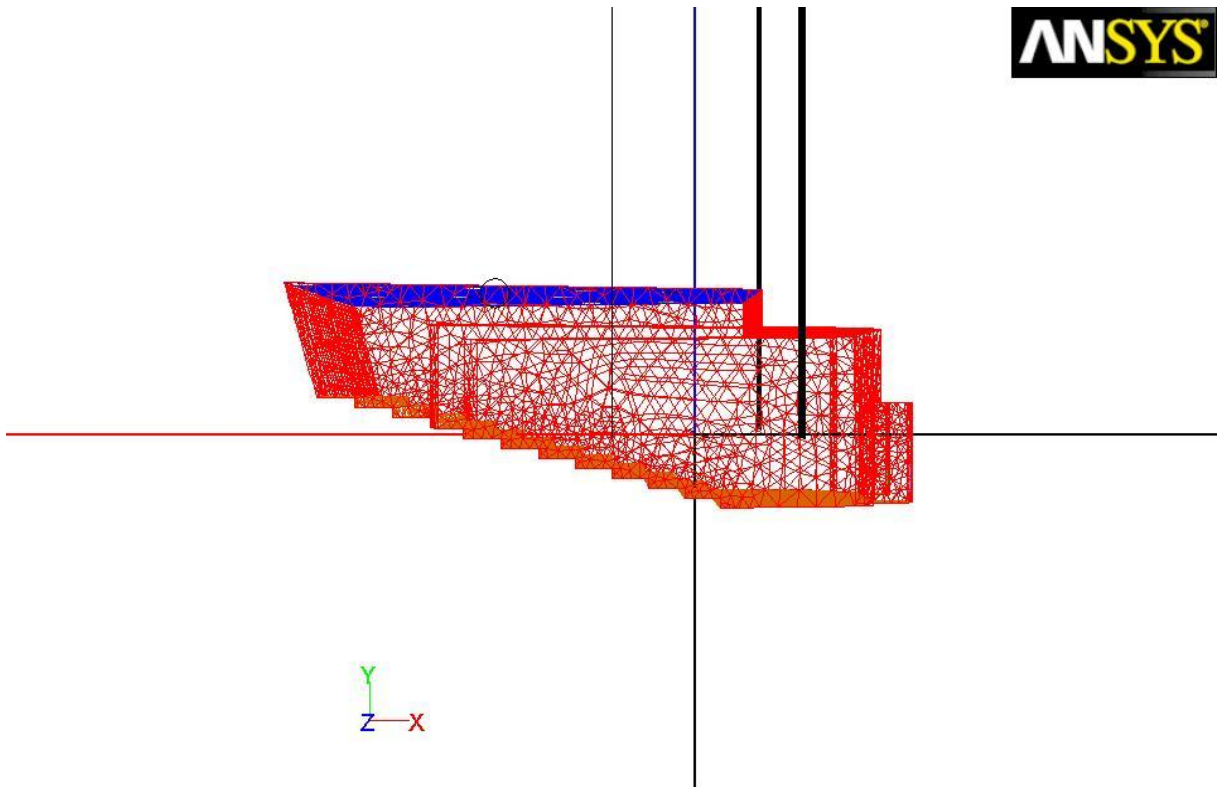
Figura 110 – Vista lateral da linha do meio



Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

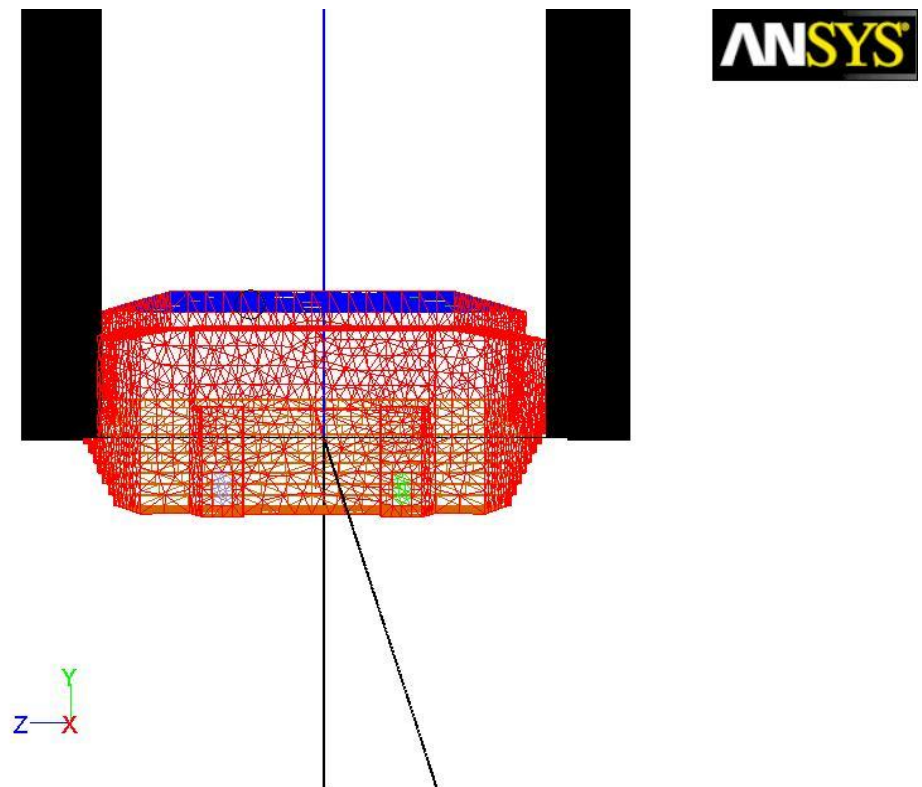
Figura 111 – Vista de topo da linha do meio



Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

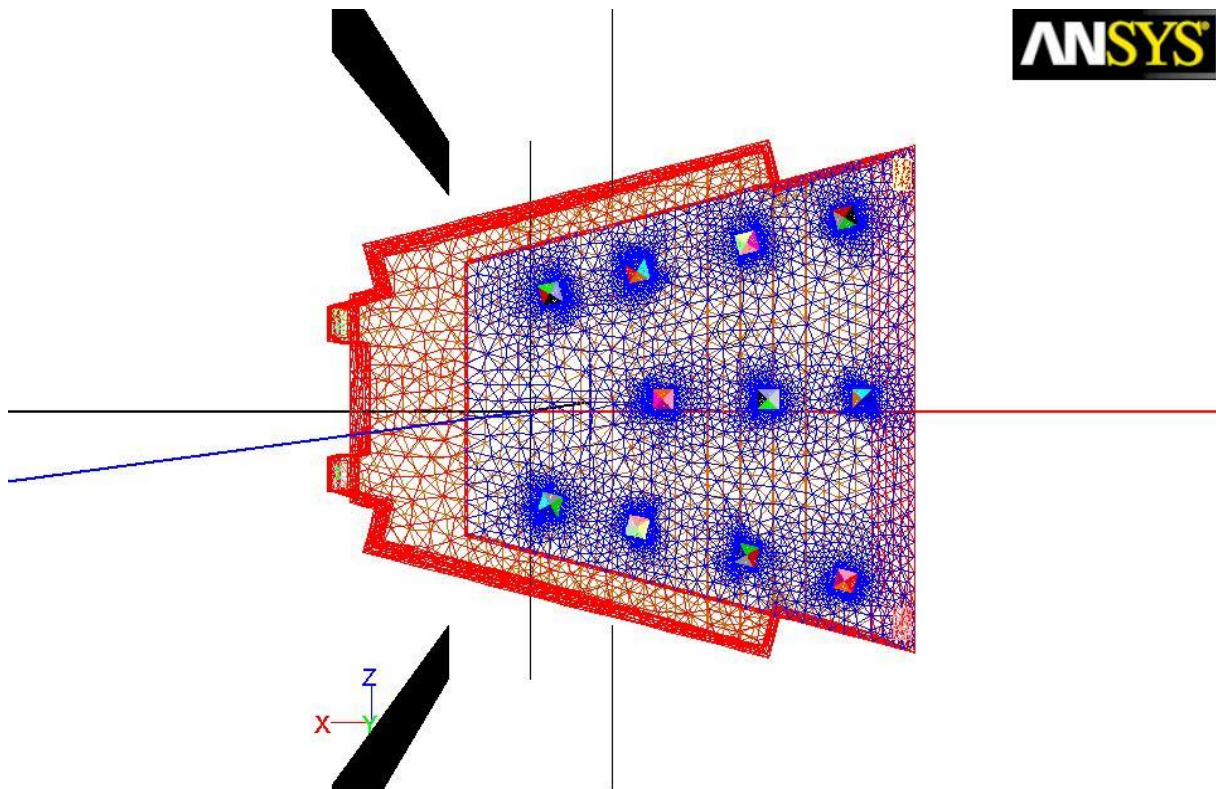
Figura 112 – Vista frontal da linha de baixo



Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

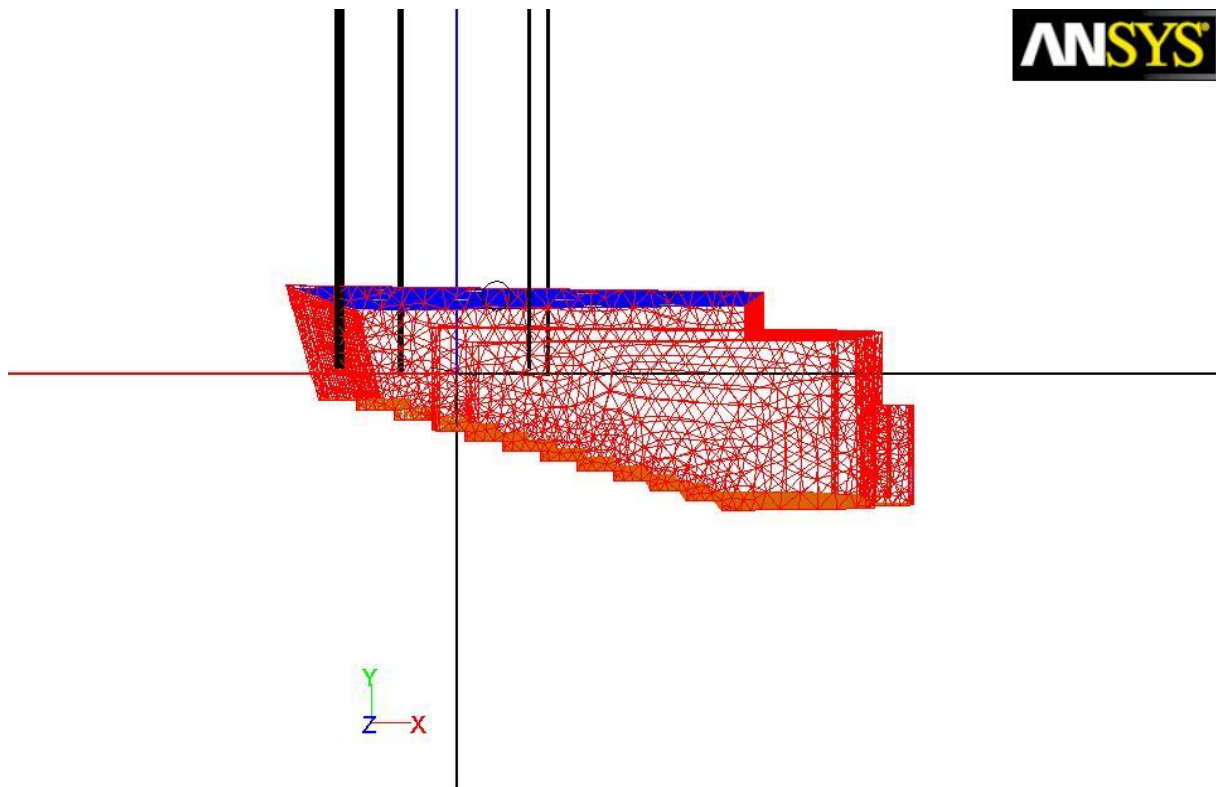
Figura 113 – Vista lateral da linha de baixo



Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

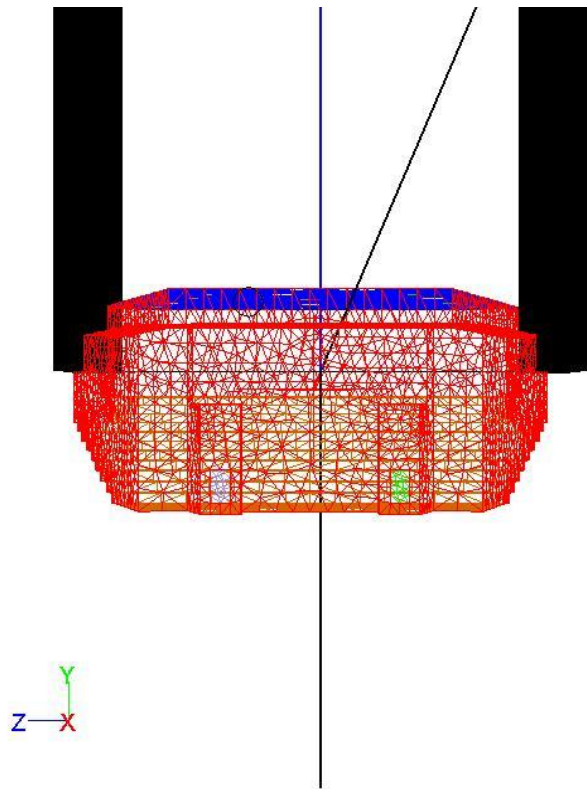
Figura 114 – Vista de topo da linha de baixo



Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

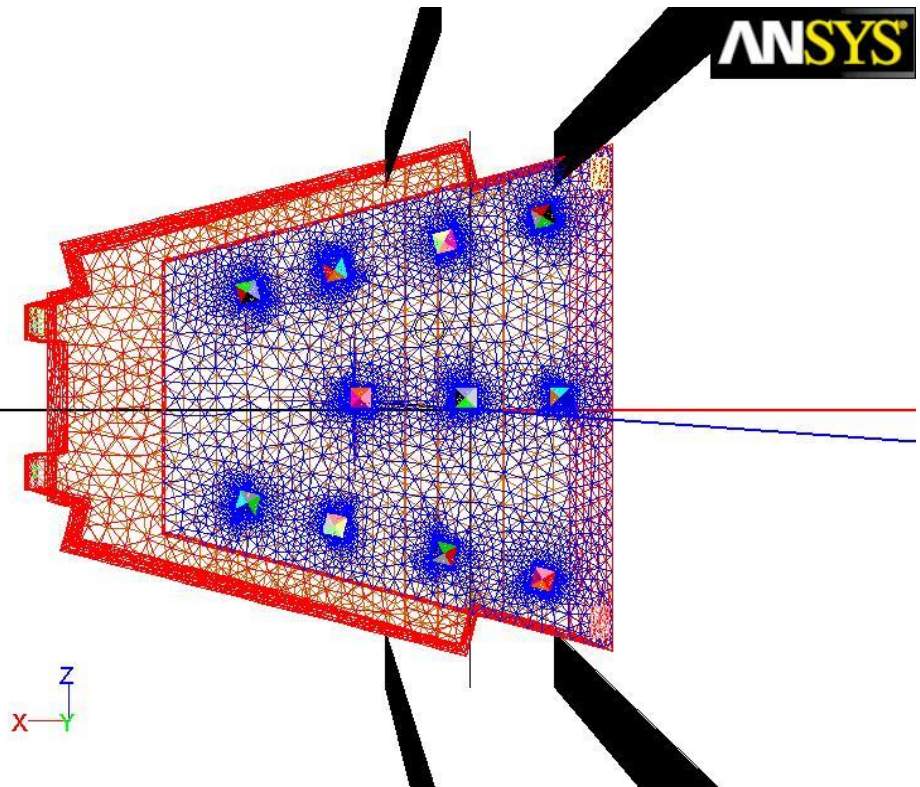
Figura 115 – Vista frontal da linha de cima



Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

Figura 116 – Vista lateral da linha de cima



Mesh

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, lam)

Figura 117 – Vista de topo da linha de cima

ANEXO C – GRÁFICOS

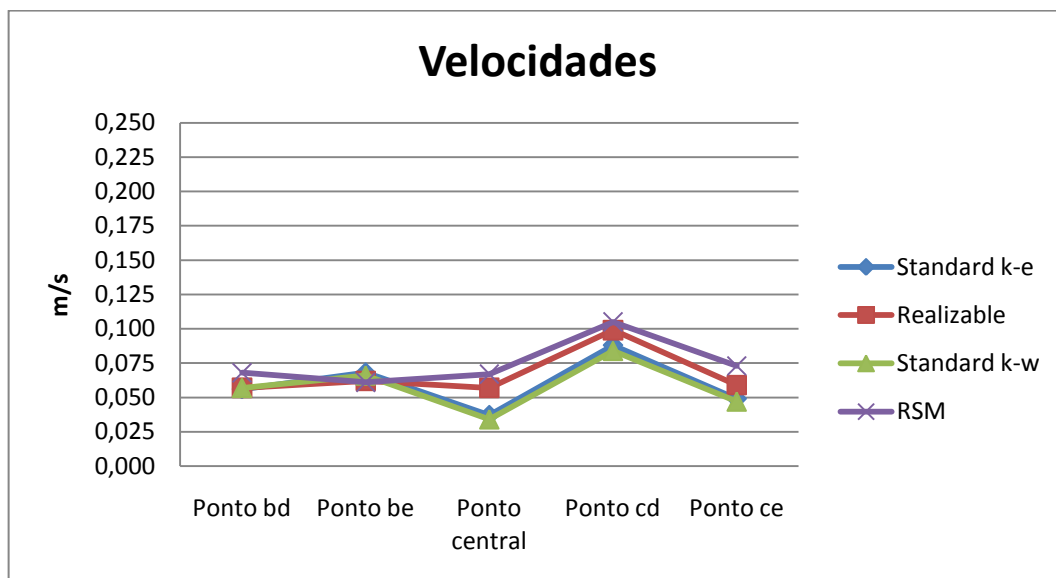


Figura 118 – Velocidades nos pontos de estudo por modelo – Verão (escala 2)

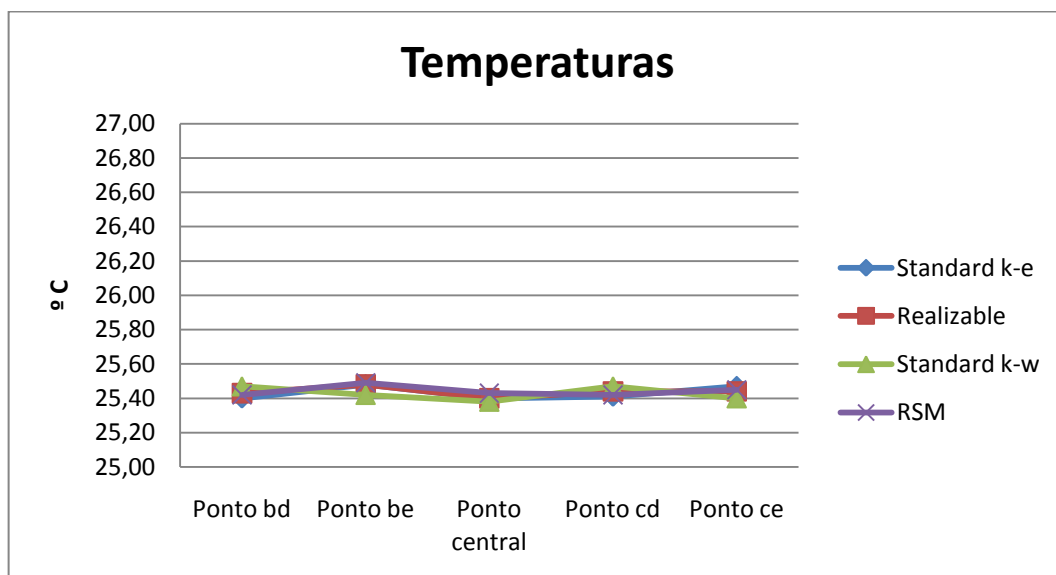


Figura 119 – Temperaturas nos pontos de estudo por modelo – Verão (escala 2)

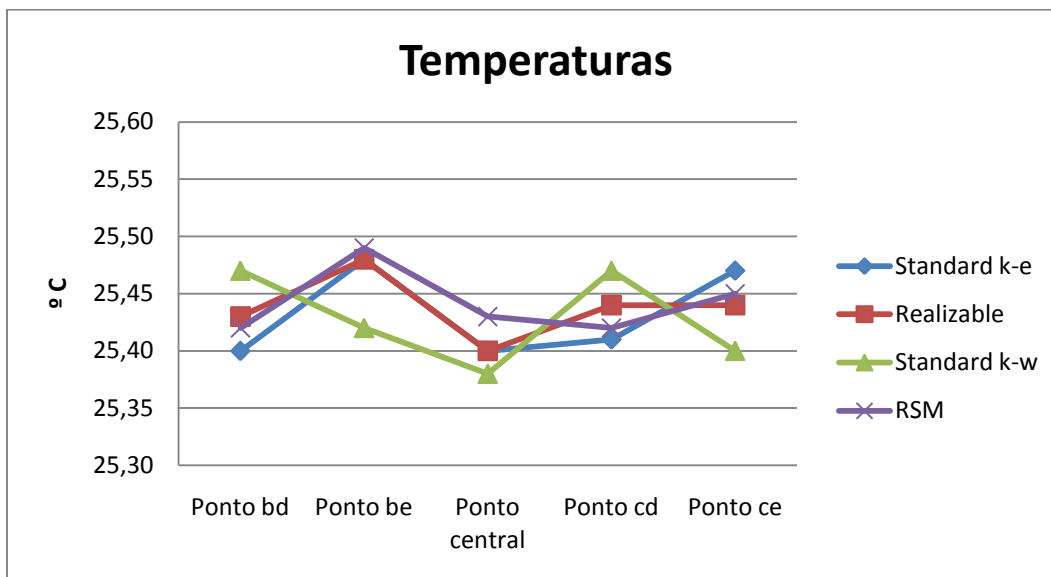


Figura 120 – Temperaturas nos pontos de estudo por modelo – Verão (escala 3)

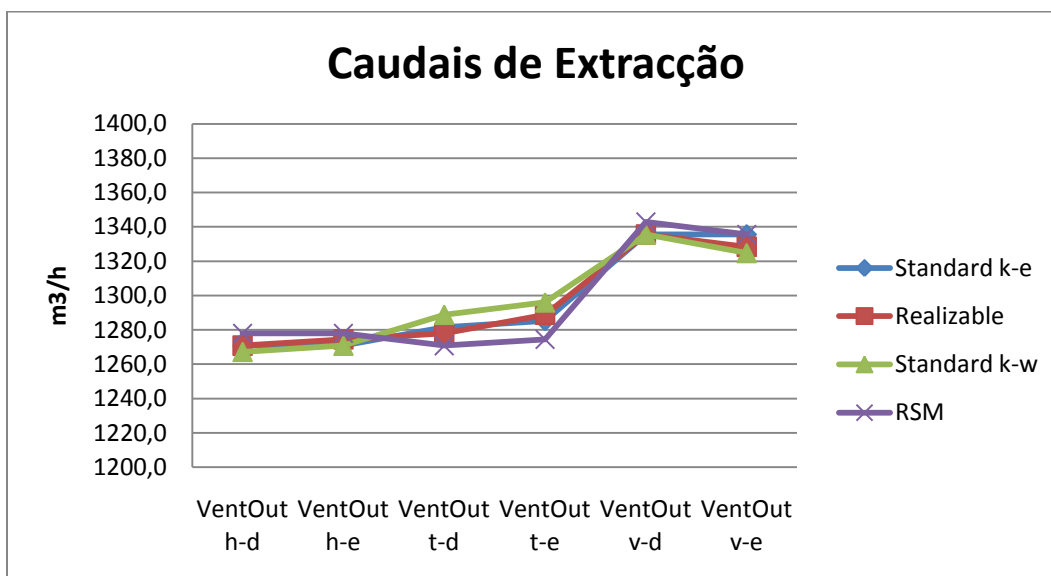


Figura 121 – Caudais de extracção nos VentOuts por modelo – Verão (escala 2)

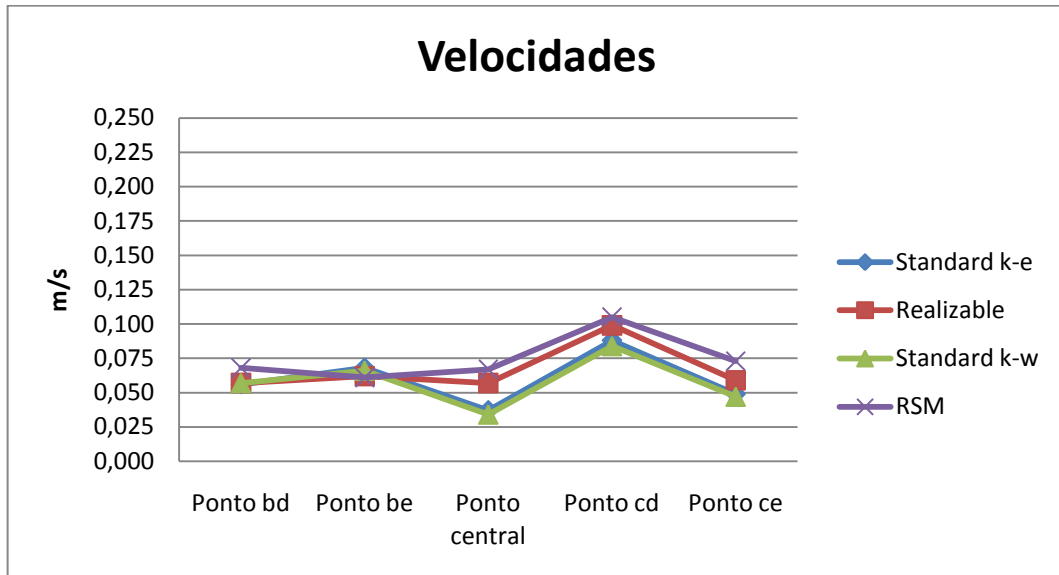


Figura 122 – Velocidades nos pontos de estudo por modelo – Inverno (escala 2)

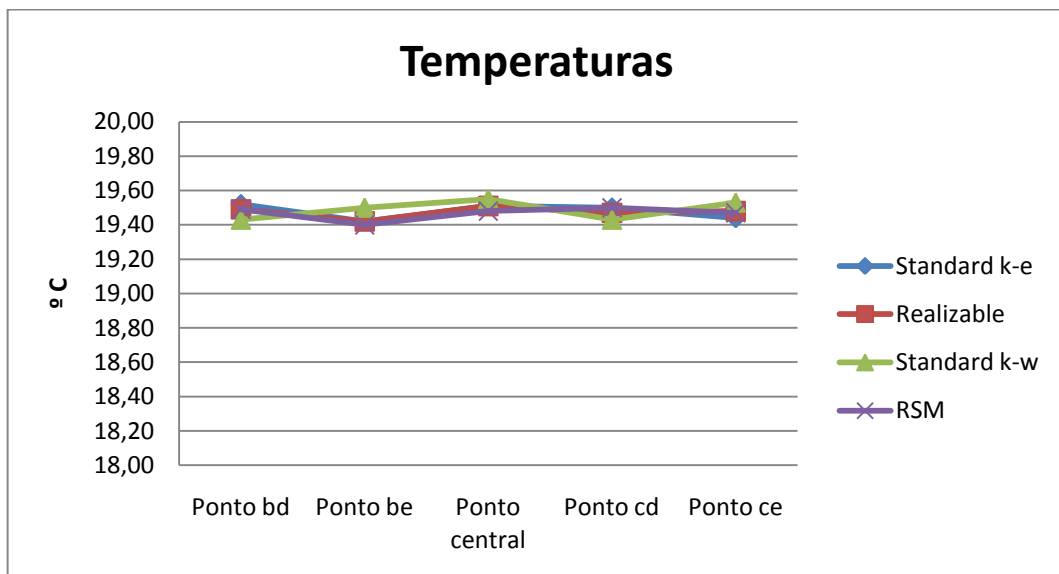


Figura 123 – temperaturas nos pontos de estudo por modelo – Inverno (escala 2)

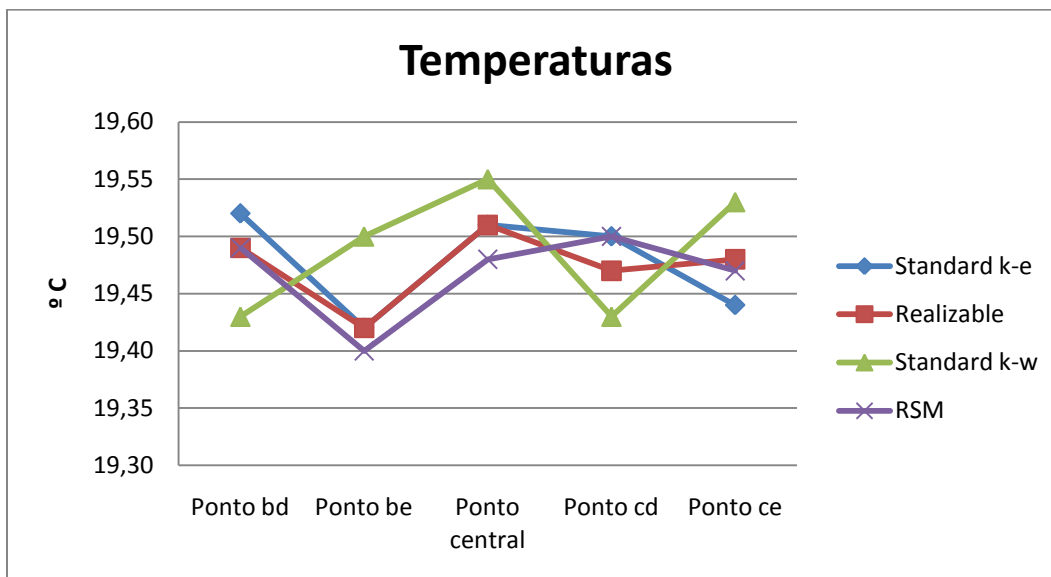


Figura 124 – Temperaturas nos pontos de estudo por modelo – Inverno (escala 3)

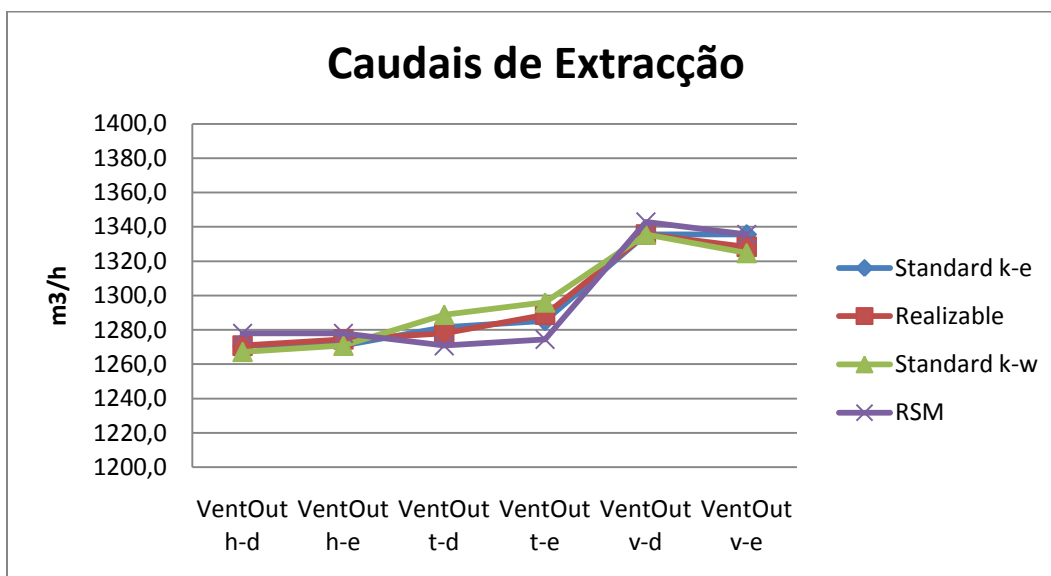
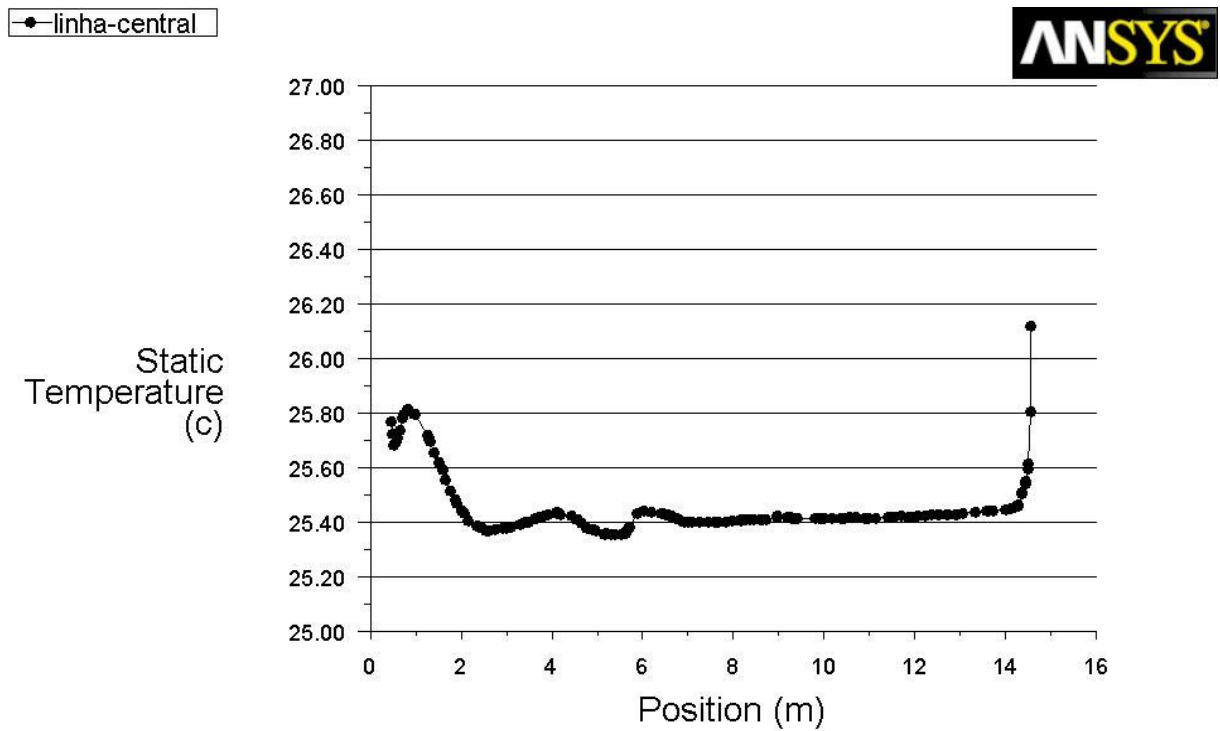


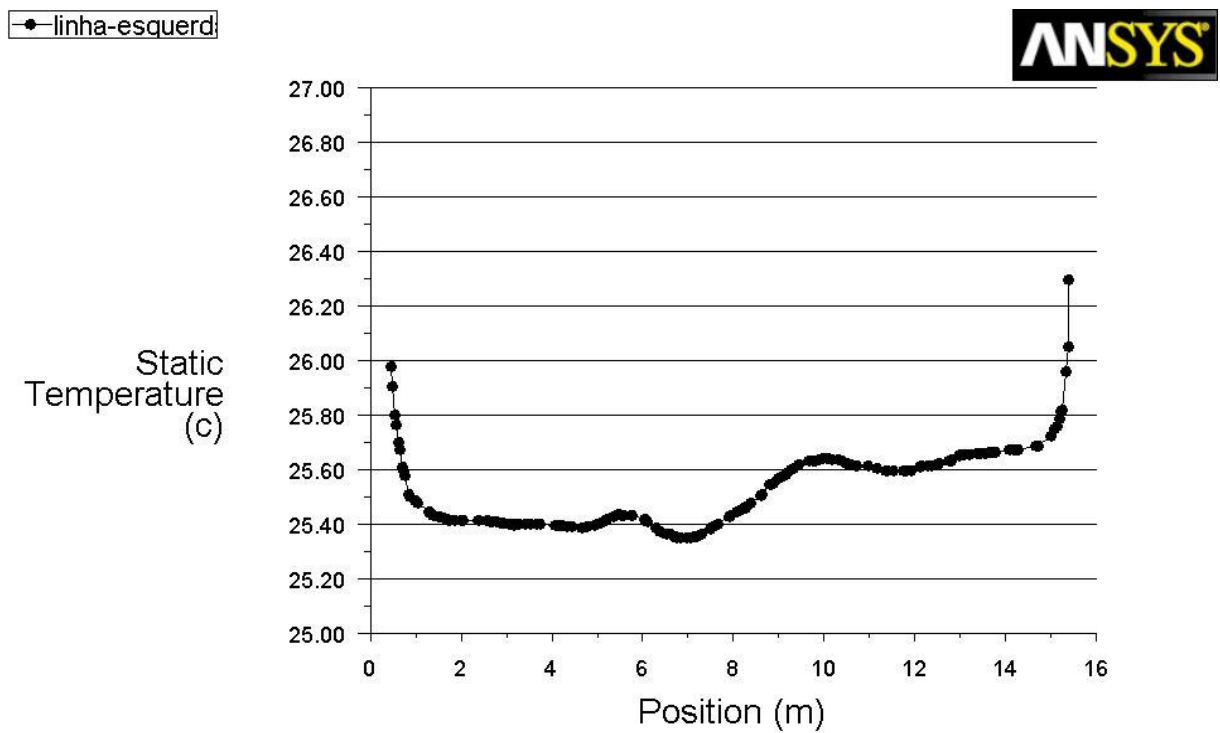
Figura 125 – Caudais de extracção nos VentOuts por modelo – Inverno (escala 2)



Static Temperature

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 126 – Evolução da temperatura ao longo da linha central - Verão



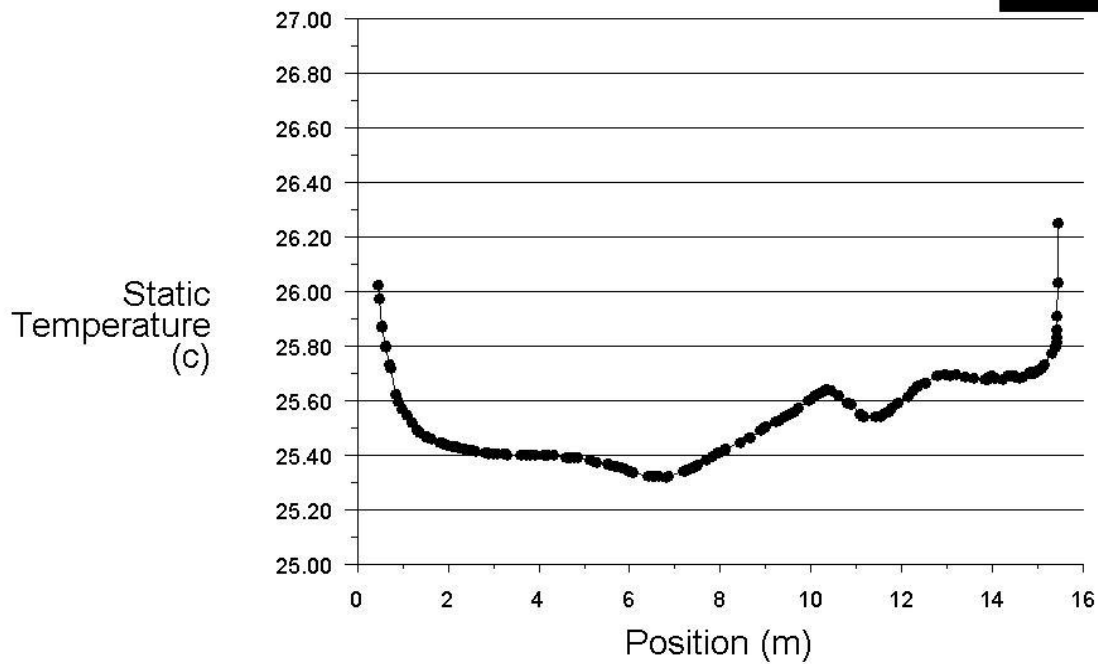
Static Temperature

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 127 – Evolução da temperatura ao longo da linha da esquerda - Verão

● linha-direita

ANSYS



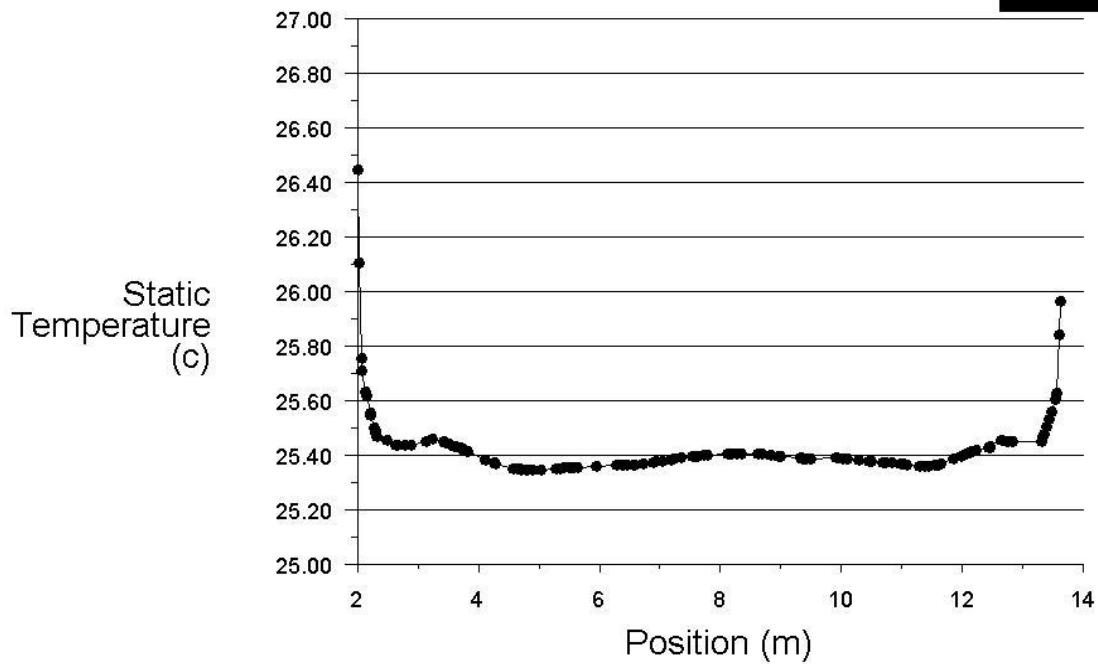
Static Temperature

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 128 – Evolução da temperatura ao longo da linha da direita - Verão

● linha-meio

ANSYS

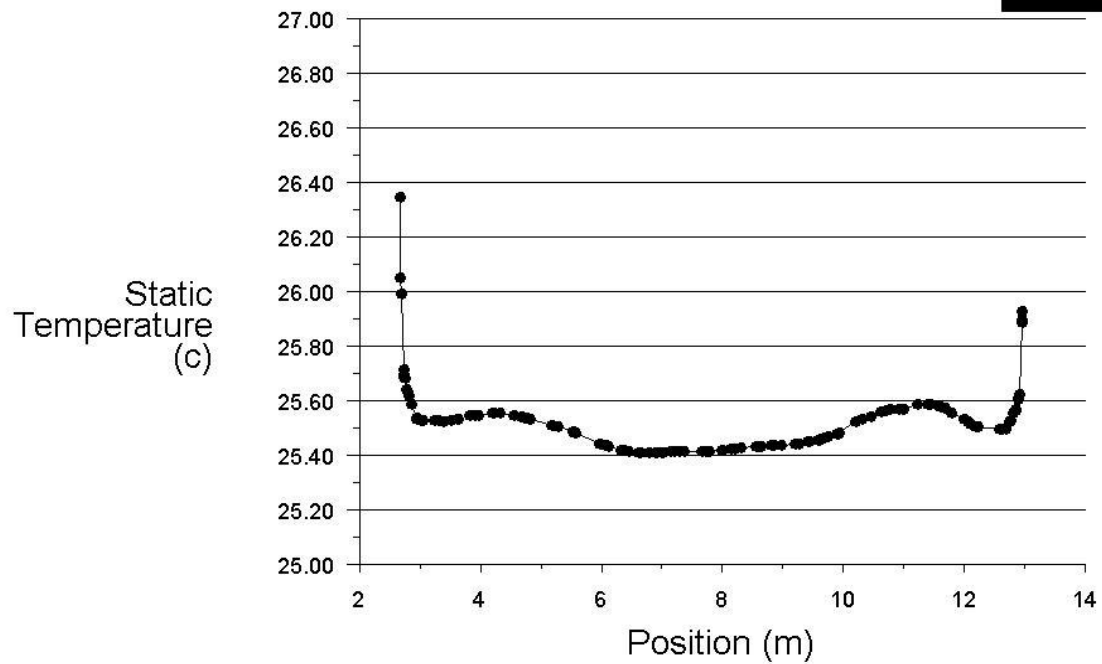


Static Temperature

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 129 – Evolução da temperatura ao longo da linha do meio - Verão

linha-baixo

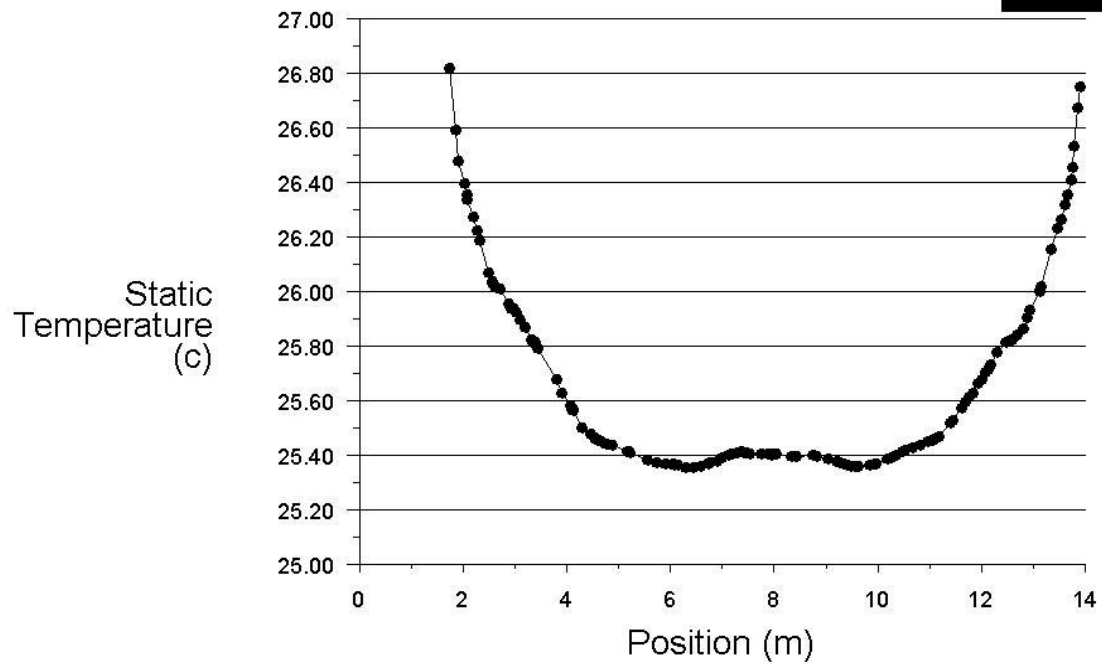


Static Temperature

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 130 – Evolução da temperatura ao longo da linha de baixo - Verão

linha-cima



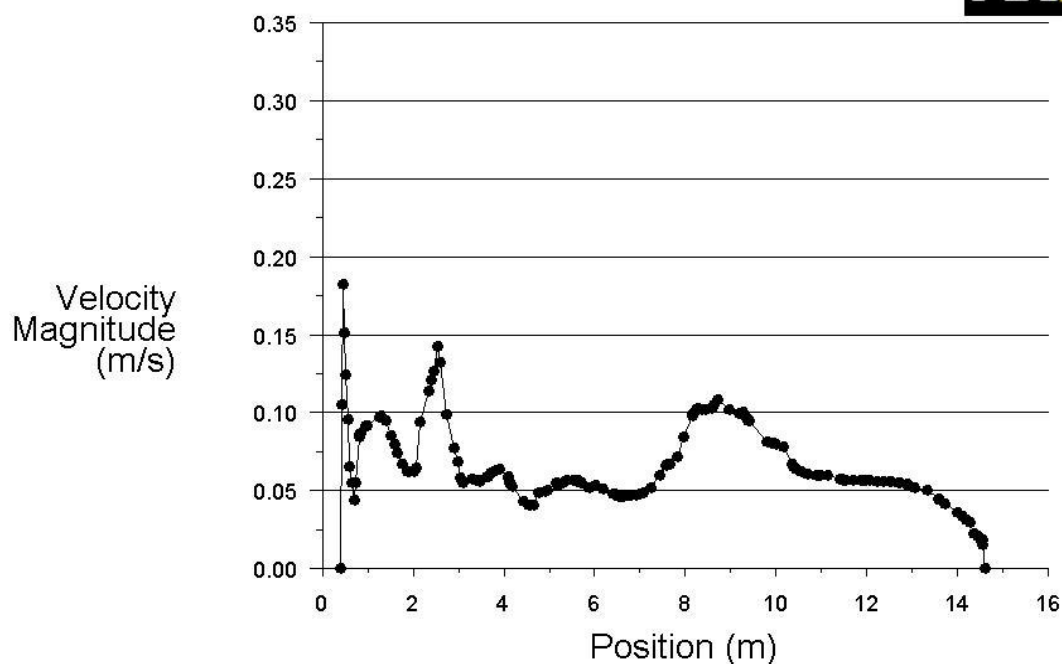
Static Temperature

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 131 – Evolução da temperatura ao longo da linha de cima - Verão

—•— linha-central

ANSYS



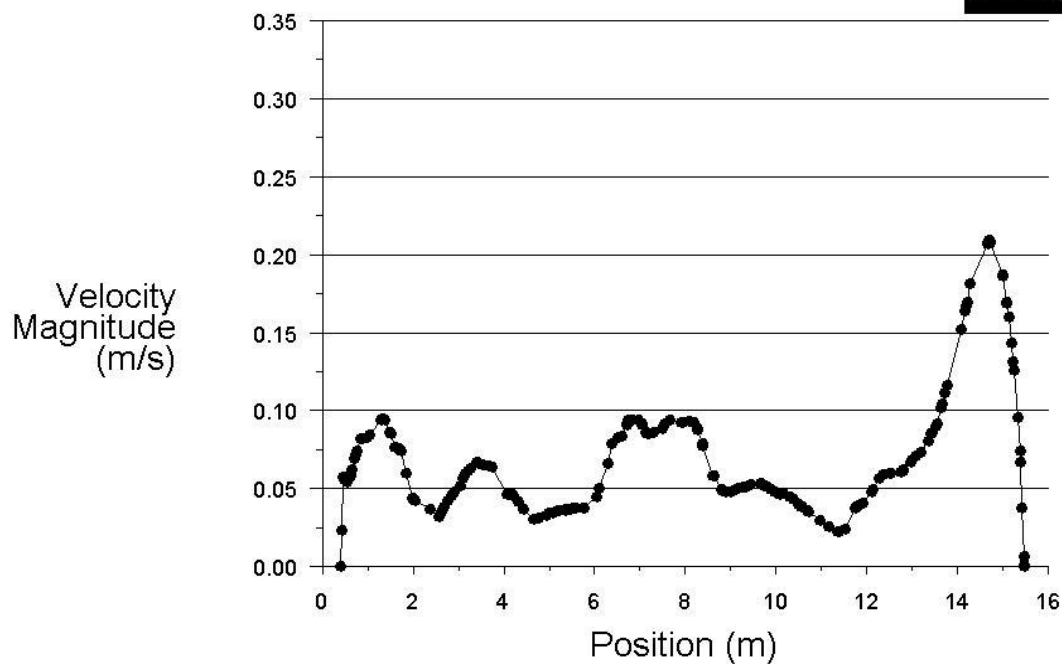
Velocity Magnitude

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 132 – Evolução da velocidade ao longo da linha central - Verão

—•— linha-esquerda

ANSYS

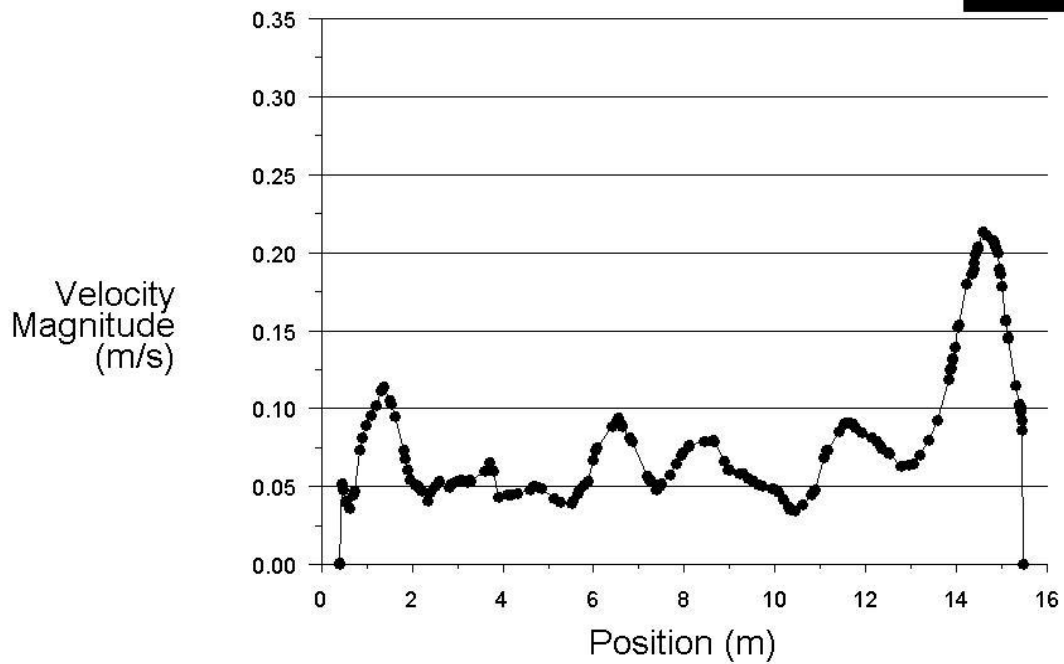


Velocity Magnitude

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 133 – Evolução da velocidade ao longo da linha da esquerda - Verão

linha-direita

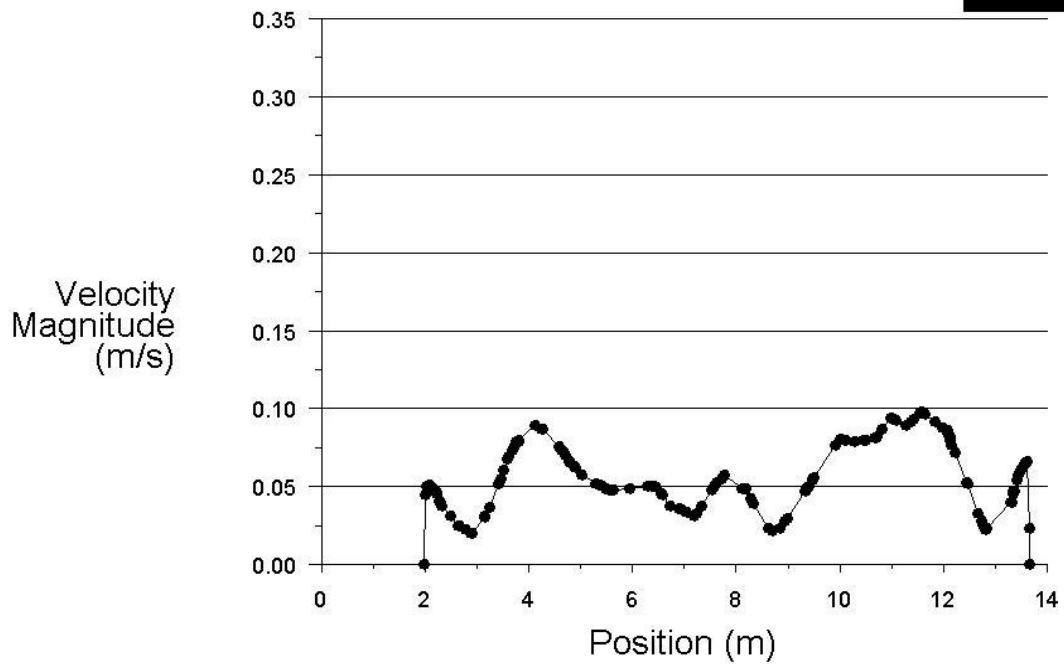


Velocity Magnitude

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 134 – Evolução da velocidade ao longo da linha da direita - Verão

linha-meio



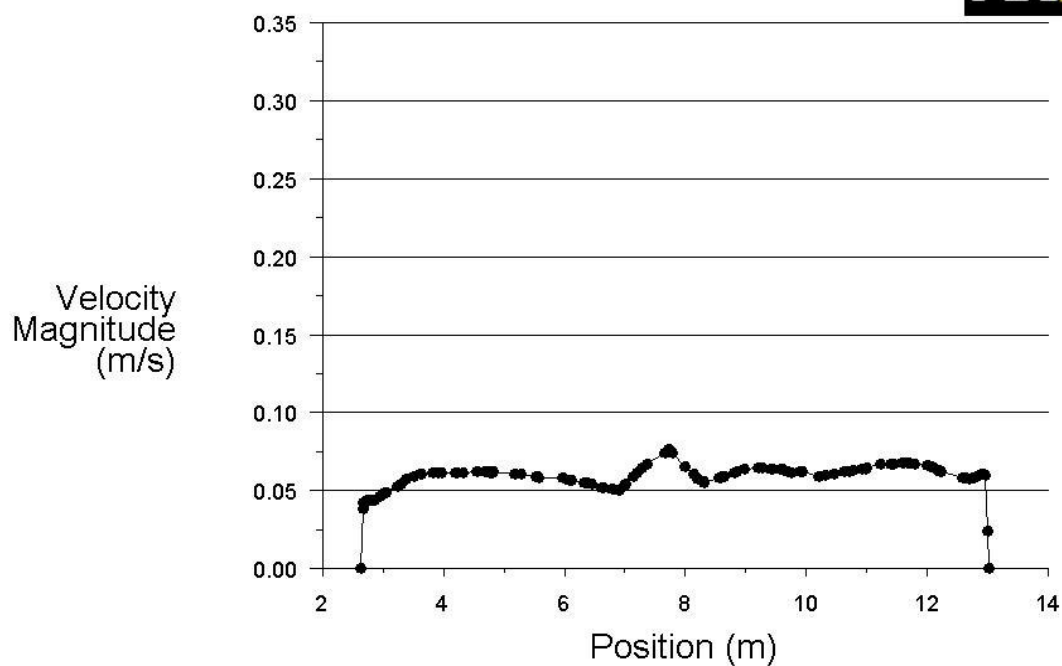
Velocity Magnitude

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 135 – Evolução da velocidade ao longo da linha do meio - Verão

linha-baixo

ANSYS



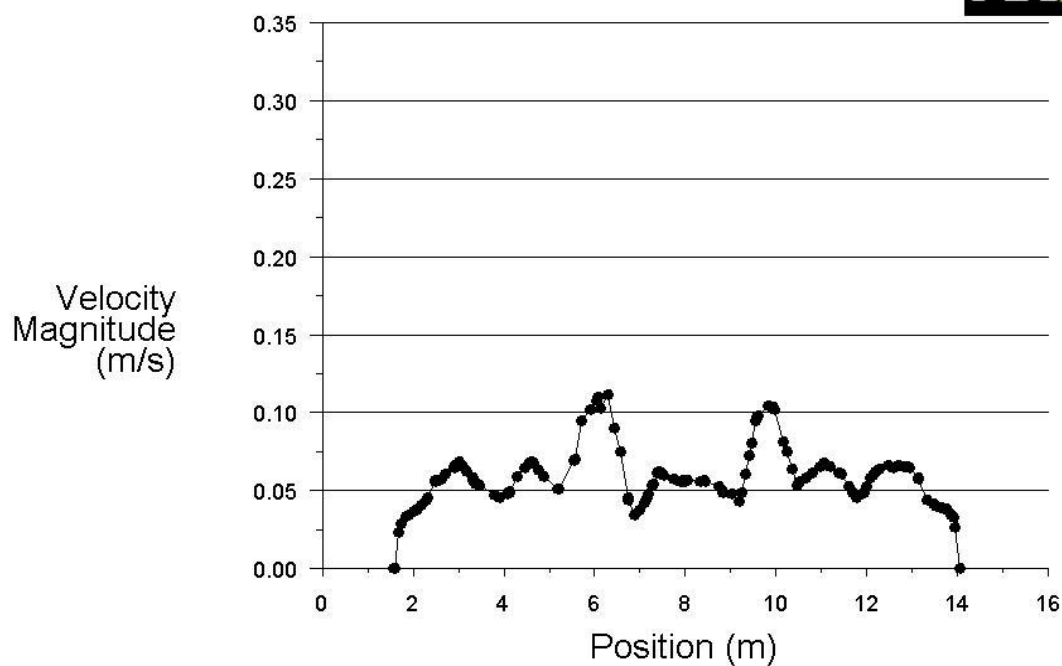
Velocity Magnitude

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 136 – Evolução da velocidade ao longo da linha de baixo - Verão

linha-cima

ANSYS



Velocity Magnitude

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 137 – Evolução da velocidade ao longo da linha de cima - Verão

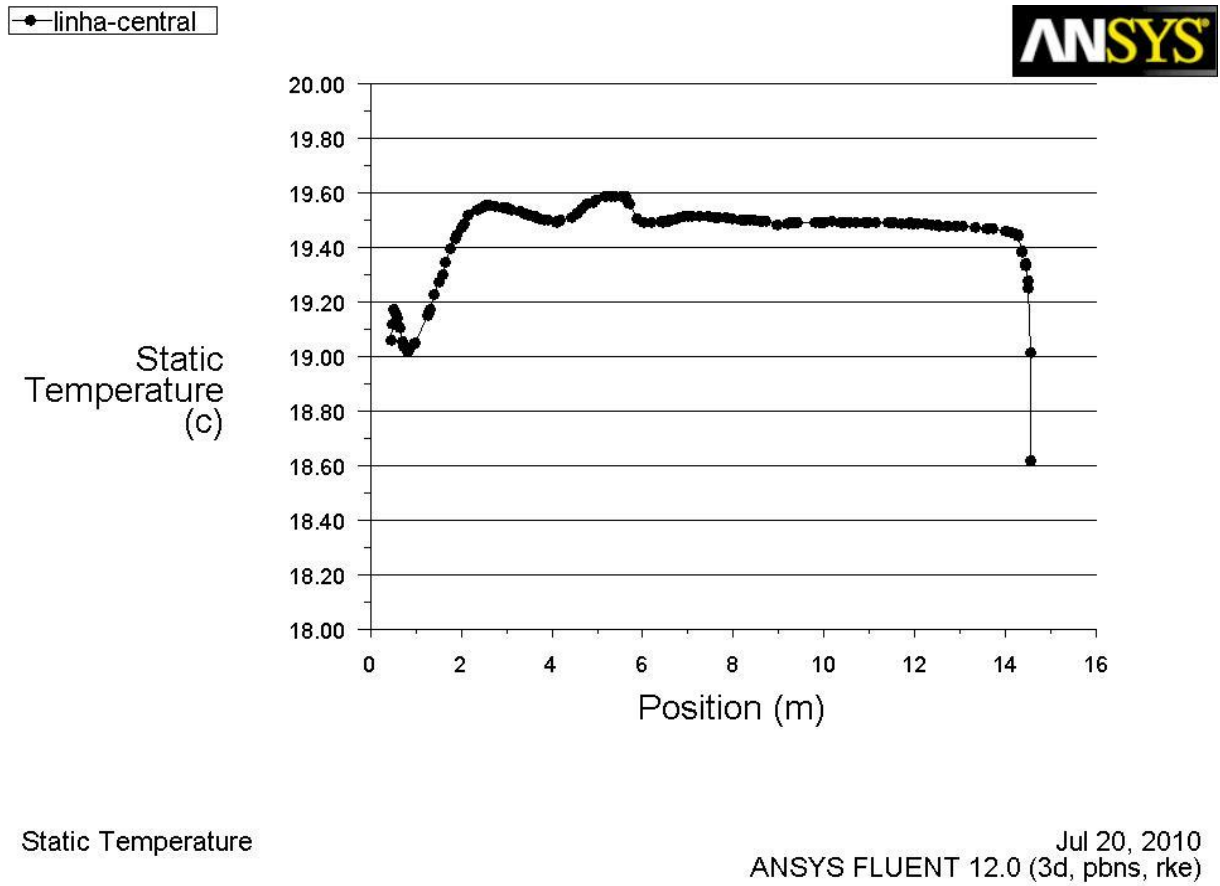


Figura 138 – Evolução da temperatura ao longo da linha central - Inverno

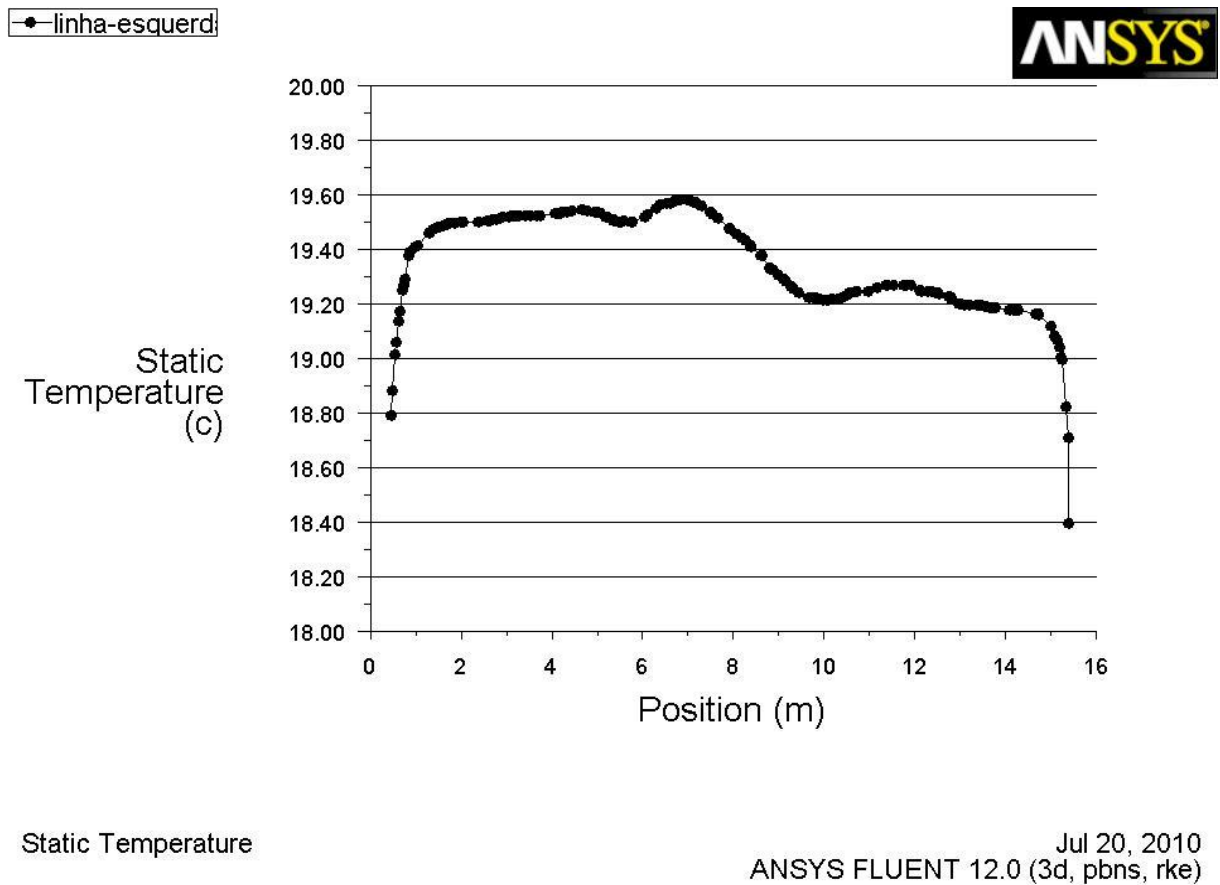
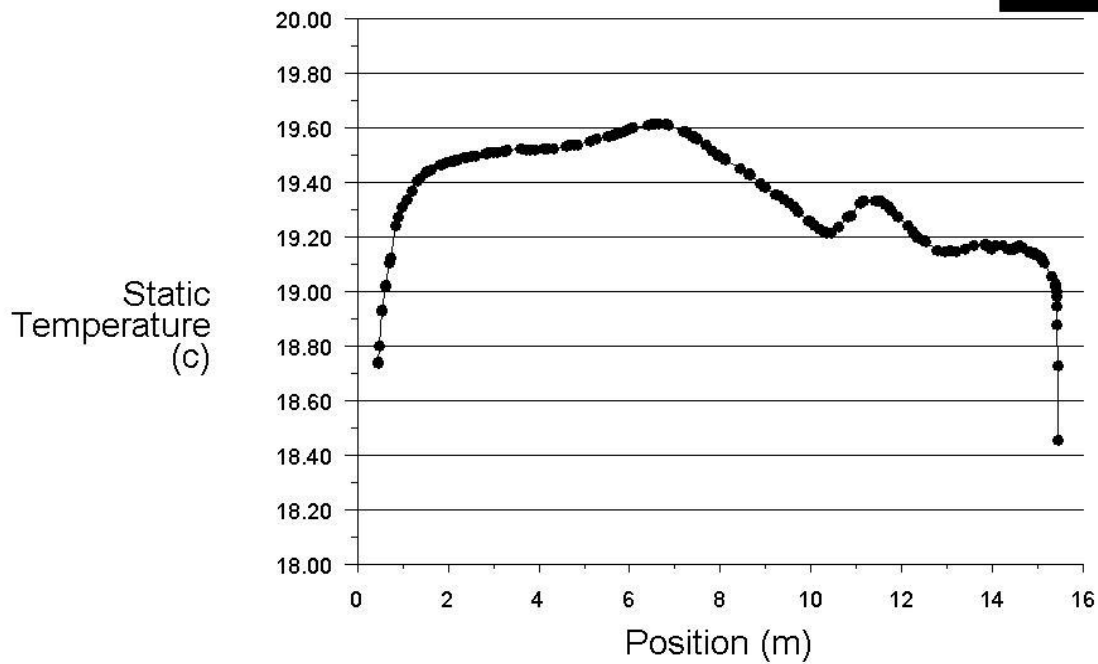


Figura 139 – Evolução da temperatura ao longo da linha da esquerda - Inverno

● linha-direita

ANSYS



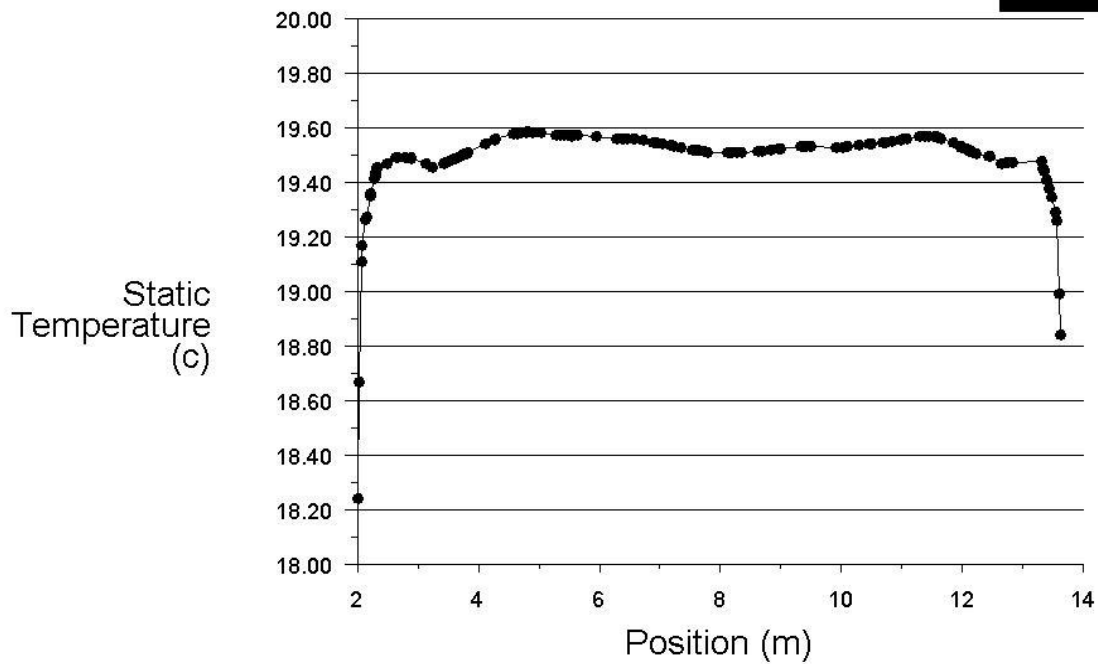
Static Temperature

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 140 – Evolução da temperatura ao longo da linha direita - Inverno

● linha-meio

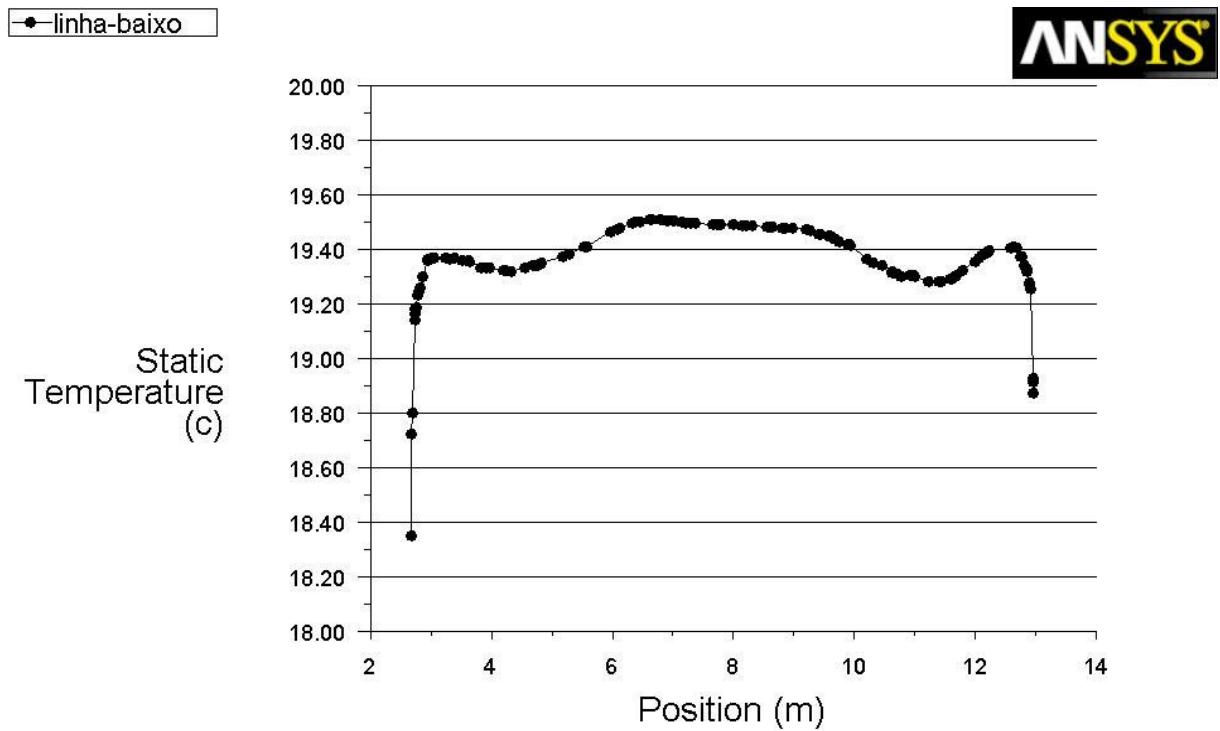
ANSYS



Static Temperature

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

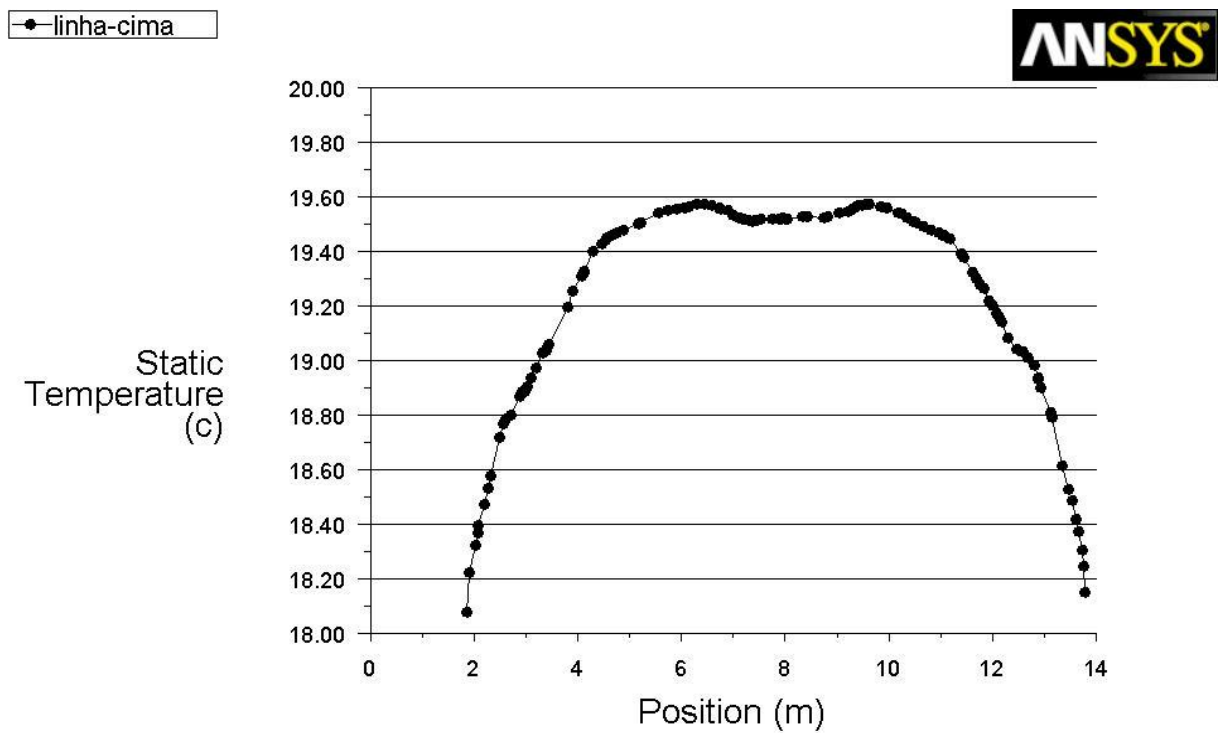
Figura 141 – Evolução da temperatura ao longo da linha do meio - Inverno



Static Temperature

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 142 – Evolução da temperatura ao longo da linha de baixo - Inverno

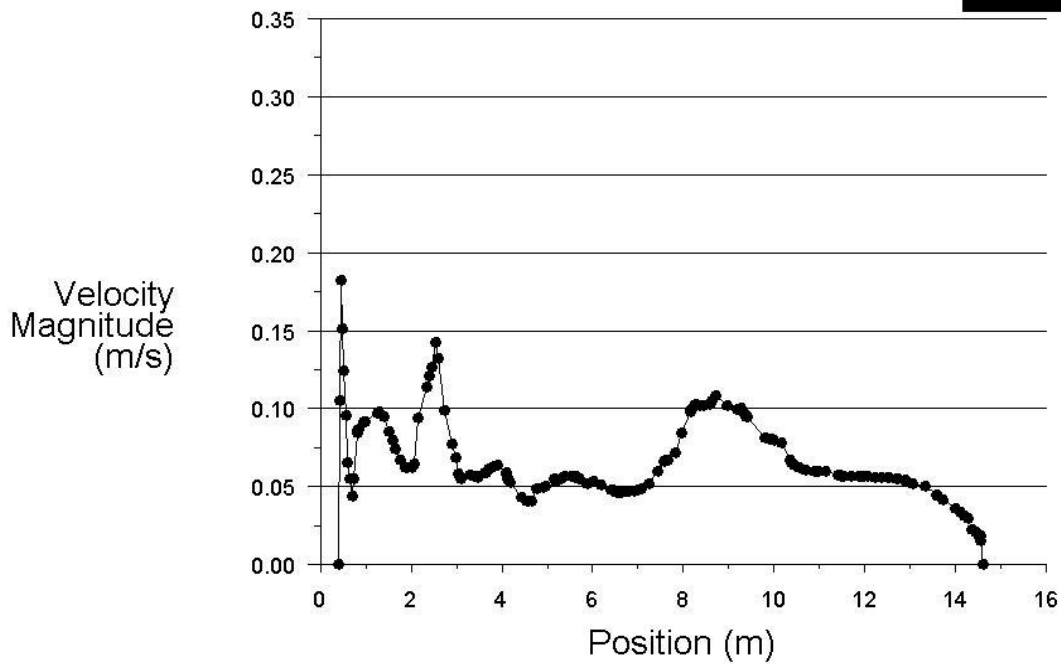


Static Temperature

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 143 – Evolução da temperatura ao longo da linha de cima - Inverno

●-linha-central

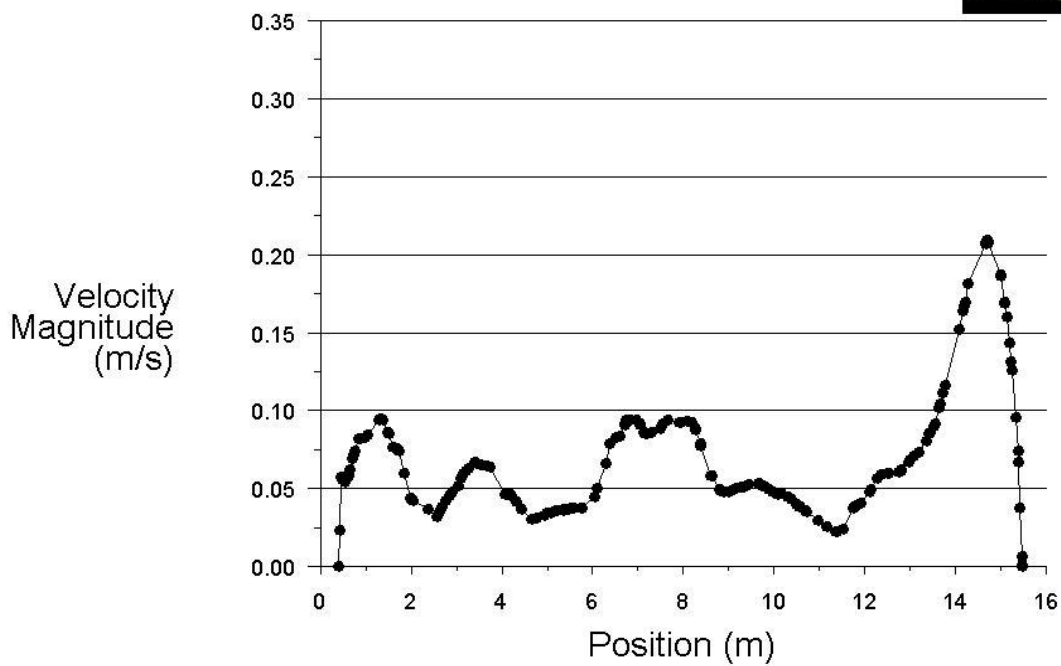


Velocity Magnitude

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 144 – Evolução da velocidade ao longo da linha central - Inverno

●-linha-esquerda

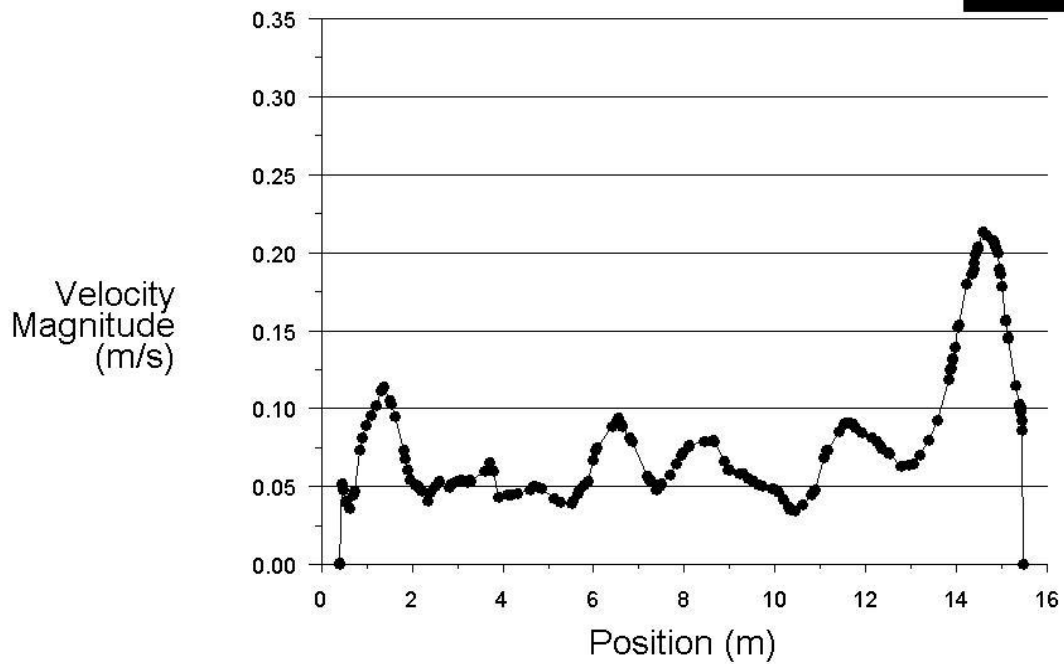


Velocity Magnitude

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 145 – Evolução da velocidade ao longo da linha da esquerda - Inverno

linha-direita

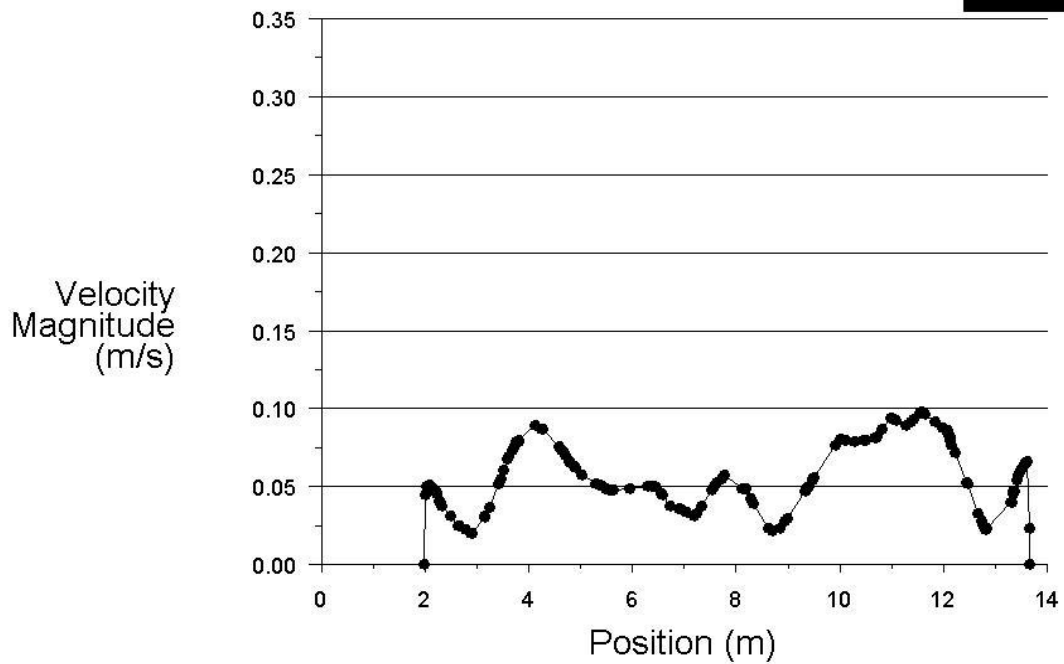


Velocity Magnitude

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 146 – Evolução da velocidade ao longo da linha da direita - Inverno

linha-meio



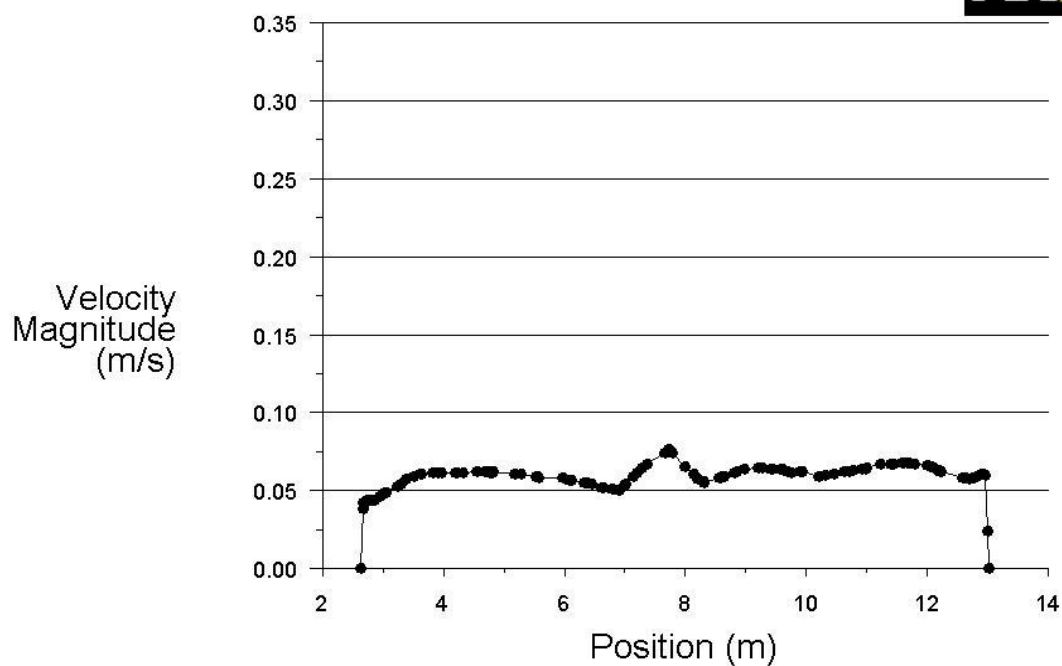
Velocity Magnitude

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 147 – Evolução da velocidade ao longo da linha do meio - Inverno

linha-baixo

ANSYS



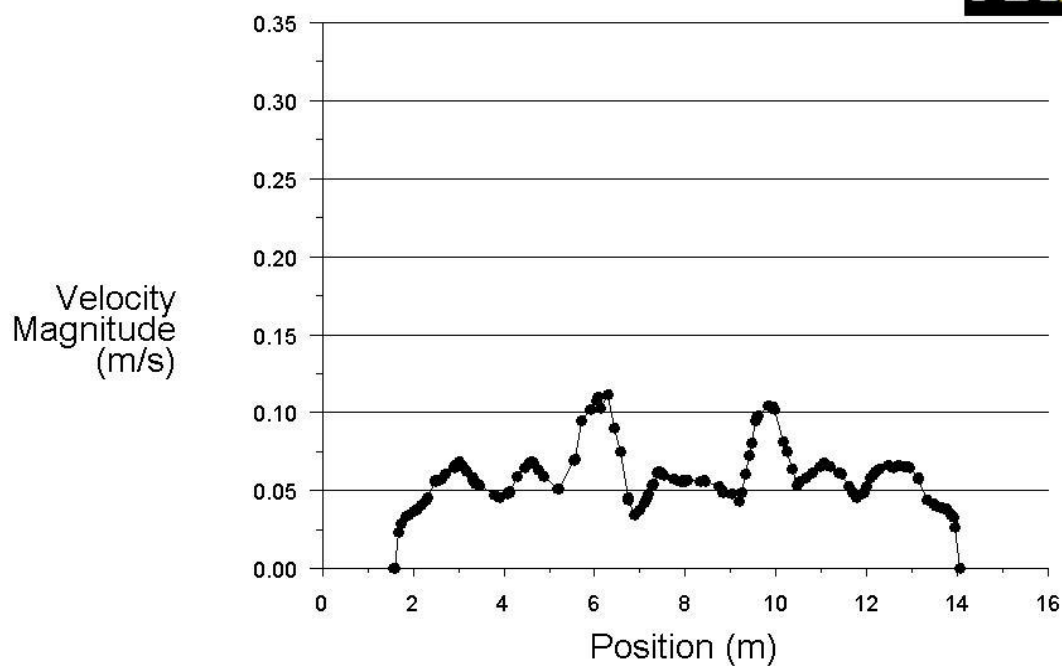
Velocity Magnitude

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 148 – Evolução da velocidade ao longo da linha de baixo - Inverno

linha-cima

ANSYS

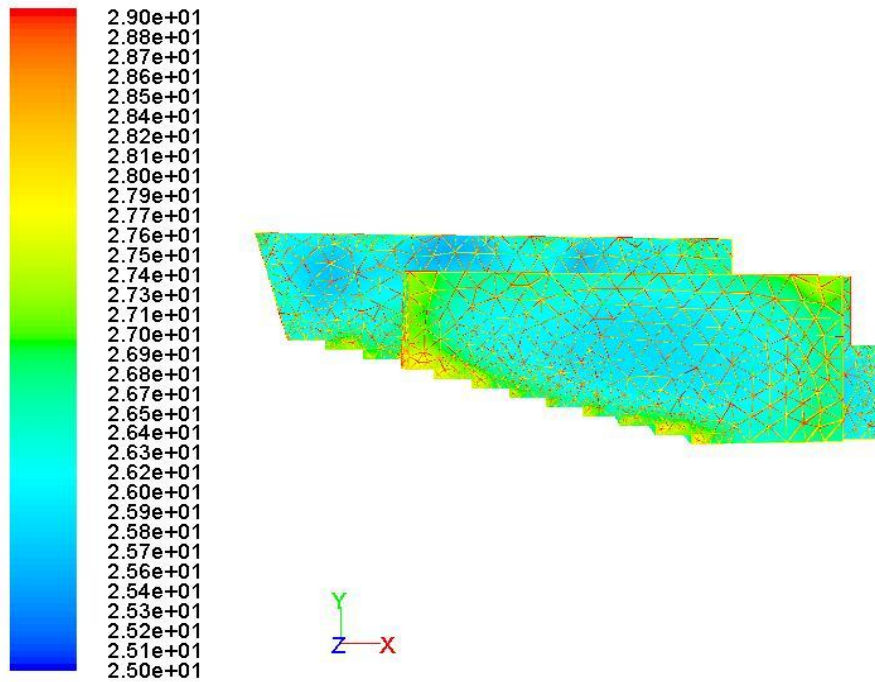


Velocity Magnitude

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 149 – Evolução da velocidade ao longo da linha de cima - Inverno

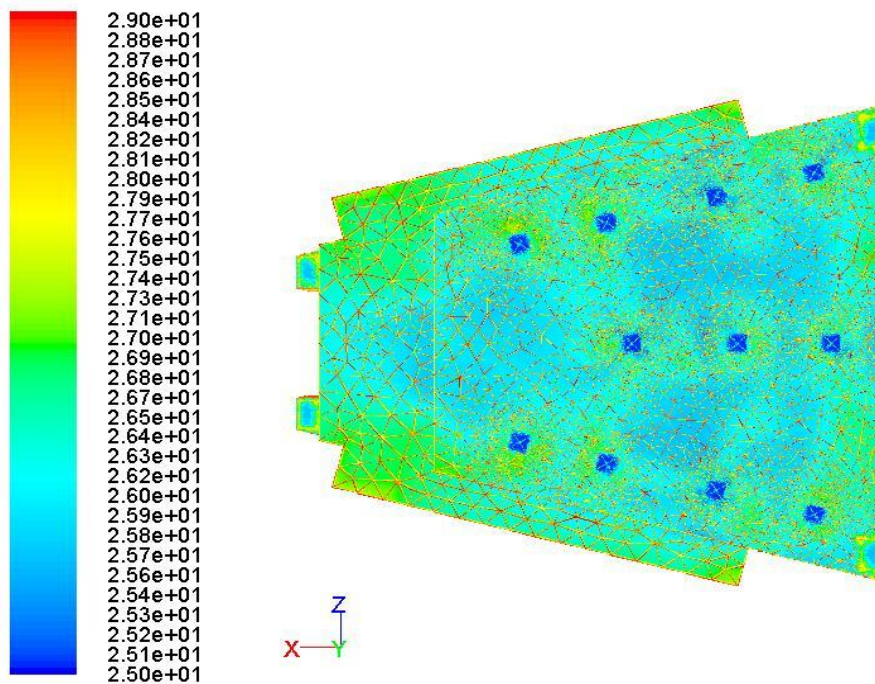
ANEXO D – IMAGENS



Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

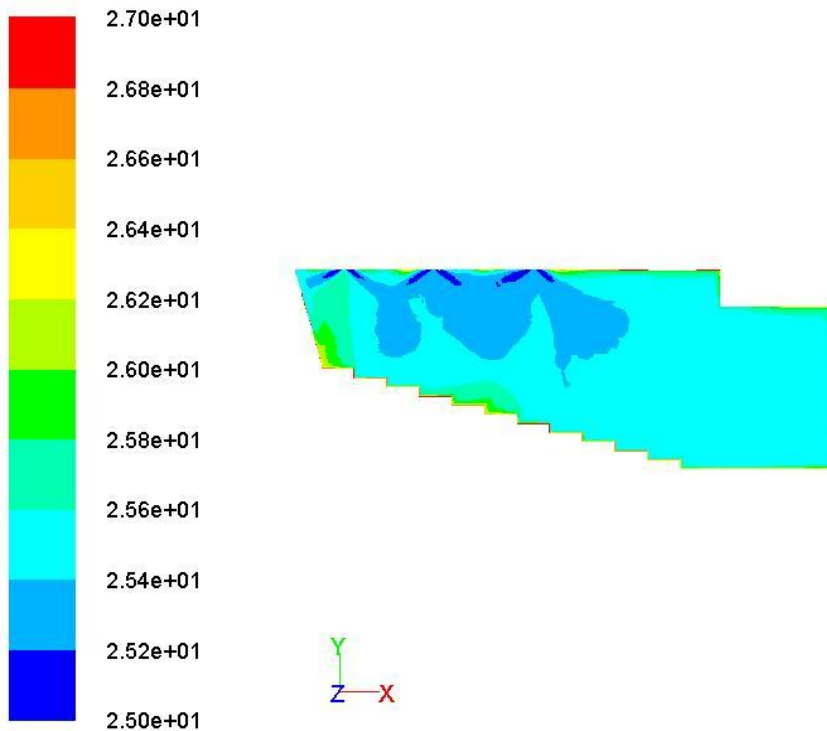
Figura 150 – Vista frontal dos contornos de temperatura - Verão



Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

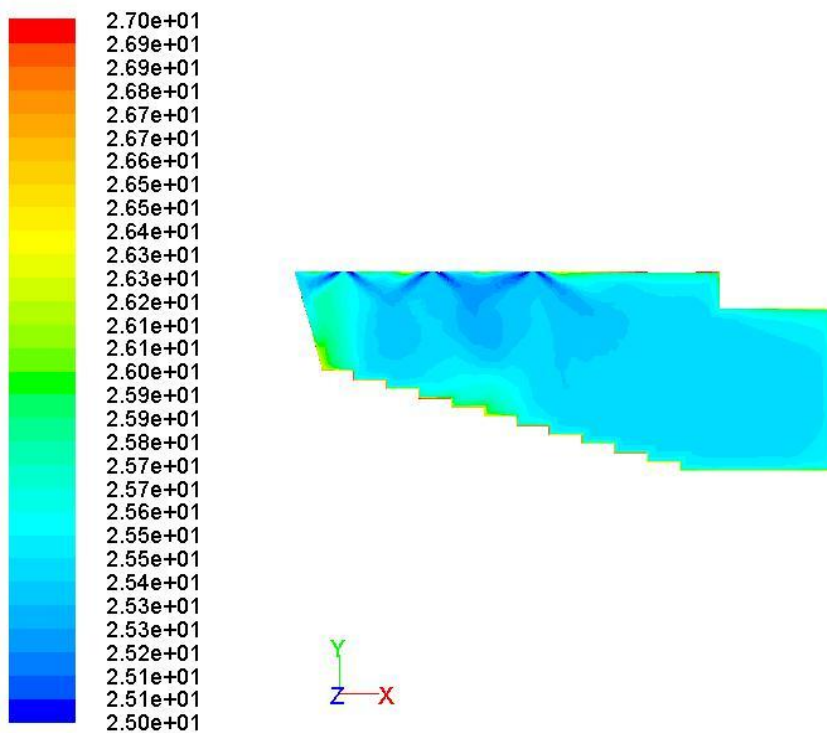
Figura 151 – Vista de topo dos contornos de temperatura - Verão



Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

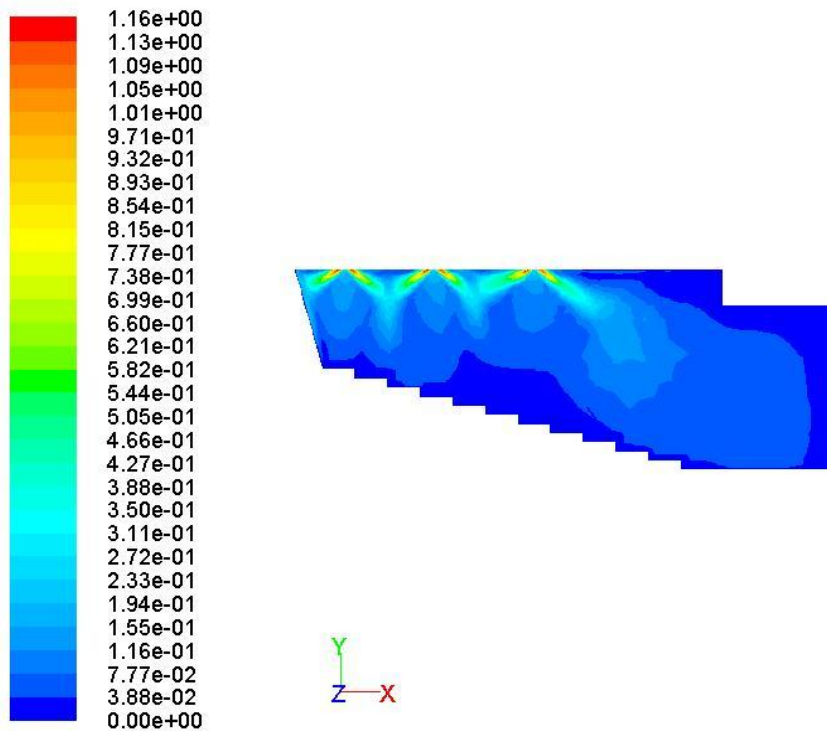
Figura 152 – Contornos de temperatura no plano de simetria – Verão (versão 2)



Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

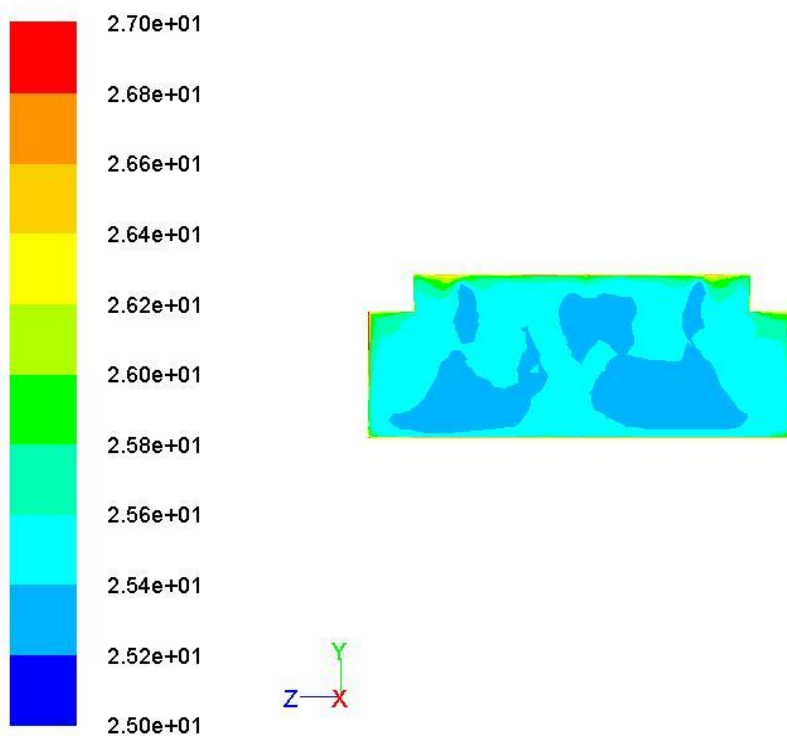
Figura 153 – Contornos de temperatura no plano de simetria – Verão (versão 3)



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

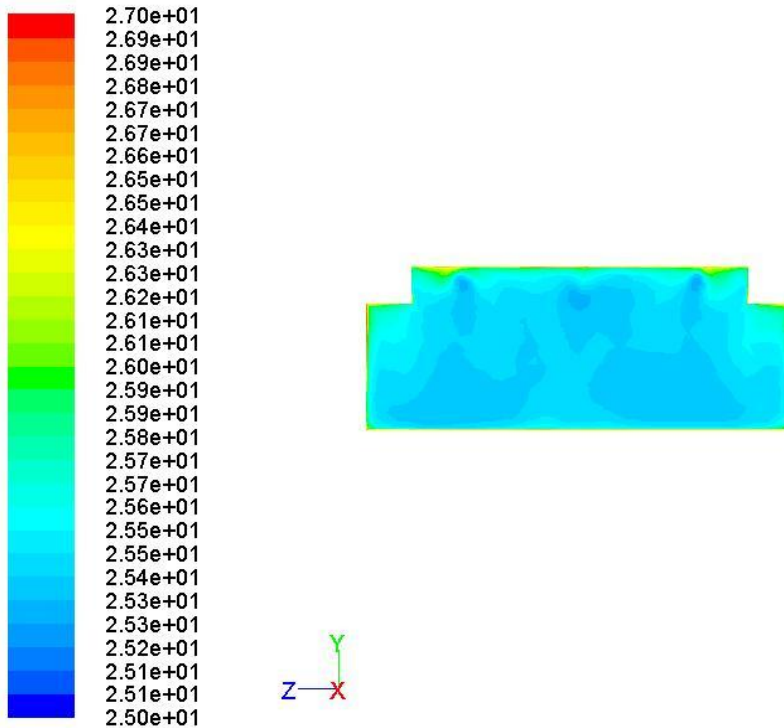
Figura 154 – Contornos de velocidade no plano de simetria – Verão (versão 2)



Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

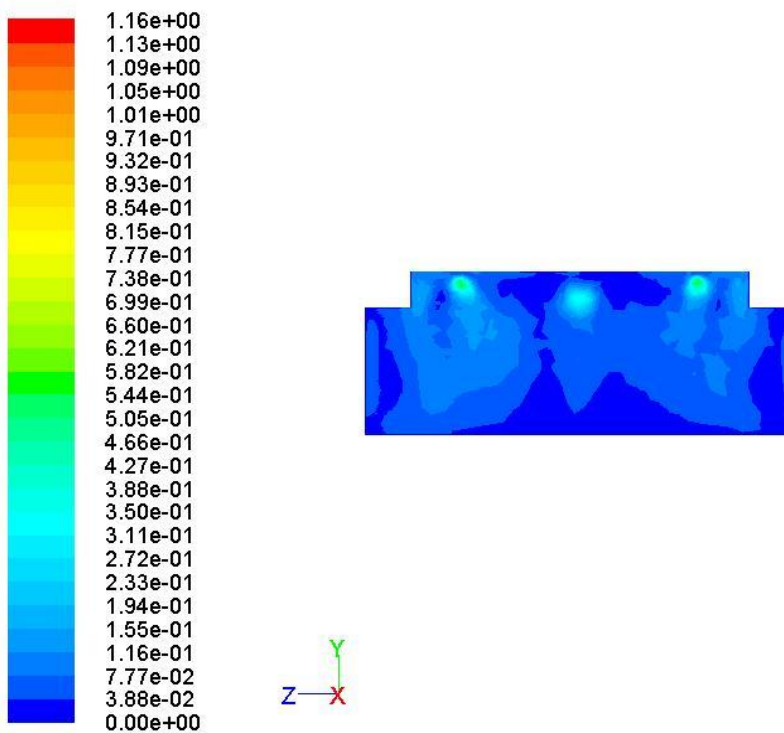
Figura 155 – Contornos de temperatura no plano do meio – Verão (versão 2)



Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

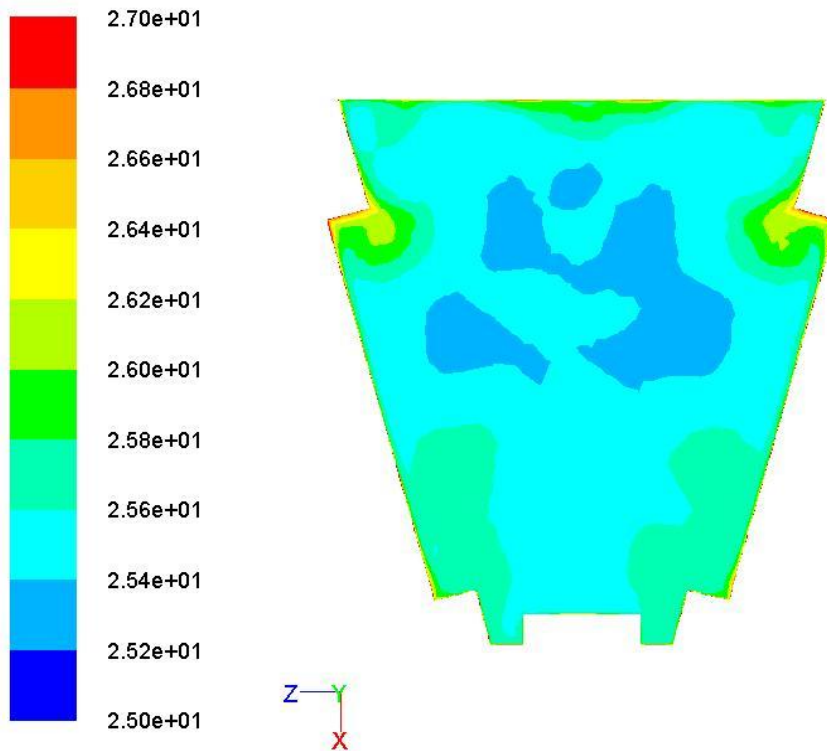
Figura 156 – Contornos de temperatura no plano do meio (versão 3)



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

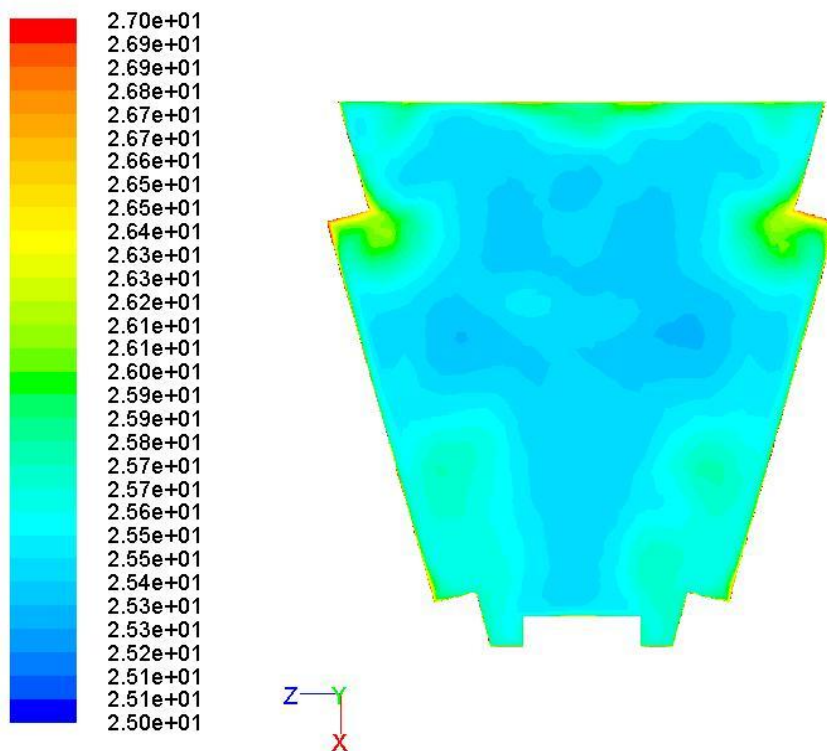
Figura 157 – Contornos de velocidade no plano do meio - Verão (versão 2)



Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

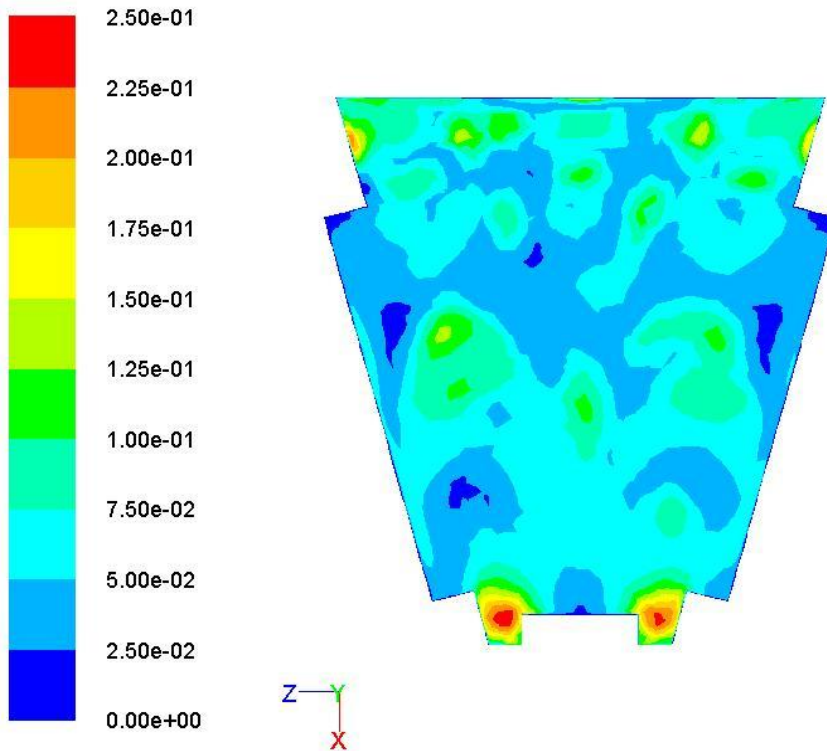
Figura 158 – Contornos de temperatura no plano útil – Verão (versão 2)



Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

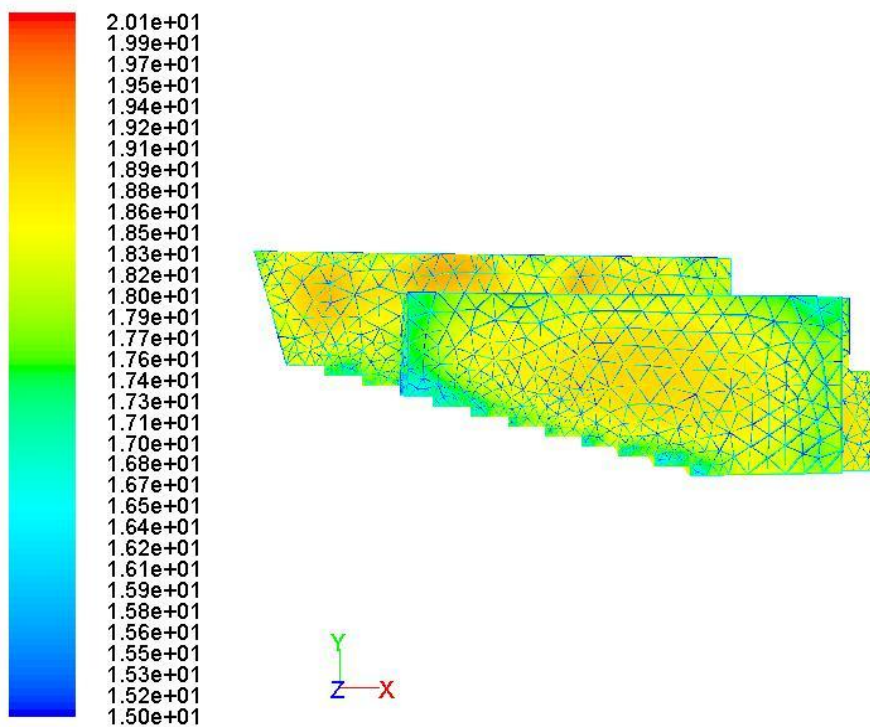
Figura 159 – Contornos de temperatura no plano útil – Verão (versão 3)



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

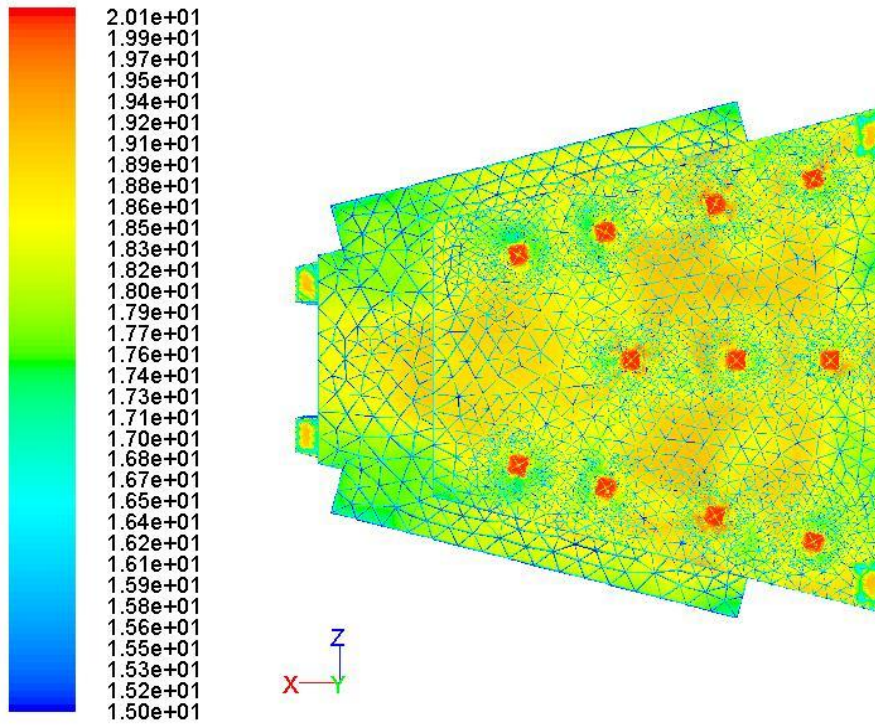
Figura 160 – Contornos de velocidade no plano útil – Verão (versão 2)



Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

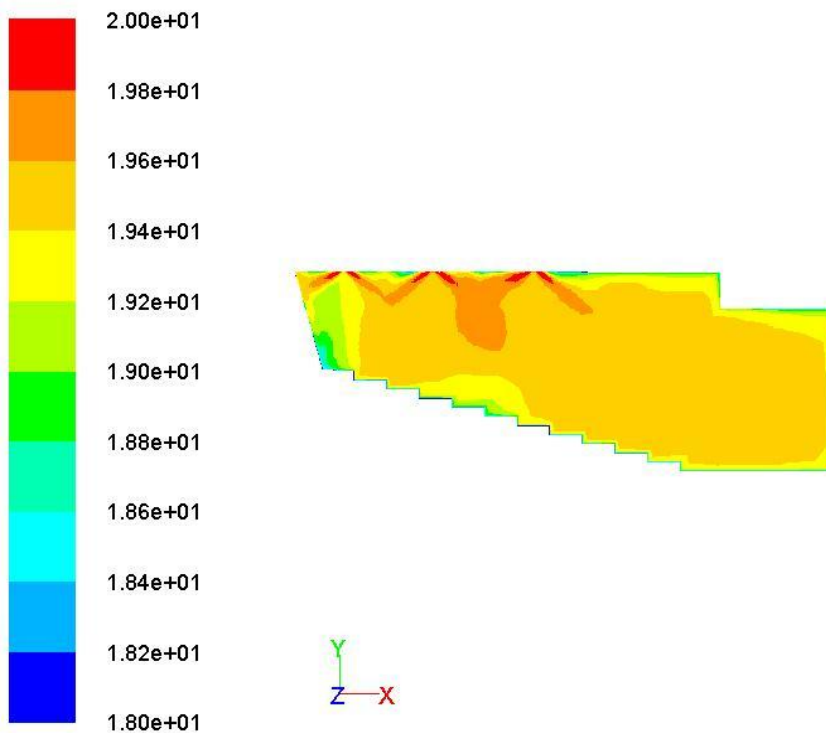
Figura 161 – Vista frontal dos contornos de temperatura - inverno



Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

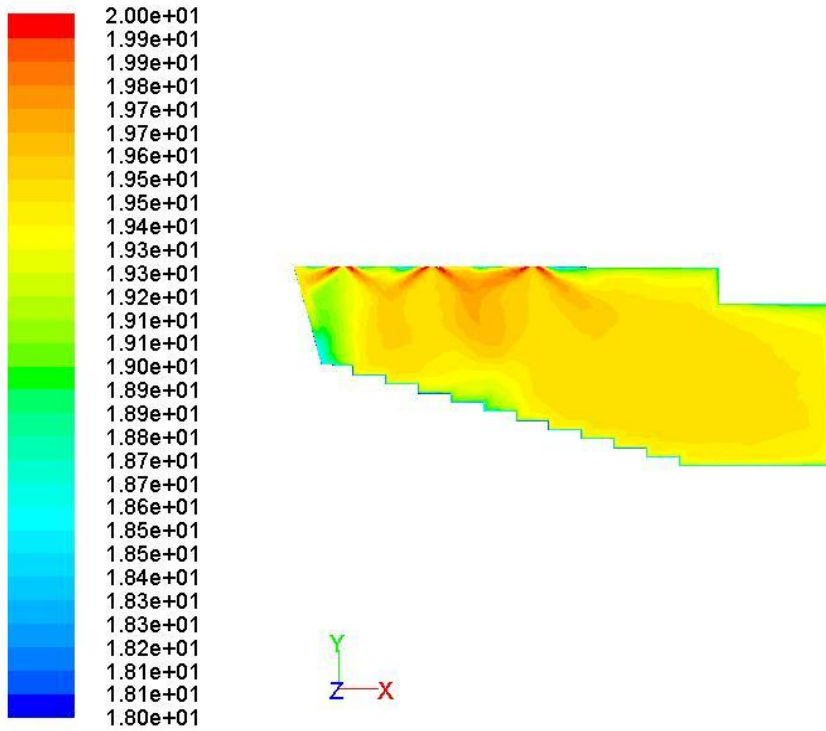
Figura 162 – Vista de topo dos contornos de temperatura - Inverno



Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

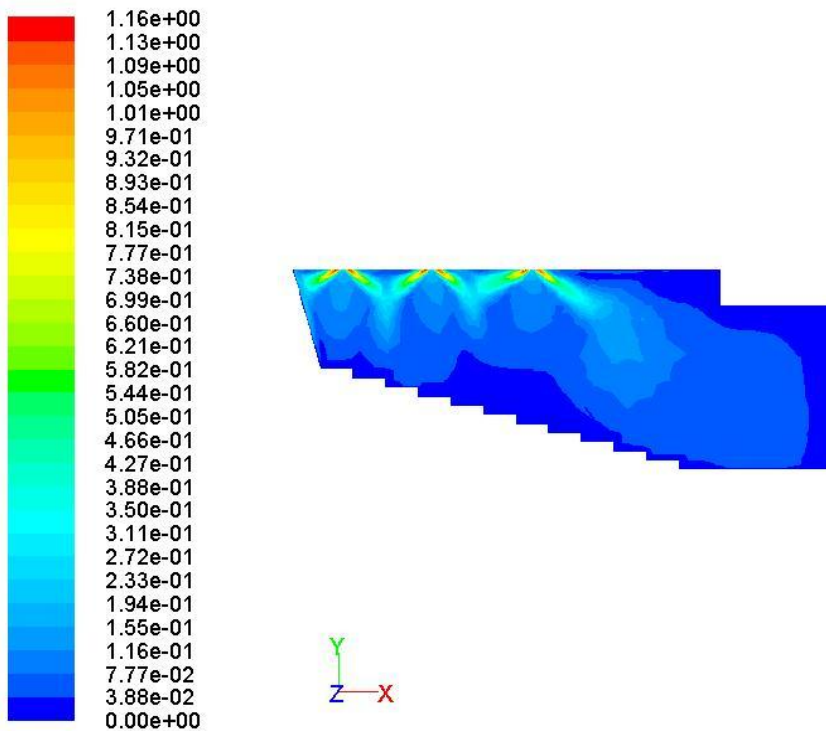
Figura 163 – Contornos de temperatura no plano de simetria – Inverno (versão 2)



Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

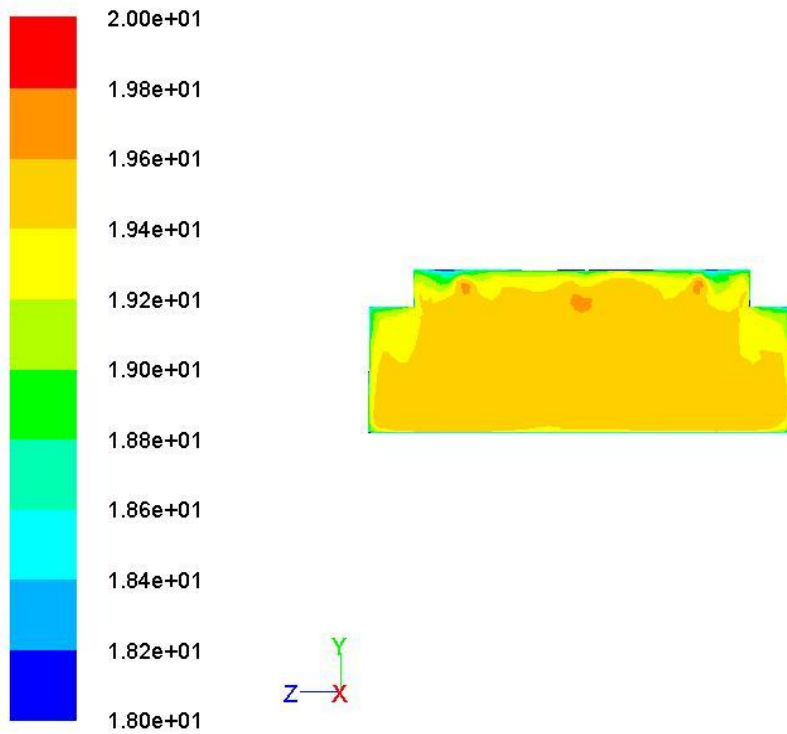
Figura 164 – Contornos de temperatura no plano de simetria – Inverno (versão 3)



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

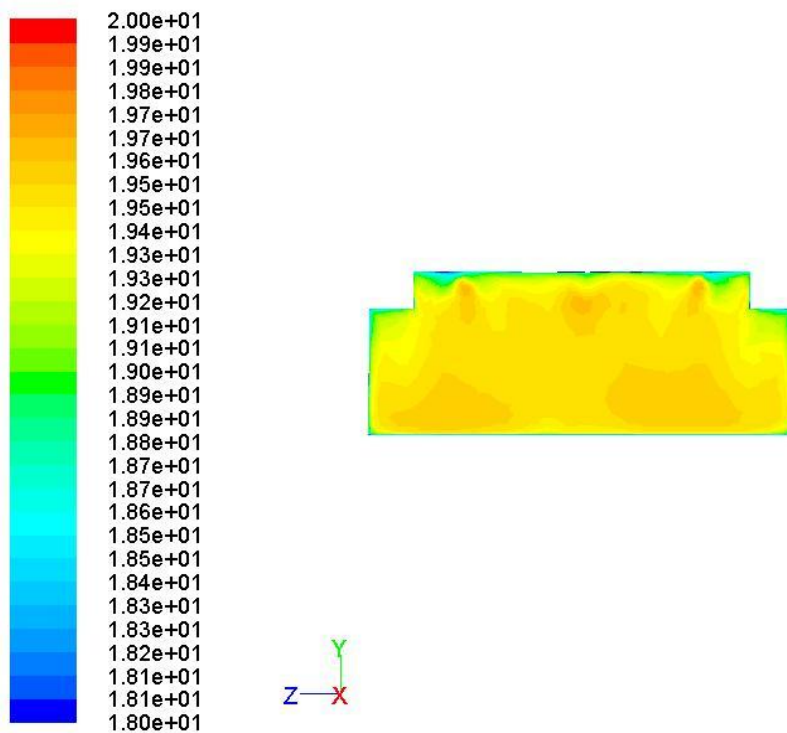
Figura 165 – Contornos de velocidade no plano de simetria – Inverno (versão 2)



Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

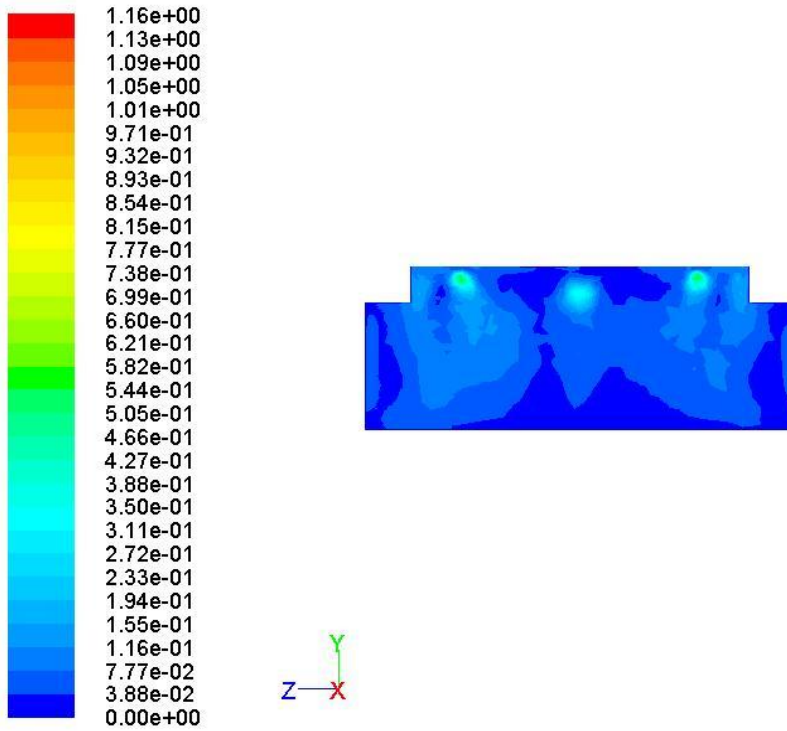
Figura 166 – Contornos de temperatura no plano do meio – Inverno (versão 2)



Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

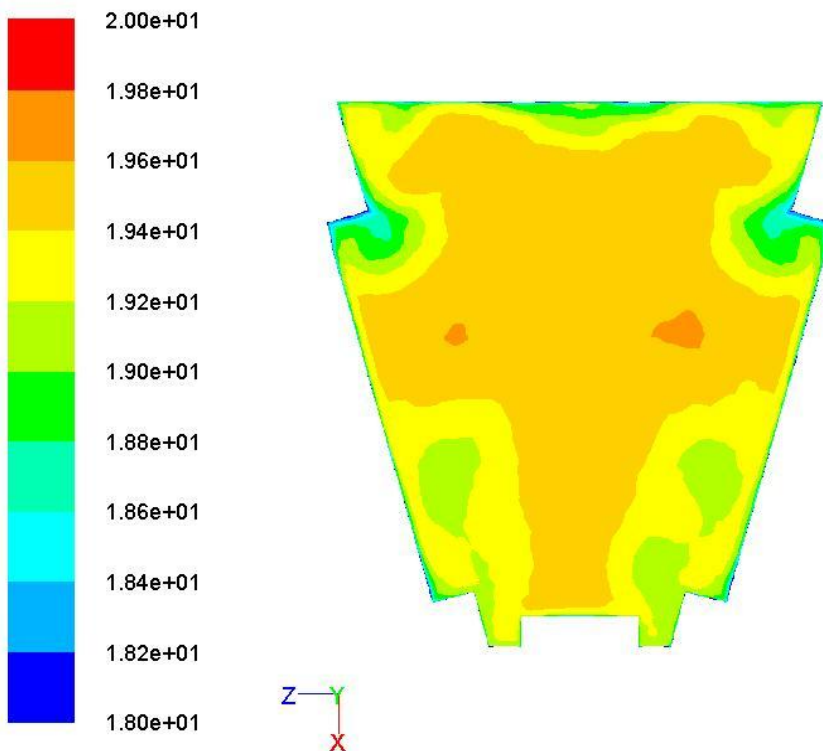
Figura 167 – Contornos de temperatura no plano do meio – Inverno (versão 3)



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

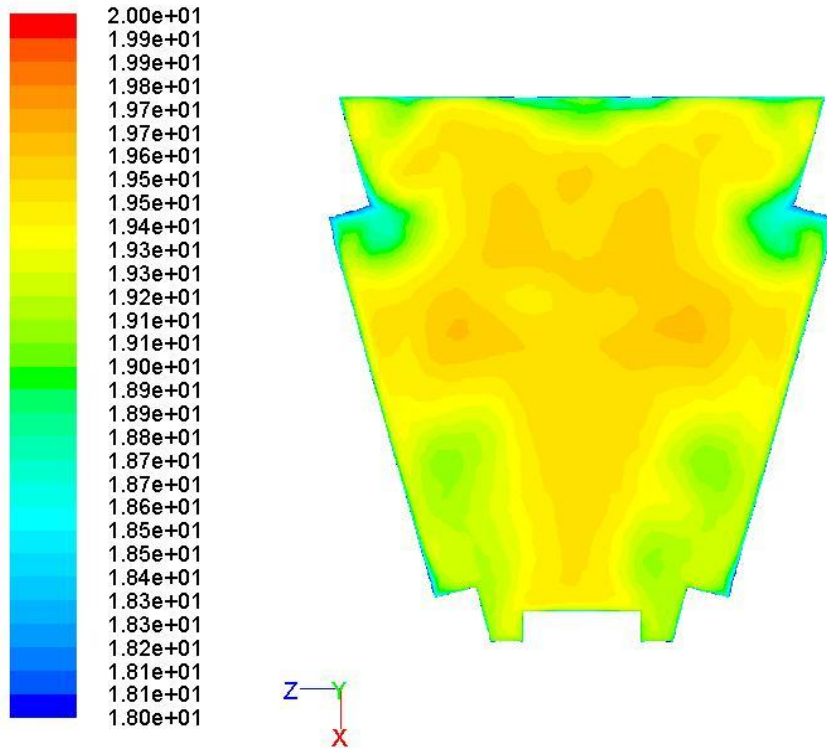
Figura 168 – Contornos de velocidade no plano do meio – Inverno (versão 2)



Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

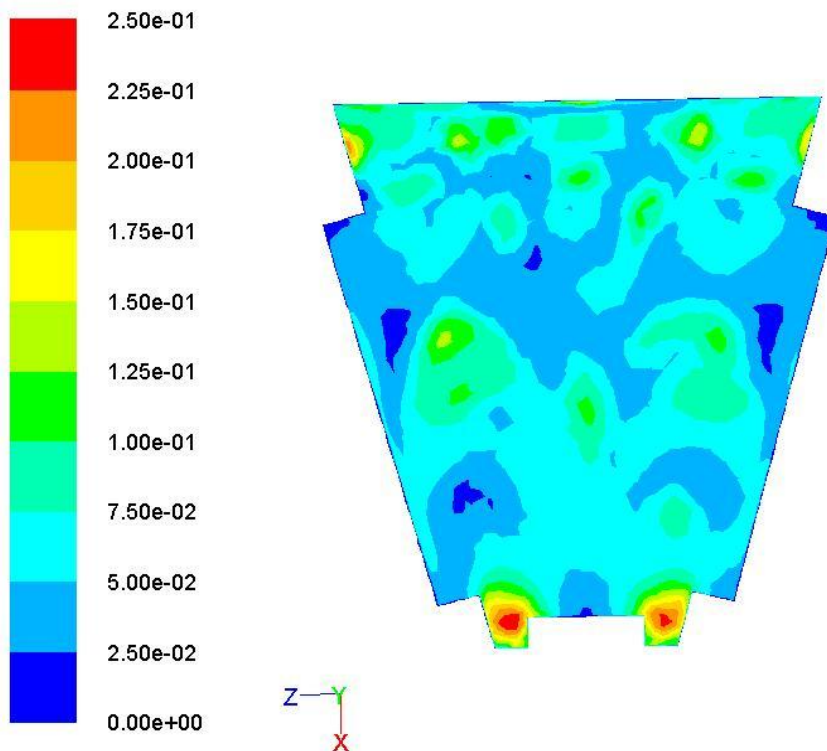
Figura 169 – Contornos de temperatura no plano útil – Inverno (versão 2)



Contours of Static Temperature (c)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 170 – Contornos de temperatura no plano útil – inverno (versão 3)



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Jul 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, rke)

Figura 171 – Contornos de velocidade no plano útil – inverno (versão 2)

