

JOÃO LUÍS GUERREIRO AVEIRO

**ESTUDO DO ESCOAMENTO DOS PRODUTOS DA COMBUSTÃO NO INTERIOR DE UMA
CONDUTA DE EVACUAÇÃO DE TURBINAS A GÁS UTILIZADAS PARA PROPULSÃO NAVAL**

Lisboa

2009

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial

**ESTUDO DO ESCOAMENTO DOS PRODUTOS DA COMBUSTÃO NO INTERIOR DE
UMA CONDOTA DE EVACUAÇÃO DE TURBINAS A GÁS UTILIZADAS PARA
PROPULSÃO NAVAL**

JOÃO LUÍS GUERREIRO AVEIRO

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins
(FCT/UNL, DEMI)

Co-Orientador: Doutor João Carlos Godinho Viegas (LNEC)

Lisboa

2009

Agradecimentos:

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus pais que através do seu esforço e empenho permitiram-me ter todas as condições para iniciar e concluir o meu percurso académico que me facultou todas as ferramentas necessárias para o meu bom desempenho profissional e neste caso em concreto a realização da minha tese de mestrado.

Em segundo lugar quero agradecer ao Professor Doutor Rui Martins pelo convite para integrar este projecto e por todo o apoio e orientação que deu não só nos trabalhos que estiveram na origem desta tese como na redacção e estruturação da mesma, ao Engenheiro João Viegas por toda a orientação e partilha de conhecimentos numa área que lhe é tão familiar, ao engenheiro Hildebrando Cruz pela recepção e integração no grupo de trabalho do NAICI e por toda a disponibilidade em prestar qualquer esclarecimento sobre os trabalhos realizados anteriormente.

Aos colegas e colaboradores de núcleo, Eng.º Vítor Pedroso, Eng.º Armando Pinto, Exp. José Martins, Exp. Luís Costa e Aj. Exp. Carlos Saldanha, pelo concelhos e disponibilidade para ajudarem sempre que necessário.

Aos colegas do Núcleo de Materiais Metálicos, pela realização dos ensaios de corrosão nos laboratórios do núcleo.

Resumo:

No sistema de evacuação dos produtos da combustão de turbinas a gás, utilizadas na propulsão naval de alguns navios, tem-se verificado a ocorrência de nucleação e propagação de fissuras através da parede da conduta, as quais têm origem na zona do pé dos cordões de soldadura existentes junto ao anel de suporte inferior da estrutura. A conduta do sistema em estudo é construída em chapa de um aço inoxidável austenítico, AISI 316L, com uma espessura de aproximadamente 3.7 mm, e encontra-se revestida exteriormente por um isolamento térmico com aproximadamente 200 mm de espessura.

O trabalho descrito na tese foi desenvolvido na fase intermédia de um projecto em curso, ref^a PTDC/EME-PME/67071/2006, com o objectivo de se estimarem quais os campos de temperatura e pressão actuantes nas paredes do sistema de evacuação, a fim de se estabelecer qual o par de pressão e temperatura actuante nas zonas críticas que apresentam fissuras. Conhecendo os valores das variáveis indicadas, estes podem utilizar-se na definição dos parâmetros de carga mecânica e temperatura aplicados nos ensaios à fadiga a alta temperatura, a realizar num novo aço austenítico, de alta resistência, com o intuito de se avaliar a possibilidade de substituição localizada do material actualmente constituinte da conduta pelo novo.

Para alcançar os objectivos enunciados anteriormente, foram realizadas várias simulações numéricas do escoamento, no interior da conduta, de modo a representar o mais fielmente possível o sistema físico estudado. As simulações foram feitas utilizando um programa *freeware* (*Fire Dynamics Simulator*), que tem implementado o modelo de turbulência LES.

Para validar o trabalho numérico desenvolvido com valores obtidos por via experimental, em serviço, foram montados, na zona crítica da conduta, vários termopares e um extensómetro para alta temperatura, assim como um tubo de pitot, o qual foi instalado na secção de saída da conduta de evacuação dos gases resultantes da combustão.

A resistência à corrosão dos aços em estudo foi avaliada.

Palavras-chave: Conduta de evacuação dos produtos da combustão; Turbina a gás; Modelação CFD.

Abstract:

In the gas turbine exhaust system used in navy combat ships, several cracks have nucleated and propagated through the pressure wall. The main cracks have propagated from the weld toe of some butt and fillet welded joints located at the lower supporting ring. The exhaust system is made in a thin sheet of grade type AISI 316L stainless steel, with a wall thickness of about 3,7 mm and it is thermally insulated with rockwool with proximally 200 mm of thickness.

The work described in this thesis was developed in intermediary stage of a current project, ref^a PTDC/EME-PME/67071/2006, and has as main propose to determinate what are the temperature and pressure fields tacking place in the system walls in order to establish the pair of precision and temperature in the zone where the cracks occur. Knowing these values they can be use in the definition of the right parameters of mechanical load and temperature to apply in the forthcoming mechanic testes of stress at high temperatures. The tests will be performed in a new kind of stainless steel whit the objective of a possible local material replacement of the existing steel.

To achieve the proposed objectives, were made a serious of CFD analysis of the flow in the interior of the exhaust duct with the purpose of representing in a more realistic form the physical system. The CFD analysis was carried out using the computer freeware code FDS (Fire Dynamics Simulator) that uses the LES turbulence model.

To validated the CFD analysis with experimental values, were install, in the critical zone, more them one termopar and one extensometer for high temperatures, as well as a pitot tube, install in the exit section of the gas turbine exhaust system.

The corrosion resistance of the steels in study was evaluated.

KEYWORDS: EXHAUST SYSTEM; GAS TURBINES; COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Âmbito do estudo	1
1.2. Objectivos	3
1.3. Plano de Trabalhos	3
1.4. Descrição do objecto de estudo	4
1.4.1. Aspectos técnicos gerais.....	4
1.4.2. Aspectos físicos a considerar.....	7
2. INTRODUÇÃO À ANÁLISE DE ESCOAMENTOS	10
2.1. Generalidades	10
2.2. Modelação física	12
2.2.1. Metodologia	12
2.3. Descrição geral do escoamento.....	13
2.3.1. Forma geral das equações de transporte.....	13
2.3.2. Conservação de massa.....	14
2.3.3. Transporte da quantidade de movimento (segunda lei de Newton).....	15
2.3.4. Conservação da energia (primeira lei da termodinâmica)	15
2.3.5. Equação de estado para gases perfeitos.....	16
2.4. Turbulência.....	17
2.5. Modelo de fase sólida	19
2.5.1. Equação de condução do calor para um sólido.....	19
2.5.2. Componente média das propriedades térmicas do material.....	19
2.5.3. Transmissão de calor por convecção para sólidos.....	20
2.5.4. Condições de fronteira.....	20
2.6. Modelação numérica.....	21
2.6.1. Discretização temporal	22
2.6.2. Discretização espacial	23
2.6.3. Discretização dos termos de transporte difusivos e convectivos.....	24
2.6.4. Termos viscosos (LES)	24
2.6.5. Condições fronteira para a velocidade numa superfície sólida.....	25
2.7. Modelo da fase sólida	26
2.7.1. Superfície sólida e temperaturas interiores.....	26
2.7.2. Transferência de calor por convecção para um objecto sólido.....	26
3. ANÁLISE DO ESCOAMENTO NO INTERIOR DA CONDUTA – MODELAÇÃO NUMÉRICA	28
3.1. Generalidades	28
3.2. Pormenores construtivos	29
3.2.1. Malha.....	29
3.2.2. Geometria.....	30
3.3. Definições das condições de fronteira.....	33

3.3.1.	Condições de fronteira à entrada	33
3.3.2.	Condições fronteira à saída	34
3.3.3.	Condições fronteira nas paredes	35
3.3.4.	Condições fronteira do domínio	36
3.3.5.	Condições iniciais do fluido	36
3.4.	Estimativa analítica.....	36
4.	1º GEOMETRIA	38
4.1.	Geometria	38
4.2.	Condições fronteira entrada.....	39
4.3.	Condições fronteira nas paredes.....	40
4.4.	Malhas utilizadas para o estudo.....	40
4.4.1.	Malha grosseira	41
4.4.2.	Malha intermédia.....	41
4.4.3.	Malha refinada.....	42
4.4.4.	Refinamento da malha.....	43
4.5.	Análise de convergência.....	45
4.6.	Análise e comparação de resultados	47
4.6.1.	Campo de velocidades.....	47
4.6.2.	Campo de temperaturas	50
4.6.3.	Campo de temperaturas junto à parede.....	53
4.6.4.	Conclusões	53
5.	2ª GEOMETRIA	55
5.1.	Geometria	55
5.2.	Condições fronteira na entrada	57
5.3.	Condições fronteira na Parede.....	57
5.4.	Refinamento de malha	58
5.5.	Análise e comparação de resultados	59
5.5.1.	Campo de Velocidades.....	60
5.5.2.	Campo de Temperatura	63
5.5.3.	Campo de Pressão	64
5.5.4.	Campo de temperaturas junto há parede.....	66
5.5.5.	Conclusões	66
6.	3ª GEOMETRIA	68
6.1.	Geometria	69
6.2.	Condições fronteira na entrada	70
6.3.	Condições fronteira na parede.....	70
6.4.	Refinamento da malha	71

6.5.	Análise e comparação de resultados	71
6.5.1.	Campo de Velocidades.....	71
7.	ANÁLISE DO ESCOAMENTO NO INTERIOR DA CONDUTA – MÉTODO EXPERIMENTAL	74
7.1.	Descrição da instalação experimental	74
7.1.1.	Ensaio prévios.....	74
7.1.2.	Posicionamento da instrumentação	76
7.2.	Descrição da instrumentação	78
7.2.1.	Medição da temperatura	78
7.2.2.	Medição da velocidade.....	80
7.2.3.	Aquisição de dados e alimentação da instrumentação.....	81
7.2.4.	Planificação dos ensaios.....	82
8.	AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS	83
8.1.	Ensaio cíclico de oxidação/corrosão em nevoeiro salino/secagem.....	83
8.2.	Ensaio de imersão continua.....	84
8.3.	Ensaio electroquímico.....	85
9.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	87
10.	BIBLIOGRAFIA	89
ANEXOS	92

Índice de Figuras

FIGURA 1.1 – FISSURA NA PAREDE INTERIOR DA CONDUTA. INSPECÇÃO DAS FISSURAS COM LÍQUIDOS PENETRANTES.	1
FIGURA 1.2 – TURBINAS A GÁS, MODELO GENERAL ELECTRIC LM 2500 [8].	5
FIGURA 1.3 – ZONA DE MISTURA DOS DOIS CAUDAIS NA ENTRADA DA CONDUTA DE EVACUAÇÃO.	5
FIGURA 1.4 – VISTAS DO SISTEMA EM ESTUDO, COM INDICAÇÃO DAS DIMENSÕES GERAIS, ISOLAMENTO E CHAPAS.	6
FIGURA 1.5 – PORMENOR DA CONDUTA COM OS ATENUADORES ACÚSTICOS.	7
FIGURA 2.1 - EXEMPLO DE UMA MALHA COM VÁRIOS NÍVEIS DE REFINAMENTO.	11
FIGURA 2.2 - EXEMPLO DE TÉCNICAS UTILIZADAS PARA MODELAR A TURBULÊNCIA.	18
FIGURA 2.3 - MALHA CARTESIANA UTILIZADA NO MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS.	23
FIGURA 3.1 - ALINHAMENTO ENTRE MALHAS, ALINHAMENTO CORRECTO E INCORRECTO, RESPECTIVAMENTE.	30
FIGURA 3.2 - DESENVOLVIMENTO DA GEOMETRIA A UTILIZAR NO PROGRAMA FDS.	31
FIGURA 3.3 - APROXIMAÇÃO DA GEOMETRIA REAL DA CONDUTA INFERIOR ATRAVÉS DO PROCESSO DE “STAIR STEPPING”.	32
FIGURA 3.4 - UTILIZAÇÃO DO PARÂMETRO “SAWTOOTH” DE MODO A MINIMIZAR OS EFEITOS DA APROXIMAÇÃO PELO PROCESSO “STAIRSTEPPING”.	32
FIGURA 3.5 - VARIAÇÕES DA GEOMETRIA DA SECÇÃO DE ENTRADA, DEFINIDA A VERMELHO, COM O REFINAMENTO DA MALHA.	34
FIGURA 3.6 - FLUTUAÇÕES DO VALOR DO CAUDAL NA SECÇÃO DE ENTRADA DA CONDUTA DEVIDO AS ALTERAÇÕES GEOMÉTRICAS IMPOSTAS PELO REFINAMENTO DE MALHA.	34
FIGURA 3.7 - CONDIÇÕES FRONTEIRA À SAÍDA	35
FIGURA 3.8 - DOMÍNIO DE CÁLCULO.	36
FIGURA 4.1 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS GEOMÉTRICOS DA CONDUTA UTILIZADOS NO ESTUDO [1] E NA PRESENTE TESE.	39
FIGURA 4.2 - VERIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES FRONTEIRA NO PLANO $Y=0$ E $X=0$, RESPECTIVAMENTE.	40
FIGURA 4.3 - GEOMETRIA DOS ATENUADORES ACÚSTICOS, MALHA GROSSEIRA.	41
FIGURA 4.4 - GEOMETRIA DOS ATENUADORES ACÚSTICOS, MALHA INTERMÉDIA.	42
FIGURA 4.5 - POSIÇÃO DA ZONA DE TRANSIÇÃO ENTRE MALHAS, MALHAS REFINADAS.	43
FIGURA 4.6 - CONVERGÊNCIA DO VALOR DE PRESSÃO MÉDIA NA SECÇÃO DE SAÍDA DA CONDUTA.	45
FIGURA 4.7 - CONVERGÊNCIA DO VALOR DE VELOCIDADE MÉDIA NA SECÇÃO DE SAÍDA DA CONDUTA.	46
FIGURA 4.8 - CONVERGÊNCIA DO VALOR DE TEMPERATURA MÉDIA NA SECÇÃO DE SAÍDA DA CONDUTA.	46
FIGURA 4.9 - MALHA REFINADA UTILIZADA	47
FIGURA 4.10 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS CAMPOS DE VELOCIDADE VERTICAIS, OBTIDOS ATRAVÉS DO FDS E EM [1] PARA DUAS SECÇÕES DA CONDUTA.	48
FIGURA 4.11 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE VELOCIDADE VERTICAL, OBTIDOS ATRAVÉS DO FDS E EM [1] PARA UMA SECÇÃO DA CONDUTA LOCALIZADA NO INÍCIO DO BORDO DE ATAQUE DOS ATENUADORES ACÚSTICOS.	49
FIGURA 4.12 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE VELOCIDADE VERTICAL, OBTIDOS ATRAVÉS DO FDS E EM [1] PARA UMA SECÇÃO DA CONDUTA LOCALIZADA A MEIO DOS ATENUADORES ACÚSTICOS EM DUAS DIRECÇÕES PERPENDICULARES.	50
FIGURA 4.13 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE VELOCIDADE VERTICAL, OBTIDOS ATRAVÉS DO FDS E EM [1] PARA UMA SECÇÃO DA CONDUTA LOCALIZADA NA ZONA DE ESTEIRA EM DUAS DIRECÇÕES PERPENDICULARES.	50
FIGURA 4.14 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS CAMPOS DE TEMPERATURA, OBTIDOS ATRAVÉS DO FDS E EM [1] PARA DUAS SECÇÕES DA CONDUTA.	51
FIGURA 4.15 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE TEMPERATURA, OBTIDOS ATRAVÉS DO FDS E EM [1] PARA UMA SECÇÃO DA CONDUTA LOCALIZADA NO INÍCIO DO BORDO DE ATAQUE DOS ATENUADORES ACÚSTICOS.	52

FIGURA 4.16 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE TEMPERATURA, OBTIDOS ATRAVÉS DO FDS E EM [1] PARA UMA SECÇÃO DA CONDUTA LOCALIZADA A MEIO DOS ATENUADORES ACÚSTICOS EM DUAS DIRECÇÕES PERPENDICULARES.	52
FIGURA 4.17 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAMPO DE TEMPERATURA, OBTIDOS ATRAVÉS DO FDS E EM [1] PARA UMA SECÇÃO DA CONDUTA LOCALIZADA NA ZONA DE ESTEIRA DOS ATENUADORES EM DUAS DIRECÇÕES PERPENDICULARES.	52
FIGURA 4.18 - GRADIENTE DE TEMPERATURAS EXISTENTE NAS QUATRO PAREDES DA CONDUTA.	53
FIGURA 5.1 - PORMENOR DA ZONA DE ENTRADA DOS GASES DA COMBUSTÃO E DE AR NOVO NO MODELO FÍSICO, ESQUEMA E FOTOGRAFIA.	56
FIGURA 5.2 - MODELO GEOMÉTRICO APÓS ALTERAÇÕES, ZONA DO COLECTOR.	56
FIGURA 5.3 - CONDIÇÕES FRONTEIRA REPRESENTATIVAS DOS DOIS CAUDAIS.	57
FIGURA 5.4 - CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA EM ESTUDO, CHAPA INTERIOR, ISOLAMENTO E CHAPA EXTERIOR	58
FIGURA 5.5 - MALHA UTILIZADA.	59
FIGURA 5.6 - COMPARAÇÃO DO CAMPO DE VELOCIDADES NA SECÇÃO DA ZONA DE ENTRADA DA CONDUTA SEGUNDO DUAS DIRECÇÕES PERPENDICULARES. CAMPO IMPOSTO, CAPÍTULO 4, E CAMPO OBTIDO PELO DESENVOLVIMENTO DO ESCOAMENTO IMPOSTO NESTE CAPÍTULO.	60
FIGURA 5.7 - DISTRIBUIÇÃO DO CAMPO DE VELOCIDADES NA SECÇÃO DE ENTRADA DA CONDUTA.	61
FIGURA 5.8 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS CAMPOS DE VELOCIDADE VERTICAIS PARA DUAS SECÇÕES DA CONDUTA PERPENDICULARES ENTRE SI, OBTIDOS NOS NOVOS DESENVOLVIMENTOS E NO CAPÍTULO (4), RESPECTIVAMENTE.	62
FIGURA 5.9 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS CAMPOS DE TEMPERATURA PARA DUAS SECÇÕES DA CONDUTA PERPENDICULARES ENTRE SI, OBTIDOS NOS NOVOS DESENVOLVIMENTOS E NO CAPÍTULO [4], RESPECTIVAMENTE.	64
FIGURA 5.10 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS CAMPOS DE PRESSÃO PARA TRÊS SECÇÕES DA CONDUTA PERPENDICULARES ENTRE SI, OBTIDOS NO CAPÍTULO [4] E NOS NOVOS DESENVOLVIMENTOS, RESPECTIVAMENTE.	65
FIGURA 5.11 - GRADIENTE DE TEMPERATURAS EXISTENTE NAS QUATRO PAREDES DA CONDUTA.	66
FIGURA 6.2 - GEOMETRIA DO SISTEMA TURBINA E COLECTOR COM A POSIÇÃO DO DEFLECTOR.	69
FIGURA 6.3 - MODELO NUMÉRICO COM DEFLECTOR	70
FIGURA 6.4 - MALHA UTILIZADA.	71
FIGURA 6.5 - RESULTADOS PREVISTOS PARA O CAMPO DE VELOCIDADES NA SECÇÃO INTERMÉDIA DA ZONA DO COLECTOR ANTES E APÓS COLOCAÇÃO DO DEFLECTOR, RESPECTIVAMENTE.	72
FIGURA 6.6 - CAMPO DE VELOCIDADE NA SECÇÃO INTERMÉDIA DA ZONA DO COLECTOR COM DEFLECTOR.	72
FIGURA 7.1 - MUFLA E RESPECTIVA CURVA DE CALIBRAÇÃO ONDE FORAM REALIZADOS OS ENSAIOS PRÉVIOS	75
FIGURA 7.2 - REGISTOS OBTIDOS PARA OS SETE TERMOPARES DURANTE OS ENSAIOS PRÉVIOS	76
FIGURA 7.3 - POSIÇÃO DOS TERMOPARES NA CONDUTA E MODO DE FIXAÇÃO DOS MESMOS.	77
FIGURA 7.4 - ESTRUTURA DE FIXAÇÃO DO TUBO DE PITOT À SAÍDA DA CONDUTA.	78
FIGURA 7.5 - AQUECIMENTO DA CHAPA COM UM MAÇARICO E SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.	79
FIGURA 7.6 - ESTRUTURA DE FIXAÇÃO DO TUBO DE PITOT À SAÍDA DA CONDUTA.	79
FIGURA 7.7 - PITOT E TUBO DE POLIAMIDA UTILIZADOS PARA A MEDIÇÃO DE VELOCIDADES	80
FIGURA 7.8 - APARELHOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS DATATAKER E PVM620, RESPECTIVAMENTE. FONTE DE ALIMENTAÇÃO DISPONÍVEL A BORDO DO NAVIO.	81
FIGURA 8.2 - ASPECTO VISUAL DA SUPERFÍCIE APÓS O ENSAIO DE IMERSÃO CONTÍNUA.	84
FIGURA 8.3 - CURVAS DE POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA OBTIDAS NAS AMOSTRAS 7NM09/3 (LIGA 1.4404) E 7NM09/4 (LIGA 1.4376), EM CONTACTO COM A SOLUÇÃO DE SIMULAÇÃO DO CONDENSADO DE GASES DE EXAUSTÃO.	85

Índice de Quadros

QUADRO 4.1– CARACTERÍSTICAS DAS VÁRIAS MALHAS	44
QUADRO 4.2– RESULTADOS OBTIDOS NA SECÇÃO DE SAÍDA	44
QUADRO 8.1– COMPOSIÇÃO DA SOLUÇÃO DE SIMULAÇÃO DO CONDENSADO DE GASES DE EXAUSTÃO (ADAPTADO DE [20]).	83
QUADRO 8.2– MASSA DAS CHAPAS ANTES E APÓS O ENSAIO DE IMERSÃO CONTINUA.	85

1. Introdução

1.1. Âmbito do estudo

Algumas embarcações utilizadas pela Marinha Portuguesa possuem, devido ao tipo de missões que desempenham, turbinas a gás ligadas ao veio do hélice utilizado como meio de propulsão naval. Este equipamento permite alcançar uma velocidade máxima de aproximadamente 32 nós (cerca de 60 km/h). Apesar das evidentes vantagens no uso deste equipamento - acréscimo de potência e velocidade - surgiram, durante as manutenções periódicas, fissuração localizada na estrutura do sistema de evacuação dos gases de escape. Apesar de as fissuras encontradas não colocarem em causa a disponibilidade, nem a operacionalidade do sistema, alguns custos associados à sua reparação poderão ser evitados.

De facto, verificou-se durante as operações de manutenção do sistema, que as condutas de evacuação dos produtos da combustão apresentavam fissuras propagadas segundo a direcção circunferencial, isto é, segundo uma direcção perpendicular ao eixo longitudinal da conduta. Estas fissuras são frequentemente reparadas, por enchimento, com recurso a tecnologia da soldadura MIG/MAG. As primeiras fissuras superficiais detectadas nas condutas localizavam-se na ligação destas ao anel de suporte inferior (figura.1.1). As fissuras nuclearam e propagaram-se em Modo I, a partir do pé do cordão de ligações soldadas em T, sem transferência de carga, ou a partir do pé do cordão de soldaduras de tipo topo a topo, atingindo em alguns casos os 200 mm (figura. 1.1).

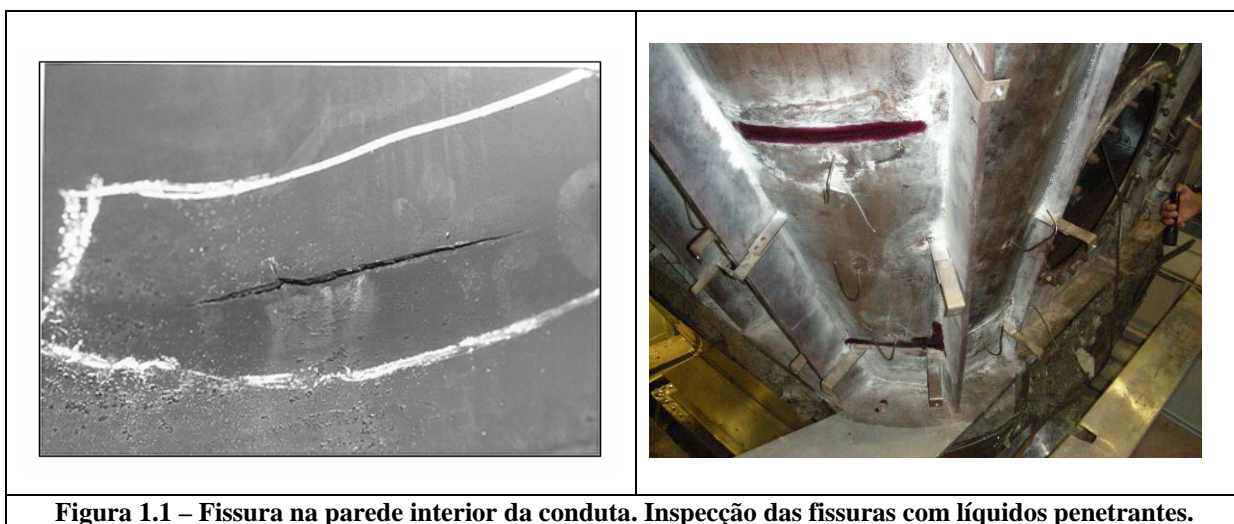


Figura 1.1 – Fissura na parede interior da conduta. Inspeção das fissuras com líquidos penetrantes.

O diagnóstico das causas de fissuração nas condutas de evacuação de gases das turbinas a gás, assim como a definição das alterações a introduzir a nível de projecto, de

processo de fabrico e/ou de materiais, para que não se verifique fissuração em serviço nas referidas condutas, foram objecto de estudo recente [1] a [8].

Identificaram-se dois aspectos que careciam de estudo mais aprofundado: o escoamento dos produtos da combustão, de forma a dispor-se de uma estimativa mais exacta do campo de temperatura na parede da conduta e do seu campo de pressão, assim como a escolha de um aço adequado para suportar essas acções.

Com a constante pesquisa e desenvolvimento dos materiais, foi recentemente desenvolvida uma nova liga de aço inoxidável austenítico. Esta liga de aços inoxidáveis austeníticos da classe das ligas de cromo e manganês (1.4376), apresenta boas propriedades mecânicas e tem um custo baixo quando comparado com outros aços inoxidáveis com as mesmas características. Contudo, este aço ainda não foi exaustivamente estudado e as referências a ele na bibliografia são escassas. Relacionado com o segundo ponto referido anteriormente e atendendo a esta escassez de elementos é interessante para o desenvolvimento tecnológico da conduta, a realização de comparações entre este aço e outros aços inoxidáveis, nomeadamente o aço que constitui o material base da conduta, o aço inoxidável 1.4404. Nesta tese procurou-se caracterizar o escoamento dos produtos da combustão da turbina a gás utilizada para propulsão naval, de modo a que em estudos posteriores se possa submeter esta nova liga às condições de funcionamento e aferir sobre a sua possível utilização no sistema em estudo.

A presente dissertação enquadra-se no desenvolvimento do projecto de I&D, intitulado “Projecto de Desenvolvimento Tecnológico de Conduas de Evacuação de Gases de Turbinas a Gás Utilizadas para Propulsão Naval”, ref^a PTDC/EME-PME/67071/2006, que tem como objectivo aprofundar aspectos não abordados nos estudos antecedentes, em particular facultando dados para que mais estudos se possam desenvolver, tendo em vista a utilização deste novo material nesta particular aplicação, nomeadamente através dos campos de temperatura e pressão a que está sujeito.

Trata-se de um projecto com interesse tecnológico uma vez que, perante a previsível expansão da utilização de turbinas a gás na propulsão naval, visa a resolução concreta de um problema real; também tem elevado interesse científico, pois não está disponível na literatura informação sobre o comportamento de estruturas do tipo das condutas em causa e é de natureza interdisciplinar, pois envolve estudos de termodinâmica, de fluidos, bem como de análise e de modelação numérica de temperaturas e de tensões. A metodologia utilizada tem também aplicações a um leque mais vasto de domínios, mesmo fora do âmbito das construções mecânicas, como por exemplo: modelação e verificação do funcionamento de

condutas; análise e verificação do funcionamento dos sistemas de ventilação e controlo de fumo; determinação das perdas de carga e reconfiguração das condutas de exaustão de edifícios. Os estudos efectuados na tese foram feitos recorrendo à utilização de *software* livre, em detrimento dos pacotes comerciais.

1.2. Objectivos

Na sequência de estudos efectuados anteriormente, quer relacionados como o problema que está na base desta linha de investigação, [1] a [8], quer no âmbito de outras linhas de investigação [9], pretende-se quantificar, de forma mais exacta, o nível de tensões induzido na parede da conduta resultante da pressão associada à passagem do fluido e à sua temperatura. Para esse fim, pretende-se construir e validar modelos computacionais, em diferenças finitas, da estrutura da conduta e do escoamento do fluido que, numa fase inicial, possam fornecer dados passíveis de serem comparados com os resultados, obtidos através do software COSMOS, apresentados em [1] e assim aferir quanto ao desempenho do software escolhido na modelação de escoamentos com as características apresentadas. Numa segunda fase pretende-se melhorar as simulações, no que respeita sobretudo à geometria, de modo a representar mais fielmente o sistema existente no navio. Nesta fase serão necessárias visitas frequentes ao navio, de modo a ser feito um levantamento, até a data incompleto, das características da conduta e do modo com é feita a admissão dos caudais.

Por último, pretende-se elaborar e montar um sistema de aquisição de dados que possibilite a obtenção de valores experimentais, que possam servir para validar todos os estudos realizados através dos modelos numéricos.

Neste contexto, constitui como objectivo principal deste trabalho a modelação do escoamento, tendo em vista a previsão dos campos de temperatura e de pressão no material que constitui a conduta. Posteriormente os resultados obtidos serão utilizados de modo a aferir quanto à possibilidade de utilizar um novo material na conduta.

1.3. Plano de Trabalhos

Os trabalhos propostos vieram dar continuidade ao trabalho preliminar já desenvolvido. Para cumprir os objectivos enunciados no ponto anterior, o trabalho desenvolveu-se nas seguintes fases:

A. MODELAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DE PRODUTOS DA COMBUSTÃO NO INTERIOR DA CONDUTA DE EVACUAÇÃO DE GASES E DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES INTRODUZIDAS NA MESMA.

1. Modelação em CFD, utilizando o *software Fire Dynamics Simulator*, do escoamento numa conduta de evacuação de produtos da combustão proveniente de uma turbina a gás.
2. Comparação dos resultados obtidos através de dois programas de simulação numérica.
3. Determinação das condições termomecânicas a que está sujeita a chapa que constitui a conduta de evacuação.

B. MONITORIZAÇÃO DO ESCOAMENTO NUMA CONDUTA DE EXAUSTÃO DE PRODUTOS DA COMBUSTÃO PROVENIENTE DE UMA TURBINA A GÁS NUMA CONDIÇÃO DE PROPULSÃO NAVAL.

1. Elaboração e montagem de um sistema de aquisição de dados, a bordo do navio, para a monitorização das características do escoamento (campo de temperaturas, campo de velocidades e campo de pressões), para o regime transiente e estacionário.

C. ESTUDO CONDUCENTE À OPTIMIZAÇÃO DA TECNOLOGIA DE CONSTRUÇÃO DA CONDUTA DE EVACUAÇÃO.

1. Estudar alterações na geometria da conduta, de forma a otimizar o processo de evacuação e a evitar o aparecimento das fissuras.
2. Verificar a possibilidade de substituição do actual aço de construção da conduta pelo aço de tipo cromo-manganês, fazendo a, avaliação da sua resistência à corrosão.

D. SÍNTESE DE TODOS OS RESULTADOS OBTIDOS, DISCUSSÃO DOS RESULTADOS, ELABORAÇÃO E ESCRITA DA DISSERTAÇÃO.

1.4. Descrição do objecto de estudo

1.4.1. Aspectos técnicos gerais

A turbina a gás utilizada para a propulsão é uma turbina com 6,52 metros de comprimento, sensivelmente 2 metros de altura, 4500 Kg de massa, com uma eficiência térmica de 37%, que pode atingir as 3600 r.p.m. e utiliza uma mistura combustível em regime de combustão pobre, segundo informações disponibilizadas pelo fabricante. O modelo da turbina instalada no navio é o modelo General Electric LM 2500 (figura 1.2), que permite alcançar uma velocidade máxima de 32 nós.

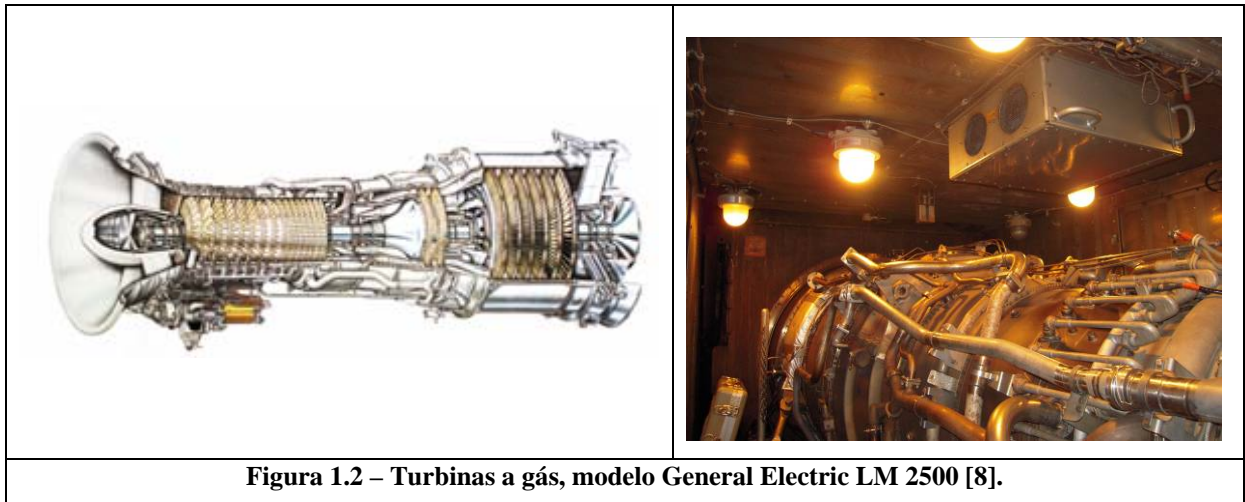


Figura 1.2 – Turbinas a gás, modelo General Electric LM 2500 [8].

Estima-se que o caudal mássico principal de produtos da combustão proveniente do interior da turbina seja cerca de 59 kg/s e que os gases nesta zona estejam a uma temperatura próxima dos 566 °C. O caudal mássico de ar secundário, proveniente do exterior do navio e utilizado para arrefecer o habitáculo onde se encontra a turbina, deverá ser cerca de 9 kg/s. Na zona de entrada da conduta de evacuação, estes dois caudais misturam-se através de um eductor instalado no início da conduta (figura 1.3), fazendo diminuir a temperatura dos gases à entrada da conduta até uma temperatura próxima 500 °C.



Figura 1.3 – Zona de mistura dos dois caudais na entrada da conduta de evacuação.

O objecto em estudo, a conduta de evacuação dos produtos da combustão, tem aproximadamente 14 metros de altura, uma secção de passagem dos gases que varia entre os 1,56 metros por 1,02 metros na zona inferior de entrada dos gases e os 2,60 metros por 2,00 metros no topo da conduta, sendo esta externamente revestida com isolamento térmico e chapa rebitada (figura 1.4).

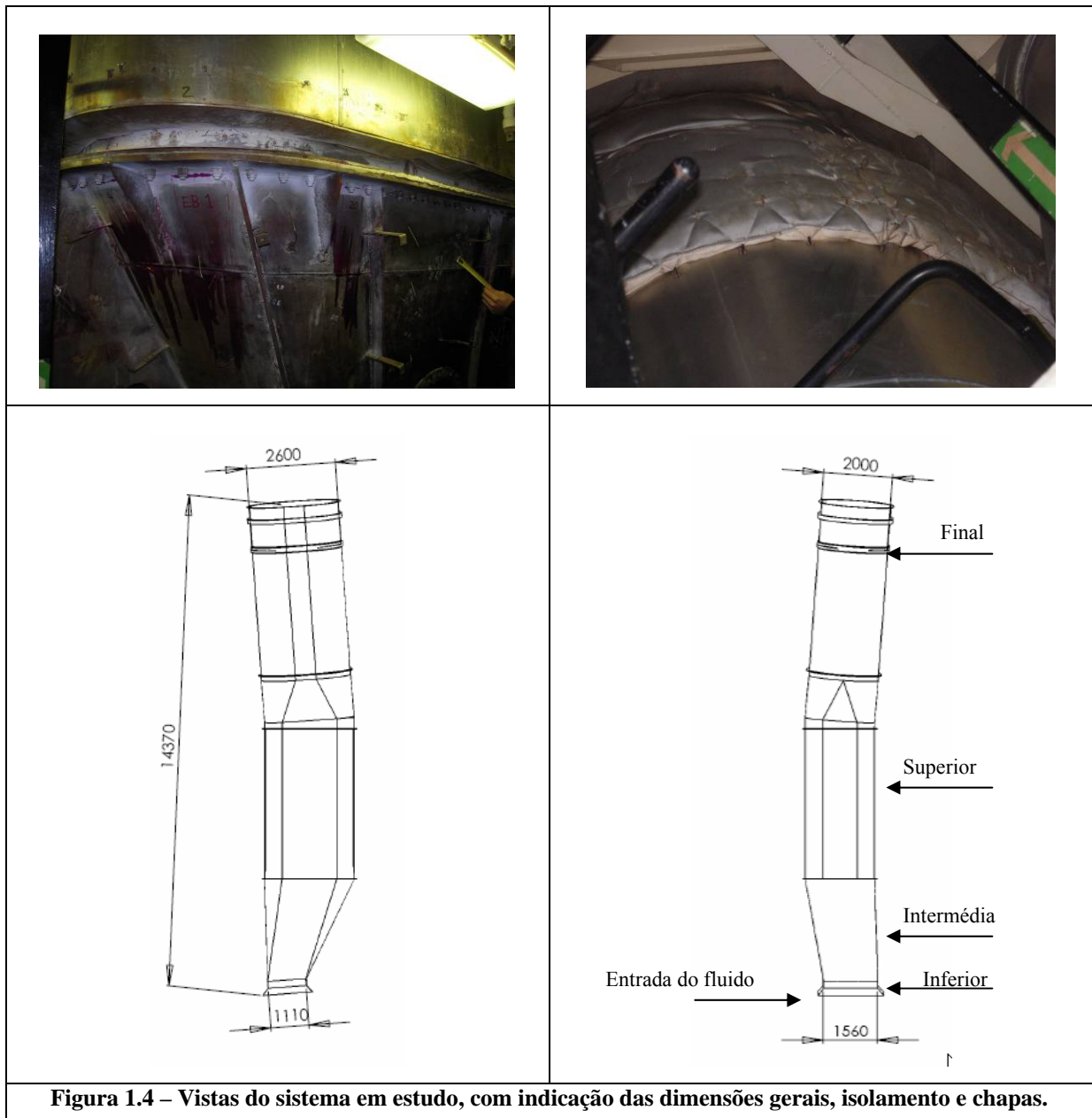


Figura 1.4 – Vistas do sistema em estudo, com indicação das dimensões gerais, isolamento e chapas.

Para uma melhor compreensão da geometria da conduta são referenciadas quatro zonas distintas: inferior, intermédia, superior e final (figura 1.4). É na zona inferior da conduta que, tal como descrito anteriormente, os gases resultantes da combustão são misturados com o caudal de ar secundário, diminuindo a temperatura dos primeiros e, conseqüentemente, o efeito pernicioso da temperatura nas propriedades mecânicas do aço.

O sistema de evacuação de gases foi construído com chapas calandradas, sob a forma de virolas, em aço inoxidável austenítico tipo AISI 316L (1.4404) com aproximadamente 4 mm de espessura, acabamento superficial de tipo laminado, temperado e recozido.

Encontram-se instalados três painéis (que constituem o atenuador acústico) no interior da zona de secção constante da conduta de evacuação dos gases de combustão da turbina a

gás (figura 1.5). Esta secção está identificada na figura 1.4 como a zona denominada por “Superior”. Desconhece-se qual o material de que são constituídos os silenciadores, as espessuras das chapas perfuradas e dos perfis utilizados e qual a constituição do seu interior. Foram colocados pelo construtor do navio, provavelmente com o duplo objectivo de reduzir o nível de ruído causado pela evacuação dos gases de combustão e de reter pequenas partículas incandescentes que são transportadas com os produtos da combustão.



Figura 1.5 – Pormenor da conduta com os atenuadores acústicos.

1.4.2. Aspectos físicos a considerar

De acordo com as informações disponibilizadas pelo fabricante do sistema, a temperatura de mistura dos dois caudais na zona de entrada da conduta de evacuação estará próxima dos 500°C. Esta temperatura foi confirmada através do balanço energético (1ª lei da termodinâmica), expresso na equação seguinte:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_e \left(gz + \frac{1}{2}v^2 + h \right) - \sum \dot{m}_s \left(gz + \frac{1}{2}v^2 + h \right) \quad (1.1)$$

Na equação anterior foram apenas considerados os efeitos da entalpia dos gases dos caudais separados e da mistura, desprezaram-se os efeitos da velocidade e da altura. Considerando os gases da combustão com as características do ar atmosférico, obteve-se a equação 1.2:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{ar} \left(h_{(T=85^\circ C)} \right) + \dot{m}_{p.comb} \left(h_{(T=566^\circ C)} \right) &= \dot{m}_{total} \left(h_{(T.mistura)} \right) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow 9 \times 358723 + 59 \times 865152 &= 58 \times h_{(T.mistura)} \Leftrightarrow h_{(T.mistura)} = 798125 \text{ J/Kg} \end{aligned} \quad (1.2)$$

o que corresponde a uma temperatura de mistura de 505°C.

No desenvolvimento do escoamento no interior da conduta é de esperar que a temperatura dos gases diminua ao longo do eixo longitudinal do sistema, sendo que no topo da conduta a temperatura deverá ser próxima dos 400 °C, valor indicado para a “assinatura térmica” (rasto térmico) do navio. Em estudos antecedentes [2] foi medida uma temperatura pontual, de cerca de 350 °C, na face exterior da parede interior da conduta (chapa de aço AISI316L), na zona intermédia da conduta, zona onde se verifica a ocorrência de fissuras.

Uma vez que a espessura da chapa interior da parede da conduta é extremamente fina, cerca de 4 mm, pode-se assumir que a temperatura medida está muito próxima da temperatura do fluido em contacto com o lado interior da chapa da parede da conduta na zona de medição. No entanto parece haver alguma discrepância entre o valor indicado para a temperatura média da secção de saída do fluido (400°C) e a temperatura medida (350°C) indicada para o fluido na zona intermédia da conduta. Contrariamente ao esperado, a temperatura na zona intermédia é menor uma vez que na zona de medição, face exterior da chapa, são sentidos os efeitos térmicos da acção da camada limite turbulenta que introduz uma maior dissipação de energia e conseqüentemente um decréscimo da temperatura junto à parede. Novos ensaios poderão permitir a confirmação, ou a alteração, do valor de temperatura tido como referência.

A velocidade do fluido na secção de entrada dos gases foi calculada através da expressão (1.3):

$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot A \Leftrightarrow V = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A} = \frac{68}{0,457 \times 1,75} \cong 85 \text{ m/s}$	(1.3)
---	--------------

em que A , representa a área da secção inicial de passagem de gases de combustão, \dot{m} representa o caudal mássico total dos gases (soma do caudal mássico principal dos produtos da combustão com o caudal de ar secundário) e ρ representa a massa específica do fluido à temperatura de funcionamento (temperatura de mistura). Os produtos da combustão consideraram-se aproximadamente iguais ao ar, uma vez que 70% do azoto nele contido passam através da turbina sem serem modificados [2].

Conhecida a velocidade na secção de entrada da conduta de evacuação é também possível caracterizar o escoamento face ao seu número de Reynolds. Assim, recorrendo a expressão que permite determinar o Número de Reynolds para secções não-circulares, equação (1.4), obteve-se:

$\text{Re} = \frac{V \cdot \phi_{\text{hidráulico}}}{\nu} = \frac{V}{\nu} \times \frac{4 \cdot A_{\text{secção}}}{P_{\text{molhado}}} = \frac{85}{6,98 \times 10^{-5}} \times \frac{4 \times 1,75}{5,2} \cong 1,6 \times 10^6$	(1.4)
--	-------

O valor calculado do número de Reynolds, Re , é elevado, $\text{Re} > 3000$, podendo considerar-se que o fluido à entrada na conduta se encontra em regime turbulento, colando e descolando da parede, súbita e aleatoriamente, com uma frequência que poderá excitar alguns modos de vibração da estrutura, estando dependendo a frequência de aplicação da pressão do valor da frequência de funcionamento da turbina a gás. Na expressão 1.4, aplicável a tubos de secção não circular, $\phi_{\text{hidráulico}}$ representa o diâmetro hidráulico; V representa a velocidade de passagem do fluido na secção considerada; P_{molhado} representa o perímetro molhado da secção de passagem dos gases; $A_{\text{secção}}$ representa a área da secção e ν representa o quociente entre a viscosidade e a densidade, as quais variam com a pressão e temperatura do fluido.

Da zona de entrada dos gases até a zona definida como intermédia, a área da secção de passagem dos gases aumenta. De acordo com os princípios da Mecânica dos Fluidos há diminuição da velocidade do escoamento, assim como da pressão dinâmica. A última zona, compreendida entre o fim do difusor e o topo da conduta, possui uma secção aproximadamente constante e espera-se que a velocidade e a pressão dinâmica do fluido sejam também aproximadamente constantes.

2. Introdução à análise de escoamentos

2.1. Generalidades

A análise dos escoamentos, com a determinação dos campos de pressões, velocidades e temperaturas, foi realizada com o programa FDS. Ao longo do seu desenvolvimento, o FDS, tem sido dirigido para a resolução de problemas práticos no campo da segurança ao incêndio, providenciando ao mesmo tempo uma ferramenta para o estudo da dinâmica fundamental dos incêndios e da combustão. O FDS, dentro do domínio da segurança contra incêndios, é normalmente utilizado para a modelação de fenómenos de: (i) transporte a baixo número de Reynolds de grandezas escalares e vectoriais provenientes de um incêndio (calor e produtos da combustão); (ii) transmissão de calor por convecção e radiação entre um gás e uma superfície sólida; (iii) pirólises; (iv) propagação da chama e crescimento do incêndio; (v) activação de *sprinklers*, detectores de calor, detectores de fumo e (vi) extinção através de água (*sprinklers*). Contudo, e apesar do FDS ter sido desenvolvido especificamente para simulações de fenómenos de incêndio em edifícios (onde uma malha estruturada cartesiana se adapta geralmente bem), pode ser utilizado noutros domínios da mecânica e da termodinâmica de fluidos, tais como em simulações de escoamentos incompressíveis e que não incluam necessariamente efeitos térmicos (ou incêndios).

Para a resolução destes fenómenos o programa utiliza as equações de transporte que exprimem a conservação de massa, da quantidade de movimento e da energia num sistema cartesiano de coordenadas, sendo estas equações complementadas, para fechar o sistema de equações resultante, com equações auxiliares, nomeadamente as equações de estado e equações do modelo da turbulência.

O programa, para além da capacidade de cálculo dos fenómenos da turbulência, também tem a capacidade de efectuar cálculos na interface fluido/sólido através da modelação da zona da camada limite.

Para a resolução do sistema de equações resultante, o programa utiliza o Método de Diferenças Finitas numa malha estruturada. Como tal, o refinamento local da malha é conseguido através da diminuição do espaçamento entre nós, ver [figura 2.1](#). Assim, são introduzidos nós adicionais nas zonas de fortes gradientes dos campos de velocidade, temperatura ou outro, de forma a que a variação numérica desse campo (normalmente linear ou correspondente a uma função simples) seja mais próxima da real e assim sejam minorados os erros numéricos, obtendo-se resultados mais próximos do fenómeno real.

Para a realização deste refinamento local, e uma vez que eram desconhecidas à priori a maioria das características do escoamento, foi necessário desenvolver uma metodologia através de refinamentos sucessivos, iniciando o estudo com uma malha mais esparsa e após a validação do modelo refinar sucessivamente a malha até que a introdução de um maior número de elementos não introduza alterações nos resultados obtidos. A introdução de elementos, refinamento, em locais onde estes não tragam mais valia traduz-se apenas num aumento dos requisitos computacionais e de tempo de cálculo.

Contudo, antes de se proceder ao refinamento da malha referido anteriormente, foram realizadas diversas simulações utilizando mais que uma malha até a obtenção de uma solução aproximada do problema, que confirme, entre outros, a validade das condições fronteira utilizadas. Somente depois desta simulação inicial estar suficientemente próxima dos valores calculados e conhecidos, e que são solução do problema, é que se procedeu ao refinamento da malha de um modo mais sistemático.

Neste estudo, apesar de não serem conhecidos resultados experimentais que permitissem validar as simulações numéricas e que ao mesmo tempo servissem de referência na construção da malha (refinamentos locais), foi possível utilizar resultados obtidos em estudos anteriores [1] e assim ter uma melhor noção das características do escoamento em estudo, bem como confirmar a exactidão dos novos resultados e consequentemente do modelo e programa numérico utilizados.

Nas secções seguintes serão apresentados mais detalhadamente os princípios físicos aqui textualmente referidos.

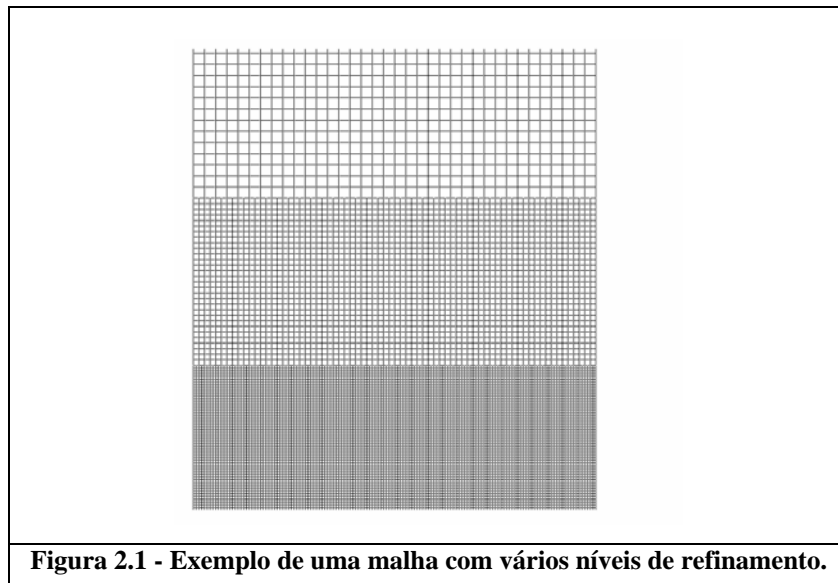


Figura 2.1 - Exemplo de uma malha com vários níveis de refinamento.

2.2. Modelação física

2.2.1. Metodologia

Para um fluido viscoso e incompressível, as equações que permitem descrever o escoamento são as equações de continuidade e de Navier-Stokes.

O software utilizado no estudo possibilita o cálculo das grandezas físicas através do método da simulação directa (DNS), este tipo de simulação apesar de permitir caracterizar fenómenos de turbulência em todas as escalas desde escalas próximas da molecular até grandes vórtices, não é eficiente para o problema em estudo visto o domínio ser de uma tal dimensão que o refinamento exigido levaria a tempos de cálculo e a recursos computacionais inportáveis.

Assim admite-se a hipótese de continuidade espacial e temporal no meio, eliminando-se deste modo os fenómenos cuja escala de grandeza espacial e temporal sejam da magnitude das que caracterizam os movimentos moleculares. As equações que regem os fenómenos aqui estudados são estabelecidas tendo em conta um referencial imóvel (método de Euler).

Como foi evidenciado anteriormente (cálculo do número Reynolds), equação (1.4), o escoamento em estudo apresenta características turbulentas, o que se traduz em flutuações instantâneas, no espaço tridimensional e no tempo, das grandezas que o caracterizam. Embora as escalas características da turbulência sejam muito maiores do que as escalas que caracterizam os fenómenos moleculares, pelo que não colocam em causa a descrição do fluido como meio contínuo, são ainda assim demasiado pequenas para permitir a sua previsão directa através das equações gerais da conservação, sem que para isso seja necessário recorrer a uma discretização excessivamente fina do domínio de cálculo. Neste sentido, esta aplicação do programa utilizado, FDS, recorre as equações do modelo de turbulência LES (Large Eddy Simulation). Este modelo de turbulência caracteriza-se por modelar os processos dissipativos (viscosidade, condutibilidade térmica) que ocorrem em comprimentos de menor escala que aqueles que são explicitamente resolvidos na malha numérica. Isto significa que parâmetros como a viscosidade turbulenta ou difusividade térmica turbulenta não podem ser calculados directamente para a maioria das simulações que se efectua, estes parâmetros têm de ser substituídos por novas expressões que modelem o seu impacte na forma aproximada das equações de transporte. Nas zonas de maiores gradientes, nomeadamente na proximidade das fronteiras sólidas, o programa tem incorporado como condições de fronteira funções que descrevem de forma simplificada a variação das grandezas relevantes nessa zona. A utilização

destas funções permite poupar elementos numa zona onde seria necessário um maior refinamento e assim reduzir o tempo e recursos computacionais necessários ao cálculo.

2.3. Descrição geral do escoamento

2.3.1. Forma geral das equações de transporte

No âmbito da Mecânica dos Fluidos existe um conjunto considerável de modelos físicos que são expressos através de equações diferenciais, formalmente semelhantes entre si, designadas por equações de transporte. Estas equações na sua forma diferencial apresentam a seguinte formulação:

$\frac{D(\Phi)}{Dt} = \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{v}(\rho\phi)$	(2.1)
---	-------

sendo ρ a massa volúmica, \vec{v} a velocidade do escoamento na superfície, Φ uma grandeza extensiva característica do volume material e ϕ a sua correspondente grandeza intensiva. Na equação (2.1) o primeiro membro exprime a variação temporal da grandeza extensiva num volume material; no segundo membro, a primeira parcela exprime a acumulação da grandeza intensiva correspondente ϕ nesse volume material e a segunda parcela exprime o fluxo dessa grandeza intensiva através da superfície de controlo. Esta equação quando apresentada desta forma encontra-se expressa sob a óptica Lagrangeana, ou seja, como tendo o referencial num volume material em movimento. Contudo, esta mesma expressão pode ser expressa na óptica de Euler, ou seja, como tendo um referencial imóvel, da seguinte forma:

$\frac{\partial}{\partial t} \rho\phi + \nabla \cdot (\vec{v}\rho\phi) = \nabla \cdot \vec{\Pi} + \vec{\Sigma}$	(2.2)
---	-------

onde a primeira parcela do primeiro membro exprime a variação local de $\rho\phi$, a segunda parcela corresponde ao seu transporte convectivo; a primeira parcela do segundo membro exprime a acção das forças superficiais ou dos fluxos difusivos e a segunda parcela exprime a acção das forças volúmicas e das fontes ou poços da grandeza.

Deste modo, para que parte dos modelos físicos possam ser expressos como sendo equações de transporte é necessário que, segundo [9]:

- i) Para cada grandeza ϕ seleccionar a força superficial ou o fluxo difusivo apropriado;
- ii) Seleccionar a força volúmica, a fonte ou poços adequado à grandeza;

iii) Modelar os fluxos, as propriedades, fontes e/ou poços através de expressões em termos das principais variáveis do problema ou das suas derivadas;

iv) Simplificar o conjunto de equações resultante através de considerações físicas ou postulados devidamente justificados.

Tendo em conta os requisitos acima mencionados, e partindo da equação 2.2, pode-se obter as equações universais da lei da conservação, sendo estas: (i) Conservação de massa que resulta da aplicação da hipótese da continuidade espacial e temporal da massa; (ii) Conservação da quantidade de movimento que se baseia na aplicação da segunda lei de Newton a um volume de controlo; (iii) Conservação da energia que se baseia na primeira lei da termodinâmica. Contudo, para fechar o sistema de equações é necessário estabelecer relações entre as propriedades do fluido, estas equações são conhecidas como equações de estado.

Estas equações de transporte são utilizadas no algoritmo do programa FDS onde são apresentadas como um conjunto de equações diferenciais, com simplificações e aproximações apropriadas. Neste modelo é utilizada uma forma aproximada das equações de Navier-Stokes indicada para aplicações com um baixo número de Mach, menor que 0,3 (escoamentos incompressíveis). A aproximação envolve a utilização de filtros de modo a evitar os efeitos, no escoamento, de fenómenos ligados à existência de ondas acústicas ao mesmo tempo que permite grandes variações da temperatura e densidade. A computação numérica pode ser resolvida com o modelo DNS (Direct Numerical Simulation), onde os termos dissipativos são calculados directamente ou com o modelo LES (Large Eddy Simulation) onde as grandezas de maior escala são calculados directamente enquanto os fenómenos dissipativos de pequena escala são modelados. O algoritmo numérico é formulado de maneira a que o modelo LES se aproxime do modelo DNS à medida que se aumenta o refinamento da malha. Nas secções seguintes serão apresentadas as equações utilizadas.

2.3.2. Conservação de massa

Assumindo a hipótese da continuidade espacial e temporal da massa, a variação da massa volúmica num volume de controlo é devida ao caudal que atravessa a sua fronteira. Assim, para que haja equilíbrio, a equação de transporte generalizada (2.2) toma a forma indicada na equação 2.3.

$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = \dot{m}_b'''$	(2.3)
--	--------------

onde ρ é a massa volúmica e u é a componente do vector das velocidades do fluido segundo uma determinada direcção.

Nesta equação o primeiro termo representa a variação da massa volúmica no volume de controlo, o segundo termo representa o fluxo de massa que atravessa as fronteiras do volume de controlo para o seu exterior.

2.3.3. Transporte da quantidade de movimento (segunda lei de Newton)

A determinação da equação da conservação da quantidade de movimento baseia-se na aplicação da segunda lei de Newton a um volume de controlo elementar fixo que é atravessado por um fluido.

$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot \rho u u + \nabla p = \rho g + f_b + \nabla \cdot \tau_{ij}$	(2.4)
--	-------

Na equação 2.4, o termo uu é um tensor obtido através da multiplicação (na forma de duas matrizes 3x1) dos vectores u^T e u . O termo $\nabla \cdot \rho u u$ é assim um vector obtido através da

aplicação do vector operador $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ ao tensor. O termo da força f_b , presente na equação, representa a acção das forças superficiais. O tensor das tensões τ_{ij} é definido como:

$\tau_{ij} = \mu \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla \cdot u) \right) \text{ com } \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \text{ e } S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad i, j = 1, 2, 3$	(2.5)
---	-------

onde o termo S_{ij} é o tensor de tensões viscosas, escrito utilizando a notação convencional de tensores. O símbolo μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

2.3.4. Conservação da energia (primeira lei da termodinâmica)

A determinação da equação da conservação da energia baseia-se na aplicação da primeira lei da termodinâmica a um volume de controlo elementar fixo. A equação toma o seguinte aspecto:

$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h u = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \dot{q}'''_b - \nabla \cdot \dot{q}'' + \varepsilon$	(2.6)
--	-------

Na equação da energia, refira-se a utilização da derivada material, $D(\)/Dt = \partial(\)/\partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla(\)$. O termo \dot{q}''' representa a taxa de calor libertado por unidade de volume numa reacção química e o termo \dot{q}_b''' representa a energia transferida por evaporação.

O termo \dot{q}'' representa os fluxos de calor devido à radiação e condução e é dado pela equação:

$\dot{q}'' = -k\nabla T - \sum_{\alpha} h_{\alpha} \rho D_{\alpha} \nabla Y_{\alpha} + \dot{q}_r''$	(2.7)
---	-------

onde k é o coeficiente de condução térmica e T a temperatura.

A entalpia h é função da temperatura e é dada pela equação:

$h = \int_{T_0}^T c_p(T) dT$	(2.8)
------------------------------	-------

O termo ε , presente na equação da energia (equação 2.6), é conhecido como função de dissipação viscosa e representa a taxa de energia mecânica dispendida durante o processo de deformação do fluido devido à viscosidade. É dado pela equação:

$\varepsilon \equiv \tau_{ij} \cdot \nabla \mathbf{u} = \mu \left(2S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \mathbf{u})^2 \right) =$ $= \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right]$	2.9
---	-----

Este termo é normalmente desprezado uma vez que tem um valor bastante pequeno quando comparado com taxa de libertação de calor devido à combustão. No entanto é aqui incluído devido à sua importância no modelo de turbulência (LES).

2.3.5. Equação de estado para gases perfeitos

Nas secções anteriores foram definidas equações de transporte para a conservação de massa, quantidade de movimento e de energia. Destas equações resultaram: uma para a conservação de massa; três para a conservação da quantidade de movimento; e uma para a conservação da energia, perfazendo um total de cinco equações. Para além das equações já referidas o programa utiliza ainda, de modo a fechar o sistema, a equação de estado:

$$p = \frac{\rho \mathfrak{R} T}{W}$$

2.10

onde \mathfrak{R} é a constante dos gases perfeitos e tem o valor de: $\mathfrak{R} = 287 \frac{m^2}{(s^2 K)}$.

Obtém-se assim um sistema de seis equações para seis incógnitas, todas as equações são função das três dimensões espaciais (x,y,z) e do tempo (t) . Constituem incógnitas a densidade ρ , os três componentes da velocidade $u = (u,v,w)$, a temperatura T e a pressão p .

As equações apresentadas anteriormente formam as bases de um grande número de aplicações de engenharia, no entanto para cada campo de aplicações é necessário fazer as respectivas simplificações. Nas equações apresentadas considerou-se:

- fluido como um gás perfeito;
- fluido Newtoniano;
- a condução do calor obedece à lei de Fourier
- a difusão das substâncias gasosa obedece à lei de Fick.

2.4. Turbulência

A turbulência é um fenómeno que está presente em quase todos os escoamentos relevantes para a engenharia, no caso do presente estudo e de acordo com a equação (1.4) o escoamento considera-se turbulento desde o seu início. Geralmente a turbulência é definida como um movimento irregular e caótico do fluido no qual as diferentes grandezas que o caracterizam apresentam uma variação aleatória no tempo e no espaço, dependentes da origem e da configuração do escoamento.

Para contornar as dificuldades inerentes à utilização directa as equações de Navier-Stokes são aplicadas técnicas que, ao contrário da simulação numérica directa, calculam directamente apenas as estruturas turbulentas de maior escala, sendo as restantes modeladas, esquema figura (2.2).

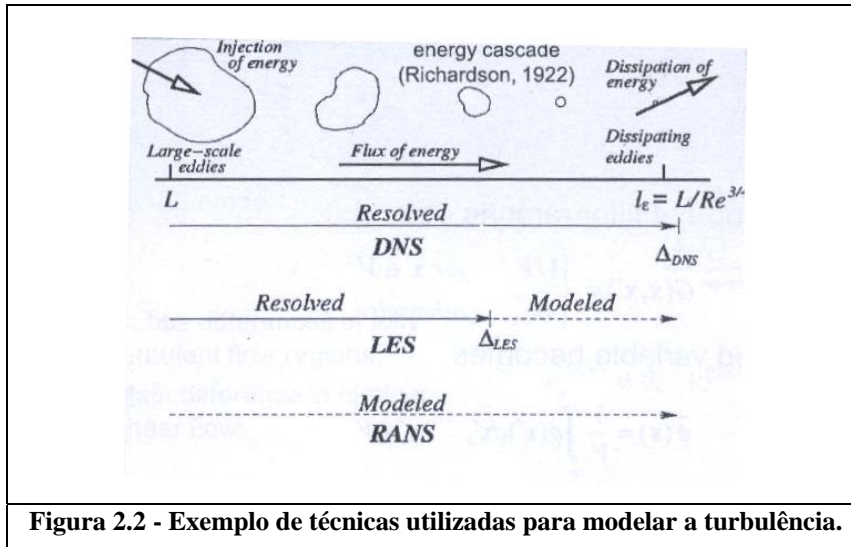


Figura 2.2 - Exemplo de técnicas utilizadas para modelar a turbulência.

Das três principais técnicas utilizadas para simular a turbulência (figura 2.2), o programa computacional utilizado, o FDS, contém apenas duas, o LES (Large Eddy Simulations) e o DNS (Direct Numerical Simulation). Não contém o RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes).

No FDS, de acordo com [10], para os escoamentos turbulentos, como o presente caso de estudo, o programa recorre às equações do modelo de turbulência LES (Large Eddy Simulation). Este modelo de turbulência caracteriza-se por modelar os processos dissipativos (viscosidade, condutibilidade térmica) que ocorrem em comprimentos de menor escala que aqueles que são explicitamente resolvidos na malha numérica. Neste caso, parâmetros como μ_{LES} (viscosidade turbulenta) e k_{LES} (condutibilidade térmica) não podem ser calculados directamente para a maioria das simulações que se efectuam. Estes parâmetros têm de ser substituídos por novas expressões que modelam o seu impacto na forma aproximada das equações de transporte. Assim, a viscosidade turbulenta é, de acordo com Smagorinsky [11], modelada de acordo com a equação:

$\mu_{LES} = \rho (C_s \Delta)^2 \left(2\overline{S_{ij}} \cdot \overline{S_{ij}} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \overline{u})^2 \right)^{\frac{1}{2}}$	(2.11)
---	---------------

onde C_s é uma constante de Smagorinsky (empírica) que toma o valor de 0,2 e Δ uma escala comprimento da ordem de tamanho do elemento da malha. A barra por cima das várias grandezas significa que são valores calculados a partir de uma malha numérica. Os restantes parâmetros difusivos, tais como a condutibilidade térmica, estão relacionados com a turbulência através da equação:

$k_{LES} = \frac{\mu_{LES} c_p}{Pr_t}$	(2.12)
--	--------

O número turbulento de Prandtl, Pr_t , assume-se constante para um dado problema o seu valor é escolhido com base em resultados experimentais.

2.5. Modelo de fase sólida

O FDS assume que uma obstrução sólida consiste numa sobreposição de camadas onde cada uma pode ser formada por vários tipos de materiais. Considera-se que existe condução de calor apenas na direcção normal à superfície. Esta secção descreve as equações de massa e de conservação de energia para materiais sólidos, descreve ainda os vários coeficientes, termos de fonte e condições de fronteira.

2.5.1. Equação de condução do calor para um sólido

É aplicada uma equação de condução de calor uni-dimensional, para a temperatura $T_s(x,t)$ da fase sólida, na direcção x e com o sentido do interior do sólido, sendo que o ponto $x = 0$ representa a superfície

$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} + \dot{q}_s''$	(2.13)
--	--------

2.5.2. Componente média das propriedades térmicas do material

A condutibilidade e a capacidade volumétrica térmica do sólido são definidas como:

$k_s = \sum_{\alpha=1}^{N_m} X_\alpha k_{s,\alpha}$	$\rho_s c_s = \sum_{\alpha=1}^{N_m} \rho_{s,\alpha} c_{s,\alpha}$	(2.14)
---	---	--------

onde, N_m é o número de componentes de material que formam o sólido e $\rho_{s,\alpha}$ é a densidade da respectiva componente definida como:

$\rho_{s,\alpha} = \rho_s Y_\alpha$	(2.15)
-------------------------------------	--------

onde, ρ_s é a densidade do material composto e Y_α é a fracção mássica da componente α do material. A densidade do sólido é a soma das densidades dos componentes:

$\rho_s = \sum_{\alpha=1}^{N_m} \rho_{s,\alpha}$	(2.16)
--	--------

X_α é a fracção volúmica do componente α definida como:

$X_\alpha = \frac{\rho_{s,\alpha}}{\rho_\alpha} \bigg/ \sum_{\alpha=1}^{N_m} \frac{\rho_{s,\alpha}}{\rho_\alpha}$	(2.17)
---	--------

onde ρ_α é a densidade do material α na sua forma mais pura. Sólidos compostos por vários materiais, são definidos especificando a fracção mássica, Y_α , e a densidade, ρ_α , dos vários componentes do composto.

2.5.3. Transmissão de calor por convecção para sólidos

O cálculo do fluxo de calor convectivo depende se está a ser realizado um cálculo com o modelo DNS ou com o modelo LES.

No cálculo no âmbito da aplicação do modelo LES, o fluxo de calor convectivo para a superfície do sólido é obtido pela combinação das convecções forçada e natural:

$\dot{q}_c'' = h\Delta T \quad [W/m^2]$	$h = \max \left[C \Delta T ^{\frac{1}{3}}, \frac{k}{L} 0.037 Re^{\frac{4}{3}} Pr^{\frac{1}{3}} \right] \quad [W/m^2/K]$	(2.18)
---	--	--------

onde ΔT é a diferença entre a temperatura do gás e da parede (tomada no centro do elemento da proximidade da parede), C é o coeficiente para a convecção natural (1,52 para uma superfície horizontal e 1,31 para uma superfície vertical) [12], L é o comprimento característico relacionado com o tamanho da obstrução física, k é a condutibilidade térmica do gás, e o número de Reynolds, Re , e de Prandtl, Pr , são baseados no escoamento do gás na vizinhança da obstrução. Uma vez que o número de Reynolds é directamente proporcional ao comprimento característico, L , o coeficiente de condução de calor está pouco dependente de L . Por esta razão, L é considerado 1 m para a maioria dos cálculos.

2.5.4. Condições de fronteira

A condição de fronteira da superfície frontal, em contacto com o fluido, é dada por:

$-k_s \frac{\partial T_s}{\partial x}(0, t) = \dot{q}_c'' + \dot{q}_r''$	(2.19)
--	--------

Na superfície contrária é possível definir dois tipos de condição fronteira: se a superfície estiver exposta às condições ambiente ou a outro tipo de condições definidas no domínio, a condição fronteira da superfície é idêntica à apresentada anteriormente para a superfície frontal; se a superfície está perfeitamente isolada, é utilizada uma condição fronteira adiabática:

$k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = 0$	(2.20)
---	---------------

2.6. Modelação numérica

Na secção anterior (2.5) foi apresentada a modelação física dos fenómenos estudados. Através desta modelação é possível prever as propriedades do fluido e as características do escoamento através de leis físicas que se apresentam sob a forma de um sistema de equações. No entanto a sua resolução analítica só é possível para um número restrito de fenómenos cujas características permitam a simplificação deste conjunto de expressões. No sentido de ultrapassar esta limitação, é necessário recorrer à resolução numérica dessas expressões da forma adequada.

Para a resolução das equações de transporte o programa recorre ao método das diferenças finitas. Este método consiste na discretização do problema de modo a que os campos de grandezas passem a ser caracterizados por valores pontuais resultantes da discretização do domínio de cálculo. O ponto de partida deste método são as equações de conservação na sua forma diferencial. O domínio de cálculo é definido através de uma malha cartesiana; para cada ponto da malha as equações diferenciais são aproximadas substituindo as derivadas parciais por valores aproximados dos termos das funções em cada nó. O resultado é uma equação algébrica por nó, onde as incógnitas são o valor das variáveis no nó e nos nós dos elementos vizinhos. Para a resolução das equações algébricas são utilizados métodos numéricos variados, que serão apresentados nas secções seguintes.

Se a variação das grandezas não coincide com a assumida na discretização das equações, são gerados erros que podem comprometer o realismo da previsão. Uma forma de contornar esta dificuldade consiste em introduzir um refinamento na malha de maneira a que a forma da variação assumida não difira substancialmente da realidade física, procurando assim reduzir o erro cometido. Torna-se assim evidente que a boa aproximação da solução das equações ao fenómeno físico está intimamente dependente da adequada discretização do domínio de cálculo. Essa discretização depende do conhecimento prévio das leis de variação

das grandezas representativas, que só é verdadeiramente conhecida por via experimental ou através de simulação prévia. Dado que o desenvolvimento deste tipo de ferramentas de cálculo tem por finalidade a previsão dos fenómenos em novas situações insuficientemente caracterizadas por via experimental e difíceis de resolver analiticamente, surge assim o paradoxo de que a solução numérica será mais aproximada das características do escoamento se a discretização do domínio de cálculo tiver em conta precisamente as características desse escoamento, que à partida se desconhecem.

Para ultrapassar esta limitação é sempre possível, quanto mais não seja por analogia, conhecer com alguma aproximação as características gerais do escoamento e seleccionar à priori as zonas em que se deve proceder ao refinamento da malha. Se existirem reais dificuldades no conhecimento prévio das características gerais do escoamento, é, pelo menos, possível proceder à identificação das zonas que carecem de refinamento da malha a partir de uma primeira simulação.

2.6.1. Discretização temporal

Todos os cálculos são iniciados com condições ambiente iniciais. No começo de cada passo de tempo, a densidade, ρ^n , a fracção mássica de cada espécie, Y_α^n , a velocidade, u^n e a componente da pressão numa determinada zona m , \bar{p}_m^n , são conhecidos. Todas as outras grandezas podem ser calculadas através destas. Note-se que o índice $(n+1)$ é referente a uma estimativa do valor das quantidades no passo de tempo $(n+1)$.

As grandezas termodinâmicas ρ , Y_α e \bar{p}_m são estimadas no passo de tempo seguinte com um método de Euler explícito. As variáveis do escoamento são actualizadas no tempo utilizando um método explícito de segunda – ordem com um esquema de previsão e correcção.

Por exemplo, a densidade é estimada através de:

$\rho^{(n+1)e} = \rho^n - \delta t (u^n \cdot \nabla \rho^n + \rho^n \nabla \cdot u^n)$	(2.21)
---	--------

Para a pressão é resolvida uma equação de Poisson. A temperatura é calculada utilizando a densidade e a componente da pressão através da equação de estado.

O passo de tempo é controlado para assegurar que os critérios de estabilidade são cumpridos:

$\delta t \max \left(\frac{ u }{\delta x}, \frac{ v }{\delta y}, \frac{ w }{\delta z} \right) < 1$	$2\delta t v \left(\frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} + \frac{1}{\delta z^2} \right) < 1$	(2.22)
---	---	---------------

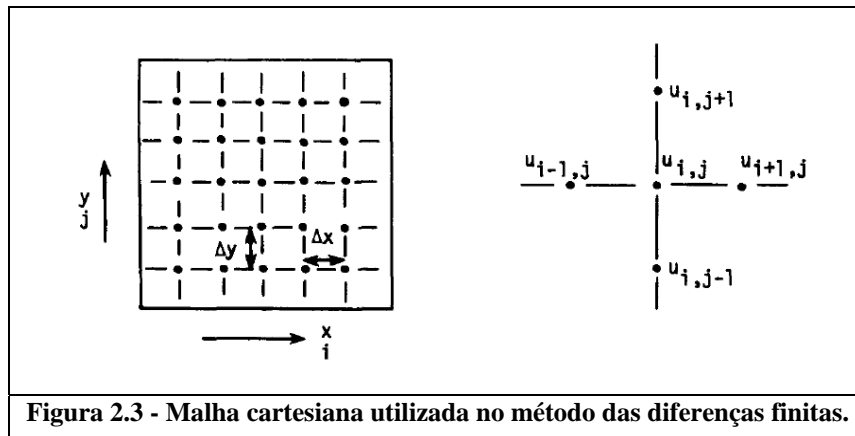
Se o passo de tempo for demasiadamente grande, é reduzido de modo a satisfazer ambos os constrangimentos e o procedimento volta ao início do passo de tempo. Se o passo de tempo satisfizer o critério de estabilidade, o procedimento continua para o passo de correcção. Está assim concluída a fase de previsão do cálculo do passo de tempo.

As grandezas termodinâmicas ρ, Y_α e \bar{p}_m são corrigidas no passo de tempo seguinte. Por exemplo, a densidade é corrigida através de

$\rho^{(n+1)} = \frac{1}{2} \left(\rho^n + \rho^{(n+1)e} - \delta t \left(u^{(n+1)e} \cdot \nabla \rho^{(n+1)e} + \rho^{(n+1)e} \nabla \cdot u^{(n+1)e} \right) \right)$	(2.23)
--	---------------

2.6.2. Discretização espacial

As derivadas espaciais presentes nas equações de estado são escritas como diferenças finitas com uma precisão de segunda ordem numa malha cartesiana (estruturada). O domínio total é um volume rectangular dividido em subdomínios rectangulares. A cada elemento é atribuído um índice ijk representativo da posição que ocupa no domínio total segundo um referencial xyz respectivamente, figura (2.3). As grandezas escalares são calculadas no centro de cada elemento; assim, por exemplo, ρ_{ijk}^n , é a massa volúmica, no passo de tempo n , calculada para o centro do elemento cujos índices são ijk . Grandezas vectoriais como a velocidade são associadas às faces do respectivo elemento (malhas desfasadas relativamente à das grandezas escalares). Por exemplo, u_{ijk}^n , é a componente segundo x da velocidade na face orientada segundo a direcção positiva do elemento ijk ; $u_{i-1,jk}^n$, é definido na face orientada segundo a direcção negativa do mesmo elemento.



2.6.3. Discretização dos termos de transporte difusivos e convectivos

Aos termos convectivos são aplicadas diferenças a montante no passo de previsão e diferenças a jusante no passo de correcção.

Os termos difusivos são aproximados sempre por diferenças centrais; assim, eles são modelados da mesma forma em ambos os passos, previsão e correcção. Por exemplo, o termo da condução térmica é modelado da seguinte forma:

$ \begin{aligned} (\nabla \cdot k \nabla T)_{ijk} = & \frac{1}{\delta x} \left[k_{i+\frac{1}{2},jk} \frac{T_{i+1,jk} - T_{ijk}}{\delta x} - k_{i-\frac{1}{2},jk} \frac{T_{ijk} - T_{i-1,jk}}{\delta x} \right] + \\ & \frac{1}{\delta y} \left[k_{i,j+\frac{1}{2},k} \frac{T_{i,j+1,k} - T_{ijk}}{\delta y} - k_{i,j-\frac{1}{2},k} \frac{T_{ijk} - T_{i,j-1,k}}{\delta y} \right] + \\ & \frac{1}{\delta z} \left[k_{ij,k+\frac{1}{2}} \frac{T_{ij,k+1} - T_{ijk}}{\delta z} - k_{ij,k-\frac{1}{2}} \frac{T_{ijk} - T_{ij,k-1}}{\delta z} \right] \end{aligned} $	(2.24)
---	--------

2.6.4. Termos viscosos (LES)

Para um cálculo utilizando o modelo LES, a viscosidade dinâmica é definida no centro do elemento:

$\mu_{ijk} = \rho_{ijk} (C_s \Delta)^2 S $	(2.25)
---	--------

onde C_s é uma constante empírica, $\Delta = (\delta x \delta y \delta z)^{\frac{1}{3}}$, e

$ S ^2 = 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u})^2$	(2.26)
---	--------

A grandeza $|S|$ consiste em médias de diferenças espaciais de segunda ordem calculadas no centro dos elementos. Por exemplo:

$\frac{\partial u}{\partial x} \approx \frac{u_{ijk} - u_{i-1,jk}}{\delta x_i}$	$\frac{\partial u}{\partial y} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{u_{i,j+1,k} - u_{ijk}}{\delta y_{j+\frac{1}{2}}} + \frac{u_{ijk} - u_{i,j-1,k}}{\delta y_{j-\frac{1}{2}}} \right)$	(2.27)
---	--	--------

A condutibilidade térmica está relacionada com a viscosidade através de:

$k_{ijk} = \frac{c_{p,0} \mu_{ijk}}{Pr_t}$	(2.28)
--	--------

onde Pr_t é o número turbulento de Prandtl que se assume constante. Note-se que o calor específico $C_{p,0}$ está associado à substância dominante da mistura. Com base em estudos com plumas de fumo, considera-se C_s igual a 0,20 e Pr_t igual a 0,5. Não existe nenhuma explicação rigorosa para esta escolha a não ser a comparação com dados experimentais [13].

2.6.5. Condições fronteira para a velocidade numa superfície sólida

Nas fronteiras sólidas, a componente tangencial da velocidade necessita de ser imposta no interior do sólido de modo a estabelecer um gradiente de velocidade para o campo numérico de velocidades. Assumindo que a malha numérica é demasiado esparsa para resolver as condições na camada de fronteira (de espessura nominal d) entre sólido e fluido, e assumindo um perfil de velocidades turbulento dado por:

$U(z) = \begin{cases} U_0 (z/d)^{1/7} & z < d \\ U_0 & z > d \end{cases}$	(2.29)
---	--------

Uma simples condição fronteira de escorregamento pode ser definida de maneira a que:

$u_{ij,0} = u_{ij,1} \left(1 - \frac{d}{\delta z} \right)$	$v_{ij,0} = v_{ij,1} \left(1 - \frac{d}{\delta z} \right)$	(2.30)
---	---	--------

onde δ_z é a altura do elemento. Para malhas esparsas, a condição fronteira é bastante semelhante a uma condição de escorregamento livre uma vez que $d \ll \delta_z$.

2.7. Modelo da fase sólida

2.7.1. Superfície sólida e temperaturas interiores

O cálculo unidimensional da transferência de calor é realizado em cada elemento de fronteira sólida para o qual foram definidas propriedades térmicas. O sólido pode ser constituído por várias camadas de diferentes materiais.

As temperaturas são actualizadas no tempo utilizando um esquema implícito de Crank-Nicolson:

$\frac{T_{s,i}^{n+1} - T_{s,i}^n}{\delta t} = \frac{1}{2(\rho_s c_s)_i \delta x_i} \left(k_{s,i+\frac{1}{2}} \frac{T_{s,i+1}^n - T_{s,i}^n}{\delta x_{s,i+\frac{1}{2}}} - k_{s,i-\frac{1}{2}} \frac{T_{s,i}^n - T_{s,i-1}^n}{\delta x_{s,i-\frac{1}{2}}} + k_{s,i+\frac{1}{2}} \frac{T_{s,i+1}^{n+1} - T_{s,i}^{n+1}}{\delta x_{i+\frac{1}{2}}} - k_{s,i-\frac{1}{2}} \frac{T_{s,i}^{n+1} - T_{s,i-1}^{n+1}}{\delta x_{i-\frac{1}{2}}} \right)$	2.31
--	-------------

A condição de fronteira é discretizada como:

$-k_{s,1} \frac{T_{s,1}^{n+1} - T_{s,0}^{n+1}}{\delta x_{\frac{1}{2}}} = \dot{q}_c^{n(n+1)} + \dot{q}_r^{n(n+1)}$	(2.32)
---	---------------

Os fluxos radiativos e convectivos no passo de tempo seguinte são aproximados através das equações:

$\dot{q}_c^{n(n+1)} \approx \dot{q}_c^{nn} - h \left(T_{s,\frac{1}{2}}^{n+1} - T_{s,\frac{1}{2}}^n \right)$	$\dot{q}_r^{n(n+1)} \approx \dot{q}_r^{nn} - 4\varepsilon\sigma T_{s,\frac{1}{2}}^{n3} \left(T_{s,\frac{1}{2}}^{n+1} - T_{s,\frac{1}{2}}^n \right)$	(2.33)
--	--	---------------

A temperatura da parede é definida como:

$T_w \equiv T_{s,\frac{1}{2}} = (T_{s,0} + T_{s,1})/2$	(2.34)
--	---------------

2.7.2. Transferência de calor por convecção para um objecto sólido

Num cálculo através do modelo LES, onde a condição de fronteira não é resolvida, é utilizado um coeficiente empírico para a transferência de calor h (coeficiente de convecção):

$\dot{q}_c'' = -h(T_{gas} - T_w) \quad \text{W/m}^2$	(2.35)
--	---------------

O coeficiente de convecção, h , é o máximo dos seus valores para convecção natural e forçada:

$h = \max \left(C T_{gas} - T_w ^{\frac{1}{3}}, \frac{k_{ar}}{L} 0.037 \text{Re}_L^{4/5} \text{Pr}^{1/3} \right) \quad \text{W/m}^2/\text{K}$	(2.36)
---	---------------

onde C é um coeficiente empírico (1,31 para superfícies verticais; 1,52 para superfícies horizontais), k_{ar} é a condutibilidade térmica do ar (não é o valor turbulento utilizado no esquema de resolução do LES), L é o comprimento de escala (assume-se igual a 1 m), o número de Reynolds é baseado na massa volúmica, na velocidade do fluido no meio do primeiro elemento da malha e do comprimento de escala L , o número de Prandtl assume-se igual a 0,7.

3. Análise do escoamento no interior da conduta – Modelação Numérica

3.1. Generalidades

Durante o desenvolvimento da tese foram realizados vários estudos, envolvendo diferentes tipos de geometria e condições fronteira, de modo a obter no final um escoamento o mais próximo possível do real. Os vários resultados obtidos foram comparados entre si, de modo a ser possível compreender as influências das alterações no escoamento simulado. Estas alterações foram introduzidas segundo as informações adquiridas nas várias inspecções a bordo do navio, sendo que o levantamento das características não foi feito de um modo contínuo e imediato, uma vez que as acções de reabilitação da conduta restringiram o acesso às várias zonas da mesma.

Para modelar numericamente o escoamento no interior da conduta foi utilizado um pacote de *software* livre que contém o Fire Dynamics Simulator (FDS), cujas características foram referidas anteriormente no [capítulo \(2\)](#) e o Smokeview, um programa que permite a visualização e tratamento gráfico dos resultados obtidos através do FDS. Mais informações sobre as capacidades e características destes softwares estão disponíveis em [\[14\]](#).

Nos pontos seguintes serão apresentadas algumas considerações necessárias para entender o modo de funcionamento do programa e a maneira como é feita a modelação no FDS. Neste programa todos os parâmetros de “input” necessários para descrever um cenário particular são introduzidos via um ficheiro de texto criado pelo utilizador. O ficheiro contém informação acerca do domínio numérico, condições ambiente, geometria, propriedades do material e as grandezas desejadas no ficheiro de “output”. O domínio consiste numa ou mais malhas rectilíneas com elementos uniformes (malha estruturada). Todas as entidades geométricas do domínio devem estar relacionadas com a malha definida. Os objectos menores que o tamanho de um elemento são aproximados ao tamanho desse elemento ou rejeitados. As geometrias sólidas são introduzidas como uma série de blocos rectangulares. As condições fronteira são aplicadas às superfícies sólidas como domínios rectangulares. Os materiais são definidos através da sua condutividade térmica, calor específico, densidade e espessura. Existem várias formas de compilar esta informação dependendo do nível de detalhe desejado.

3.2. Pormenores construtivos

3.2.1. Malha

A fase inicial da construção do modelo numérico é a criação do domínio de cálculo e respectiva malha onde vão ser definidas todas as outras entidades necessárias para a simulação, geometrias e condições fronteira.

A geometria e a malha, mais que em muitos programas de CFD, no FDS são extremamente dependentes entre si. Daí a necessidade de se referirem pormenores relativos à construção da geometria quando se aborda o tema da construção da malha.

A definição do domínio de cálculo no FDS é feita através da linha de comandos MESH. A malha é construída através de dois parâmetros:

- XB – que define as dimensões em x, y e z da malha (o sistema de coordenadas está de acordo com a regra da mão direita);
- IJK – que define o número de divisões uniformes da malha.

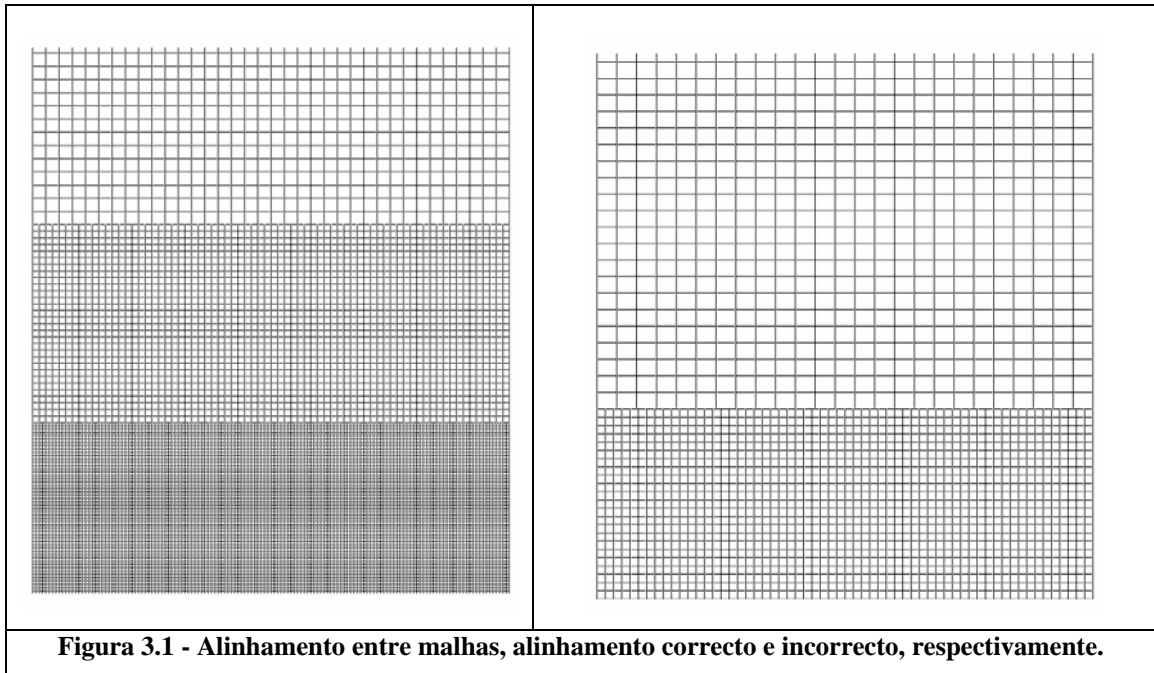
Uma vez que uma parte importante do cálculo utiliza um esquema de resolução de Poisson baseado nas transformadas de Fourier segundo as direcções y e z , a segunda e terceira dimensão da malha devem ser da forma $2^l 3^m 5^n$, onde l, m e n são inteiros.

Os cálculos iniciais foram feitos com uma malha esparsa de modo a que o tempo de cálculo seja menor que uma hora e as correcções possam ser feitas sem gastar demasiado tempo. À medida que a programação se foi tornando mais familiar, o caso em estudo foi corrido várias vezes e aumentou-se a complexidade do ficheiro de “input” de acordo com o estudo final pretendido.

De modo a evitar o aparecimento de erros numéricos que impossibilitem o cálculo de resultados para o escoamento pretendido, existem algumas regras a ter em consideração durante a fase da construção da malha:

- Ao criar um domínio com várias malhas garantir que os elementos na zona da interface entre malhas têm a mesma área de secção, ou que estão alinhadas, [figura 3.1](#);
- Evitar colocar zonas de interface entre malhas em locais do escoamento onde é expectável haver acções críticas, isto porque a troca de informações entre malhas através da fronteira não tem a mesma precisão que a troca entre elementos da mesma malha;
- Se houver uma obstrução na zona de interface entre duas malhas há que garantir que ambas as malhas reconhecem a obstrução. Se esta estiver deslocada o mínimo que seja

de uma das malhas, essa malha não vai contabilizar os efeitos dessa obstrução no escoamento e a informação entre malhas vai ser transferida da forma errada.

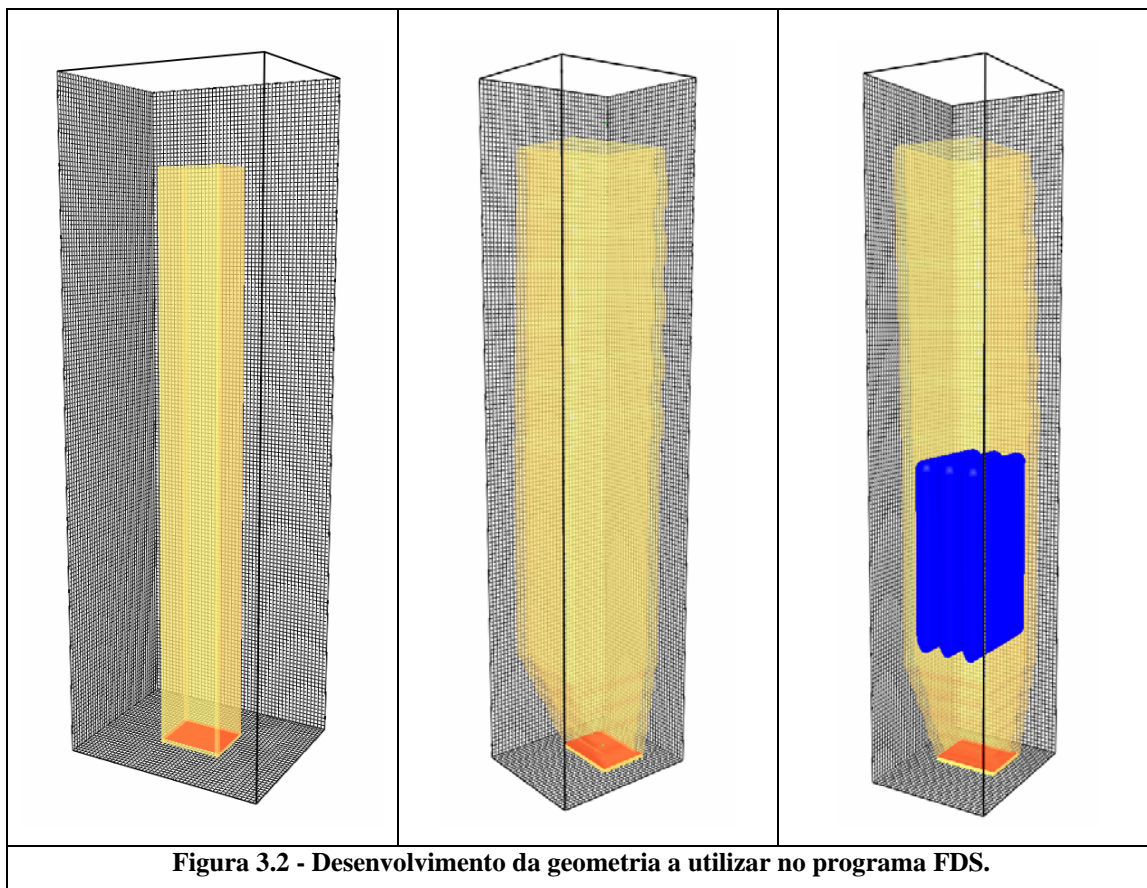


A escolha do grau de refinamento da malha depende consideravelmente do propósito da simulação, sendo que o procedimento mais corrente é criar inicialmente uma malha mais esparsa e gradualmente refiná-la até não se obter nenhuma diferença apreciável nos resultados obtidos entre malhas. Este procedimento é referido como estudo de sensibilidade da malha.

Para cada geometria criada serão apresentadas as respectivas malhas utilizadas nas simulações realizadas.

3.2.2. Geometria

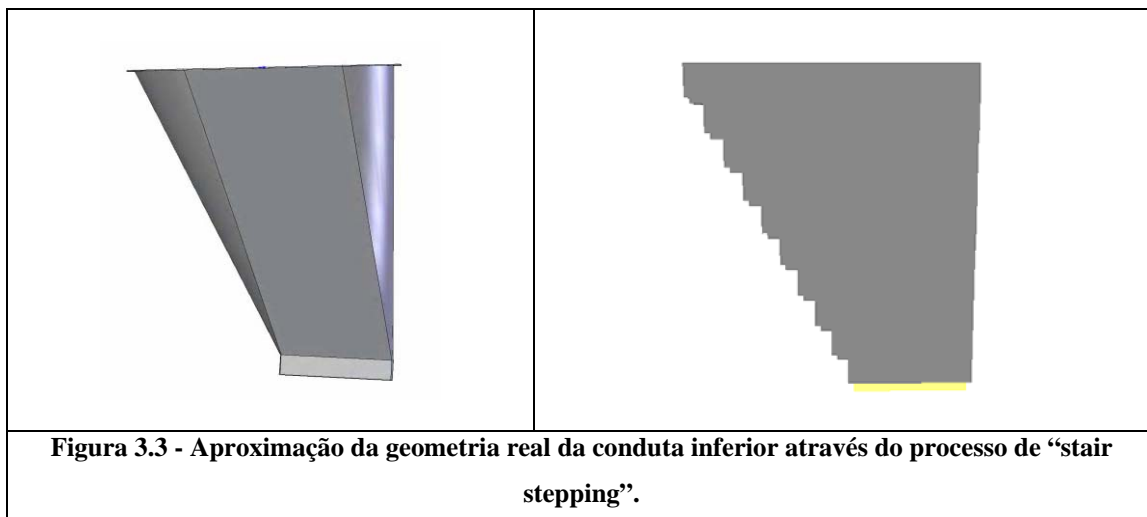
A geometria da conduta em estudo foi construída por fases crescentes de complexidade a partir de um ficheiro demonstrativo do programa utilizado, de modo a garantir que as instruções principais do corpo do programa de “input” estavam correctas. A geometria da conduta foi sendo actualizada à medida que foram realizadas visitas ao navio e adquiridos dados mais concretos relativos à geometria real, na [figura \(3.2\)](#) estão representadas algumas fases da evolução da modelação da geometria da conduta.



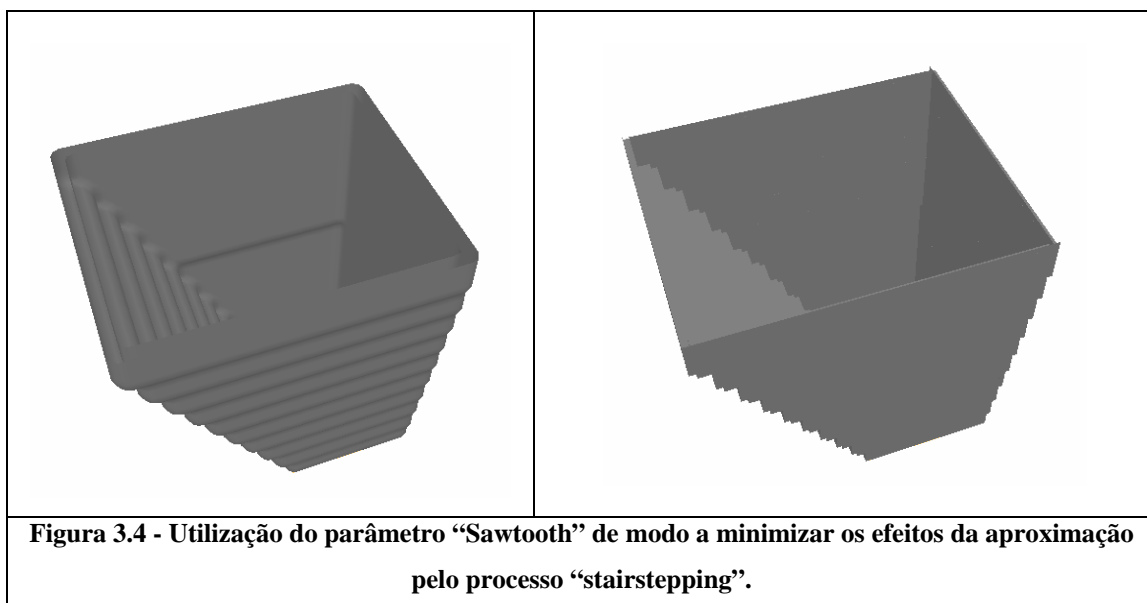
De modo a que seja possível compreender o ficheiro de “input”, disponível em anexo, é descrito sucintamente, de seguida, qual o grupo de comandos e os parâmetros utilizados e quais as considerações a ter em conta no processo de modelação geométrica.

No grupo de comandos OBST, cada linha relativa a uma obstrução contém as coordenadas de um sólido rectangular situado no interior do domínio de cálculo. O sólido é definido por dois pontos (x_1, y_1, z_1) e (x_2, y_2, z_2) , e estes dois pontos definem os vértices opostos da geometria rectangular.

Uma parte considerável do tempo de preparação de uma simulação numérica é gasto na especificação da geometria do espaço a ser computado e na definição das condições fronteira deste espaço. A geometria é definida através de obstruções rectangulares que podem estar associadas a condições de aquecimento, poder calorífico, condução de calor ou podem também estar associadas a aberturas onde o ar ou um combustível pode ser injectado ou escoado do domínio de cálculo. No entanto existem vários casos de estudo cujas geometrias não se adaptam a malhas rectangulares, é o caso de paredes inclinadas como as da conduta. Nestes casos a geometria curva é construída utilizando obstruções sólidas num processo de aproximação chamado “stair stepping”, o declive da geometria é construído através da sobreposição de sólidos rectangulares ([figura 3.3](#)).



No entanto, esta aproximação introduz mudanças no escoamento sobretudo nas zonas próximas da parede. De maneira a minimizar o impacto desta aproximação é utilizado o parâmetro “Sawtooth” em cada linha de comando referente a cada obstrução da zona inclinada que é aproximada. O efeito deste parâmetro é prevenir o aparecimento de vórtices nos cantos aguçados. Na realidade este parâmetro arredonda os cantos que constituem as obstruções da zona de inclinada, ver [figura 3.4](#).



Esta não é uma solução completa para o problema, mas permite de uma maneira simples garantir que o escoamento na zona próxima de uma obstrução não rectangular não é afectado por um arrastamento extra criado devido à existência de vértices nas zonas de geometria aproximada.

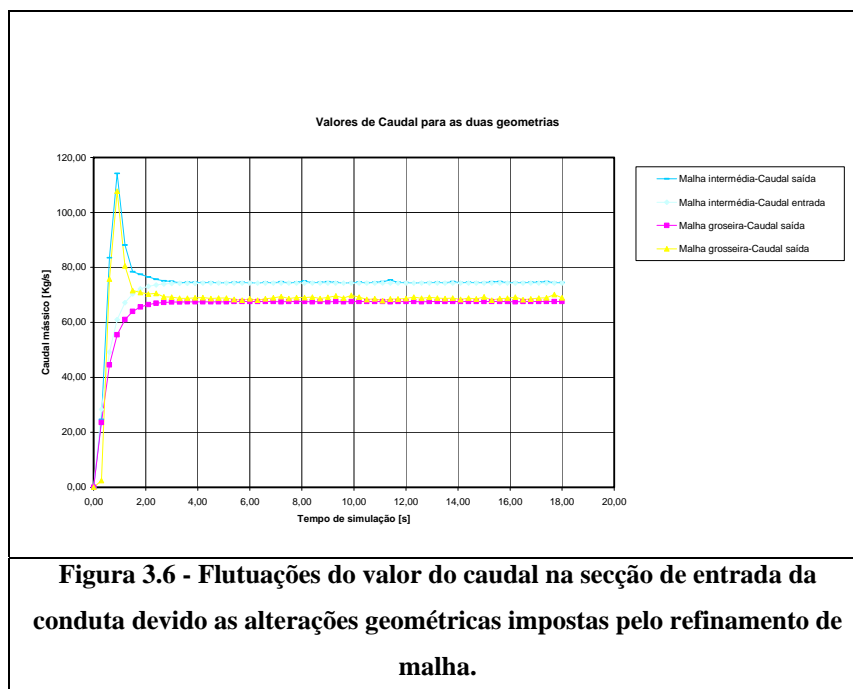
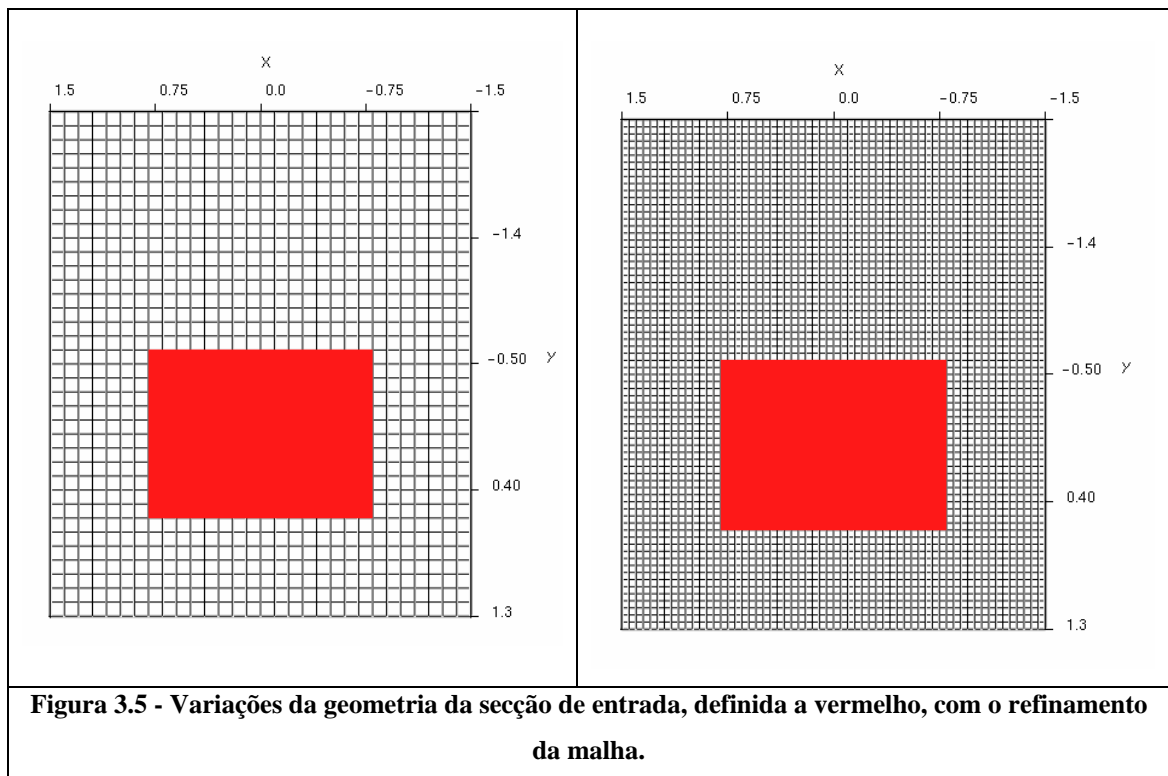
3.3. Definições das condições de fronteira

Na secção (1.5.2) desta tese já foram referidas algumas das condições fronteiras que necessitam de ser impostas no modelo numérico. Nos próximos pontos será referido o modo como foram impostas as condições de fronteira. Embora tenham sido utilizadas várias geometrias durante este estudo, o modo como foram introduzidas as condições fronteiras são semelhantes em todos os modelos, variando apenas a posição e valores introduzidos. Em todos os estudos realizados foram utilizadas as mesmas condições de fronteira na saída e nas fronteiras do domínio.

Posteriormente serão apresentados os valores utilizados em cada uma das geometrias utilizadas.

3.3.1. Condições de fronteira à entrada

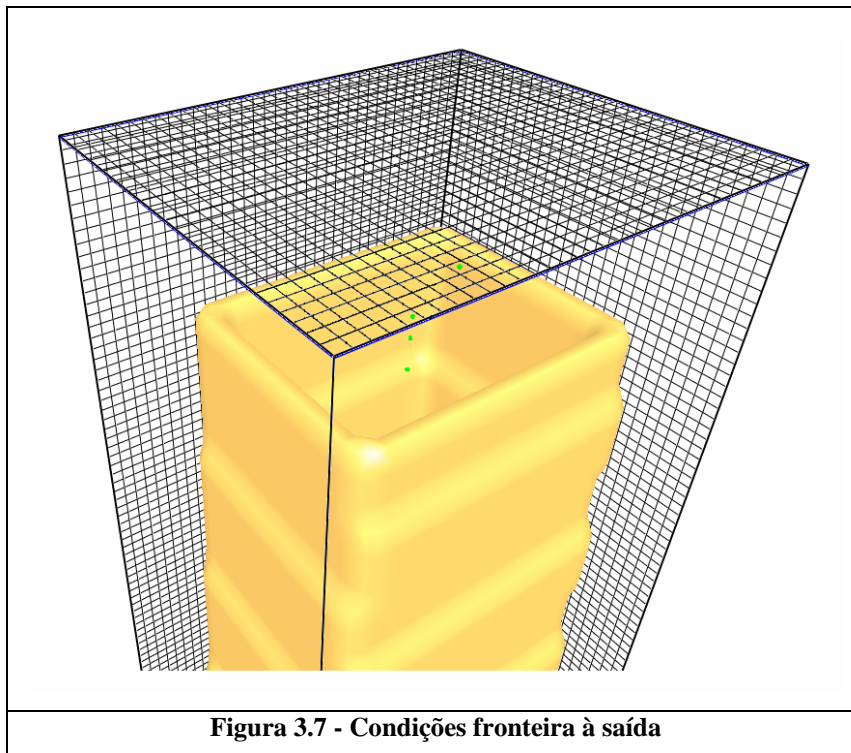
Para a maioria das aplicações, os sistemas de ventilação são descritos no FDS utilizando uma condição de velocidade nas condições fronteira. Por exemplo, ar novo pode ser introduzido ou retirado de um compartimento especificando uma velocidade na direcção normal de uma superfície sólida. A maneira mais simples de descrever uma entrada ou saída de ar é criando uma condição VENT numa superfície sólida e associar-lhe uma condição de superfície SURF_ID de modo a especificar a velocidade e temperatura. O valor pretendido para o caudal, introduzido através de uma condição de velocidade numa dada secção, pode sofrer ligeiras flutuações, dependendo do refinamento da malha e do alinhamento das obstruções com esta mesma malha, figuras 3.5 e 3.6.



3.3.2. Condições fronteira à saída

De modo a simular a zona de saída dos gases da conduta foi criada uma expansão da malha para o exterior, [figura 3.7](#). Na zona acima da conduta são impostas condições iniciais de pressão relativa e temperatura iguais a 0 Pa e 20°C, respectivamente; todavia estes valores não foram especificados no ficheiro de “input” uma vez que são os valores considerados por

defeito pelo programa utilizado na modelação. Uma vez que esta condição é utilizada em todas as simulações realizadas, para as várias geometrias apresentadas nos próximos capítulos, não é feita mais nenhuma referência durante os restantes capítulos da tese apresentada.



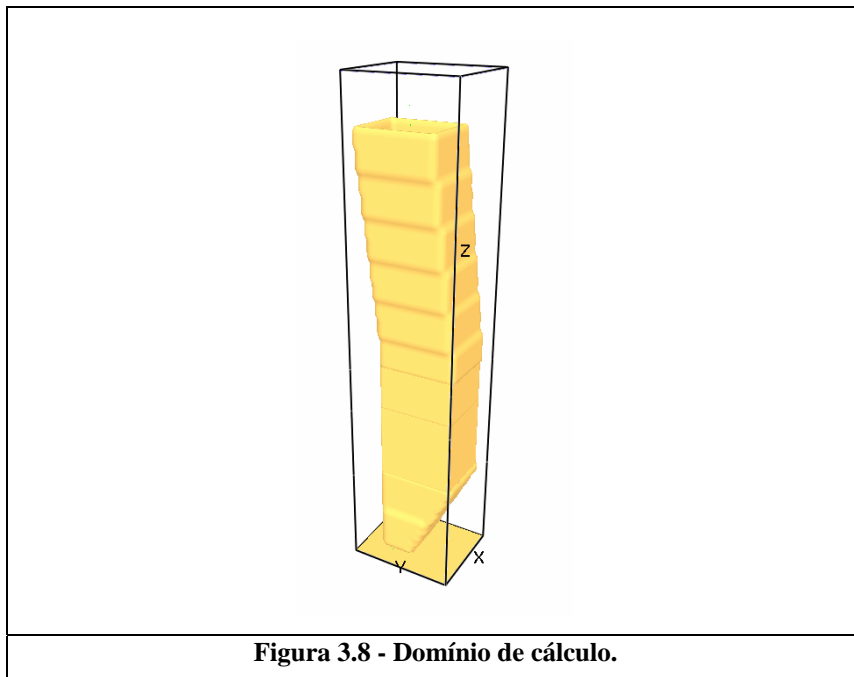
3.3.3. Condições fronteira nas paredes

As condições fronteira nas paredes da conduta foi um dos parâmetros que variou nas várias geometrias utilizadas durante o estudo. Num primeiro desenvolvimento, como será referido na secção (4.3), não foi dada grande relevância quer à espessura da parede, quer aos diferentes materiais que a constituem, dado que na altura em que se realizaram as simulações não existiam dados detalhados para caracterizar estas propriedades. Nos estudos seguintes e após uma vistoria ao navio onde foi possível fazer um levantamento destas características, foram introduzidas nas simulações as espessuras e propriedades físicas de cada material constituinte da conduta (chapa, isolamento, chapa). Em todas as simulações realizadas considerou-se que a parede tem uma temperatura inicial de 20°C.

No ficheiro de programação, utilizado pelo FDS, estas propriedades são definidas através da linha de comandos MATL onde foram atribuídos valores à condutibilidade, calor específico e densidade de cada um dos materiais.

3.3.4. Condições fronteira do domínio

De modo a considerar os efeitos do arrastamento provocados pelo escoamento dos produtos da combustão à saída da conduta, considerou-se o domínio de cálculo para além das paredes da conduta. Assim, definiu-se o domínio de cálculo como sendo um volume rectangular, [figura 3.8](#) e nos limites do domínio foi definida uma condição de OPEN VENT. Esta condição foi aplicada à fronteira com o exterior do domínio computacional, e simula uma abertura/ligação para o exterior. Noutras ferramentas CFD esta condição é imposta através de um estiramento progressivo da malha.



3.3.5. Condições iniciais do fluido

Em vez dos produtos da combustão que derivam da queima de uma mistura combustível, e atendendo ao referido na [secção \(1.5.2\)](#), considerou-se que tanto o fluido proveniente do interior da conduta como o existente no resto do domínio de cálculo têm as características do ar. Esta aproximação permitiu ainda que fosse desprezado o efeito da radiação no escoamento simulado, reduzindo em 20% o tempo de cálculo.

No início do cálculo, todo o ar existente tanto nas zonas circundantes da conduta como no seu interior tem as propriedades do ar ambiente.

3.4. Estimativa analítica

De modo a ter uma noção sobre quais os valores esperados e analisando todo o modelo geométrico da conduta, verifica-se que, em regime estacionário, não existem muitos

elementos que possam efectuar a dissipação da energia térmica contida no escoamento e, tendo em conta as condições impostas para a velocidade e temperatura à entrada, estima-se que à saída a temperatura seja ligeiramente inferior à temperatura de entrada (500°C). Deste modo, através da equação (3.1) e aplicando-se a massa específica do ar à temperatura de entrada e para uma secção de passagem de $4,34 m^2$, obteve-se uma velocidade de aproximadamente:

$V = \frac{68}{0,457 \times 4,34} \cong 34,2 \text{ m/s}$	3.1
---	------------

Este deverá ser o valor médio esperado para a velocidade de saída dos produtos da combustão. Com a determinação desta velocidade de saída, é expectável que a pressão dinâmica do fluido na mesma secção seja de aproximadamente:

$\Delta p = \frac{1}{2} \times 0,457 \times 34,2^2 \cong 268,6 \text{ Pa}$	3.2
--	------------

4. 1º Geometria

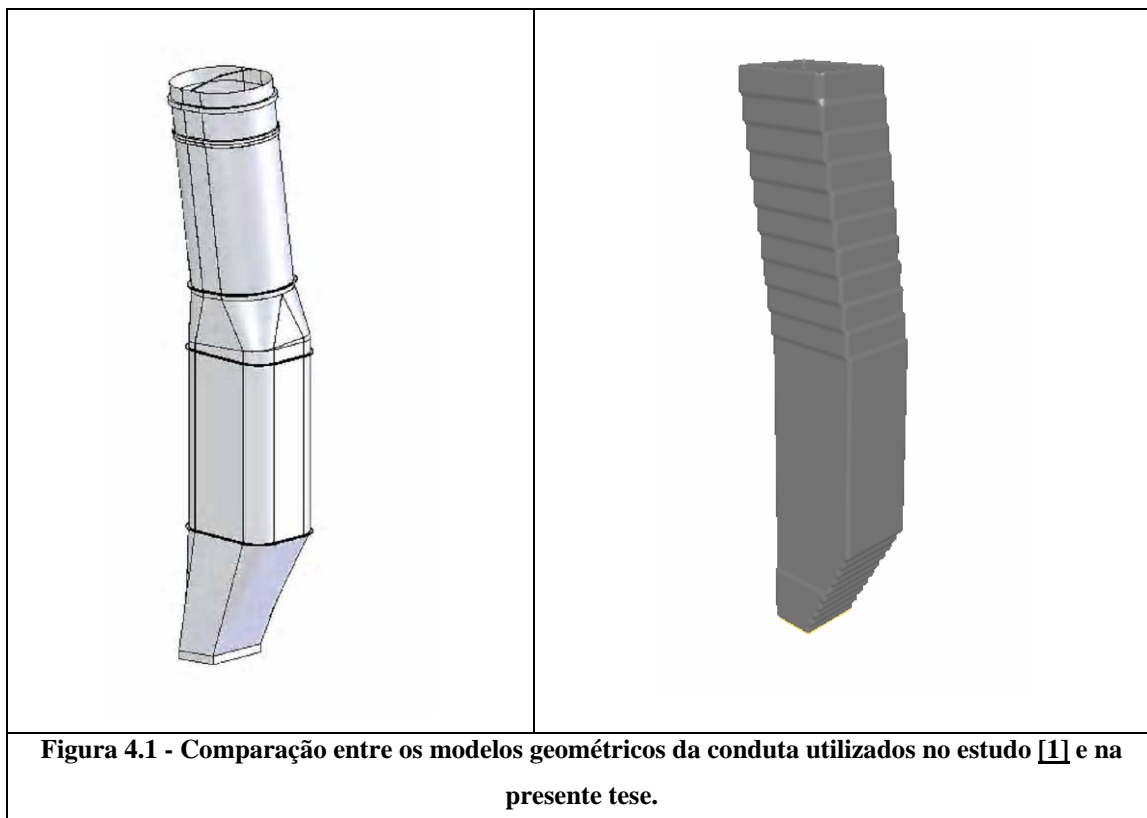
Neste capítulo são apresentados os estudos realizados numa fase inicial desta tese. A geometria modelada tem algumas simplificações em relação ao modelo físico. Estas simplificações foram sendo eliminadas à medida que, através de visitas ao navio, foi possível adquirir dados mais concretos. A geometria e condições iniciais utilizadas nesta etapa são as mesmas utilizadas em [1]. Como tal, foi possível, através da comparação dos resultados e na falta de resultados experimentais, aferir quanto à concordância dos resultados obtidos com o FDS com os obtidos em estudos anteriores, [2] e [8], e assim validar o programa para que este pudesse ser utilizado nos estudos realizados posteriormente e apresentados nos capítulos seguintes desta tese. Como resultado desta fase inicial do estudo foi elaborado uma publicação em congresso [15].

Nesta secção serão apresentadas a geometria, as condições fronteira, as malhas, e o estudo de sensibilidade realizados. No final serão comparados os resultados com os obtidos em estudos anteriores [2] e [8].

4.1. Geometria

Atendendo ao modo como é construído o modelo geométrico no FDS, secção (3.2.2), foi criada uma geometria próxima da geometria real. Na figura (4.1) é possível identificar as aproximações entre geometrias.

Na geometria criada foram respeitadas as dimensões das secções de entrada e saída de fluido bem como os declives totais das paredes da conduta e a altura desta.



4.2. Condições fronteira entrada

Atendendo ao modo como são impostas as condições fronteira no FDS, secção (3.3), foram definidas, para a secção de entrada da conduta, condições de temperatura e velocidade iguais a 500°C e 85 m/s respectivamente. Estes valores estão de acordo com os dados fornecidos e com os cálculos analíticos efectuados na secção (1.5.2).

Na secção de entrada dos gases é desconhecido o perfil de velocidades. Assim, para as simulações será admitido um perfil de velocidades uniforme em toda a secção. É possível verificar a validade da implementação das condições de fronteira na entrada através da figura 4.2, os perfis de velocidades e temperatura na entrada identificam claramente as zonas exteriores à conduta bem como as zonas que definem o início da parede da conduta, onde a velocidade toma o valor de zero e a temperatura o valor da temperatura ambiente definida nas condições iniciais (20°C).

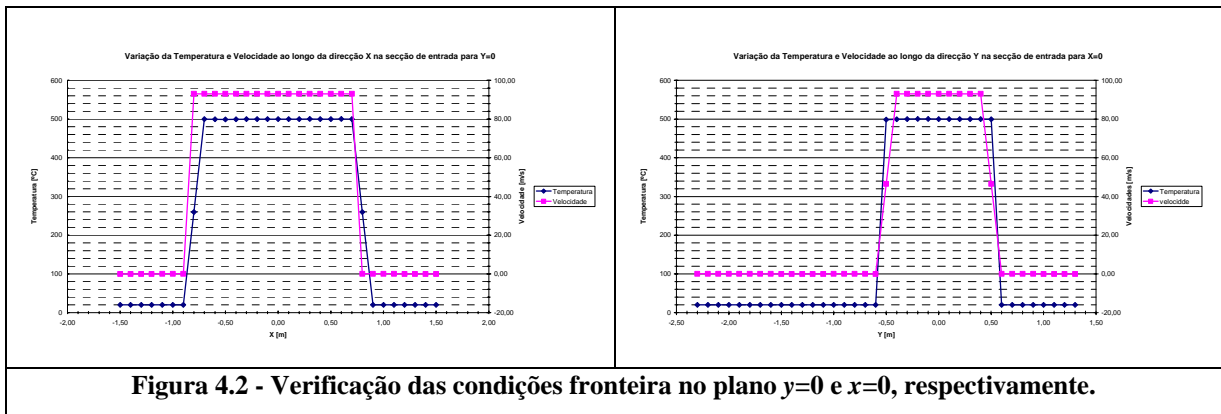


Figura 4.2 - Verificação das condições fronteira no plano $y=0$ e $x=0$, respectivamente.

4.3. Condições fronteira nas paredes

Nesta primeira fase do estudo, onde não são utilizados dados provenientes de medições experimentais, apenas se pretende conhecer os campos de velocidade, pressão e temperaturas no interior da conduta. Assim, a espessura real da parede e do isolamento, assim como a sua constituição, foram aproximados por uma espessura passível de ser analisada com a ferramenta FDS, tendo em conta as implicações já mencionadas do tamanho dos elementos da malha utilizada. Foi também considerado que a parede tem uma temperatura constante de 20°C durante o regime estacionário.

Os efeitos desta simplificação apenas implicam alterações no estudo da transmissão de calor ao longo da parede e dos efeitos da recirculação dos produtos da combustão no topo da conduta.

As condições definidas para a parede são iguais às condições definidas para os atenuadores acústicos, e são as condições assumidas por defeito pelo FDS para um elemento sólido e que consideram a perda de calor através desse mesmo elemento sólido.

4.4. Malhas utilizadas para o estudo

Como já foi anteriormente mencionado na [secção \(2.6.2\)](#), para o estudo foram utilizadas malhas cartesianas regulares. Assim, para a obtenção da solução final do problema, estas malhas foram refinadas na sua totalidade ou apenas em zonas específicas do domínio de cálculo, tendo estas alterações originado sempre o acréscimo do número de volumes elementares.

No estudo apresentado foram criadas três malhas. As duas primeiras malhas são malhas uniformes em que os elementos de todo o domínio têm dimensões iguais em todas as direcções (x , y , z) e têm respectivamente 100 e 50 mm de comprimento. Na última malha apresentada, existe um refinamento local nas zona dos atenuadores acústicos, zona onde

existem maiores gradientes e consequentemente maior necessidade de refinamento. Em todos os estudos foi verificada a condição da conservação de massa, de modo a assegurar que a geometria está correctamente definida e não existem fugas do interior para o exterior da conduta. De seguida são apresentadas as características das malhas utilizadas.

4.4.1. Malha grosseira

Como já foi referido anteriormente, o tamanho dos elementos da malha condiciona a geometria definida pelo FDS. No caso da malha grosseira, cujos elementos têm 100x100x100 mm de comprimento segundo todas as direcções, a menor dimensão considerada na geometria são os 100 mm. Esta característica do programa pode introduzir alguns problemas concretamente nas zonas com geometrias de menores dimensões, como no caso dos atenuadores acústicos, ver [figura 4.3](#). É possível verificar a existência de uma assimetria no bordo de ataque dos atenuadores acústicos, esta assimetria é resultado da aproximação geométrica devido ao tamanho dos elementos da malha.

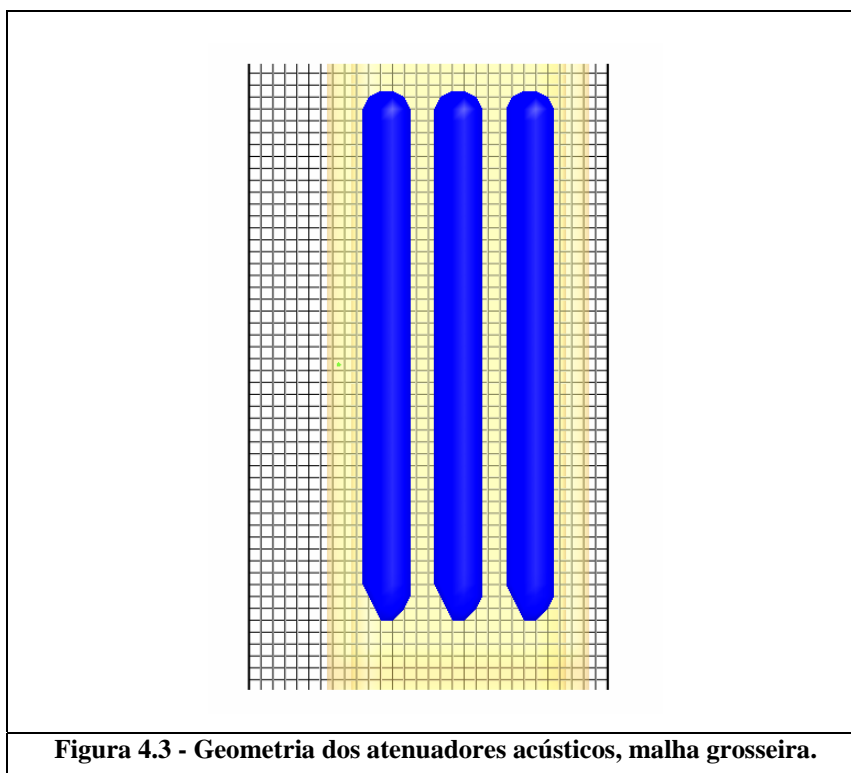
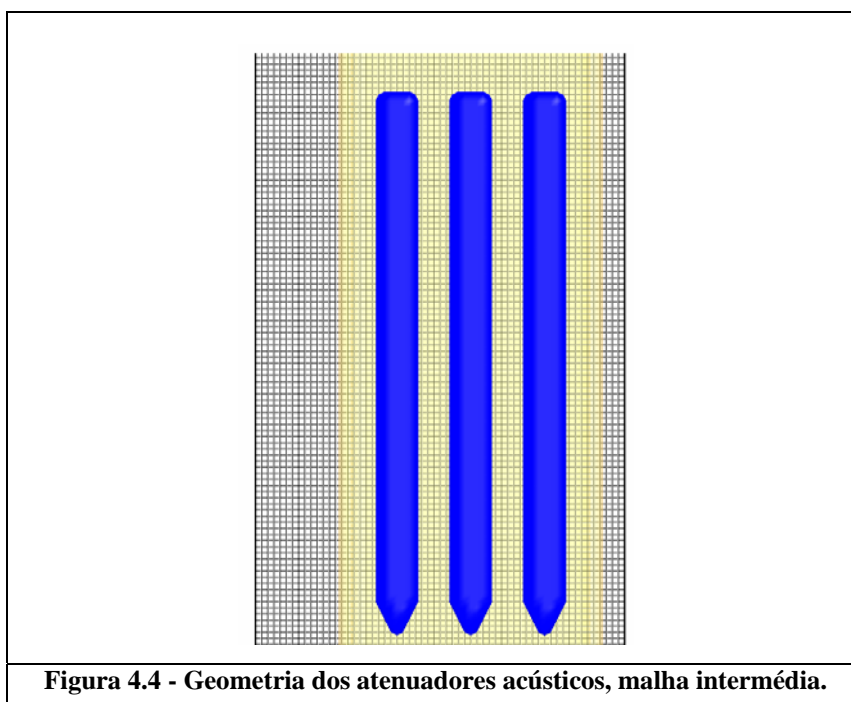


Figura 4.3 - Geometria dos atenuadores acústicos, malha grosseira.

4.4.2. Malha intermédia

À semelhança da malha grosseira, esta malha também é formada por elementos todos com a mesma dimensão, neste caso 50x50x50 mm segundo todas as direcções. Uma vez que os elementos que formam a malha são de menores dimensões, a geometria da conduta sofre

algumas alterações, ver [figura 4.4](#). É possível verificar que, com o refinamento da malha, a assimetria existente na zona dos atenuadores acústicos, para a malha grosseira, foi corrigida.

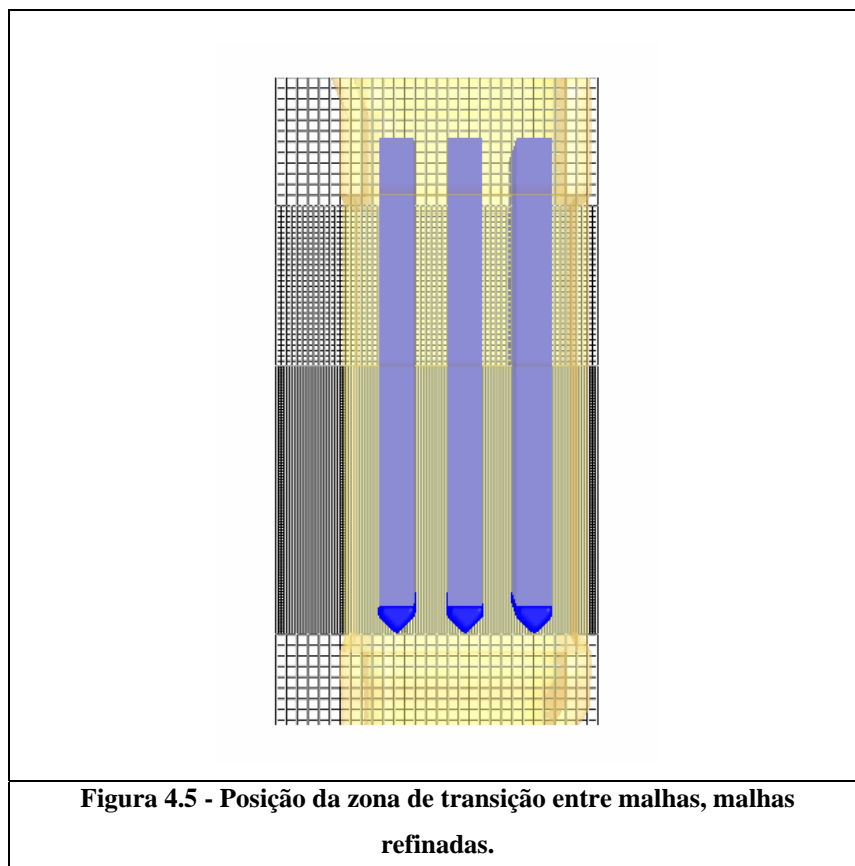


4.4.3. Malha refinada

Ao introduzir um refinamento local pretendeu-se que os resultados obtidos estivessem o mais perto possível da convergência. A convergência poderia ser facilmente conseguida com uma malha uniforme onde os elementos tivessem uma dimensão de 25x25x25 mm de comprimento segundo todas as direcções. Esta solução não é possível uma vez que num domínio com as dimensões apresentadas teríamos um número de elementos na ordem dos vários milhões o que tornaria o tempo de cálculo e requisitos computacionais necessários incomportáveis. Desta forma optou-se por um refinamento local da malha. Através da análise das características do escoamento e com o auxílio do ficheiro de saída criado pelo FDS (.out) é possível localizar os elementos com um pior desempenho. Assim nas zonas onde o escoamento apresenta maiores gradientes e onde as malhas anteriores tiveram pior desempenho, zona na proximidade dos atenuadores acústicos, introduziu-se um refinamento local com uma malha de elementos cúbicos com 25 mm de comprimento seguido de outras duas zonas com elementos de 50 e 100mm.

Para introduzir o refinamento local da malha é necessário ter em conta algumas características do funcionamento do programa. Como já foi referido anteriormente, a zona de transição de malhas não deve estar situada junto ao bordo de ataque dos atenuadores acústicos de modo a que ambas as malhas contabilizem os efeitos da obstrução e a informação não seja

transferida entre malhas de forma errada. A transição entre malhas introduz alterações na geometria devido às alterações da dimensão dos elementos, estas alterações podem levar a resultados menos exactos. Assim, e após alguns estudos onde se fez variar a posição das zonas de transição, optou-se por situar a zona de transição abaixo dos atenuadores acústicos, entre a malha com elementos de 100x100x100 mm e de 25x25x25 mm, a 175 mm do bordo de ataque dos atenuadores acústicos. A zona de transição entre as malhas de 25x25x25 mm e 50x50x50 mm aproximadamente a meio dos atenuadores acústicos. E a zona de transição entre as malhas de 50x50x50 mm e 100x100x100 mm abaixo do final dos atenuadores acústicos, ver [figura 4.5](#).



4.4.4. Refinamento da malha

No [quadro \(4.1\)](#) estão evidenciadas as alterações, que resultam dos sucessivos refinamentos, ao nível do número e dimensão dos elementos, número de iterações e tempo de cálculo.

Não foram realizados mais refinamentos, uma vez que na malha refinada são utilizados cerca de 2 milhões de elementos. Este valor encontra-se muito próximo dos limites das capacidades computacionais não sendo por isso possível aumentar o refinamento. Do mesmo modo, o aumento do número de elementos levaria ao aumento do tempo de cálculo, que já é muito elevado e que torna complexa a utilização deste tipo de modelos no estudo

pretendido. Apesar destas limitações, os resultados obtidos mostram que, com o aumento do número de volumes elementares, conseguiu-se que as grandezas, velocidade, pressão e temperatura, convergissem para valores próximos dos valores calculados na secção (3.4), no caso da velocidade e pressão, e referidos pela Marinha Portuguesa no caso da temperatura, secção (1.5.2). Embora não seja evidenciado, foram realizados estudos onde foi mantido o número aproximado de elementos da malha refinada e onde apenas se modificou a posição da zona de transição entre malhas. A malha apresentada e utilizada foi a que evidenciou melhores resultados atendendo às flutuações dos valores médios monitorizados à saída da conduta, figuras (4.6), (4.7) e (4.8).

As características das malhas bem como alguns parâmetros da simulação encontram-se resumidos no quadro seguinte.

Característica	Malha		
	Grosseira	Intermédia	Refinada
Nº total de volumes	172800	1382400	1989360
Dimensão dos elementos [mm]	100	50	100
			50
			25
Nº de volumes de 25 mm	-	-	172800
Nº de elementos de 50 mm	-	1382400	129600
Nº de iterações	17700	37800	76909
Tempo de cálculo [s]	60336	140616	217024
Quadro 4.1– Características das várias malhas			

De modo a monitorizar os efeitos dos sucessivos refinamentos nos valores calculados através das simulações numéricas e comparar os mesmos com os resultados esperados são apresentados no quadro (4.2) os valores médios de velocidade, pressão e temperatura obtidos, com cada uma das malhas, na secção de saída da conduta.

Grandeza	Malha		
	Grosseira	Intermédia	Refinada
Temperatura média à saída [°C]	327	436	468
Velocidade média à saída [m/s]	14	29	34
Pressão média à saída [Pa]	75	132	144
Quadro 4.2– Resultados obtidos na secção de saída			

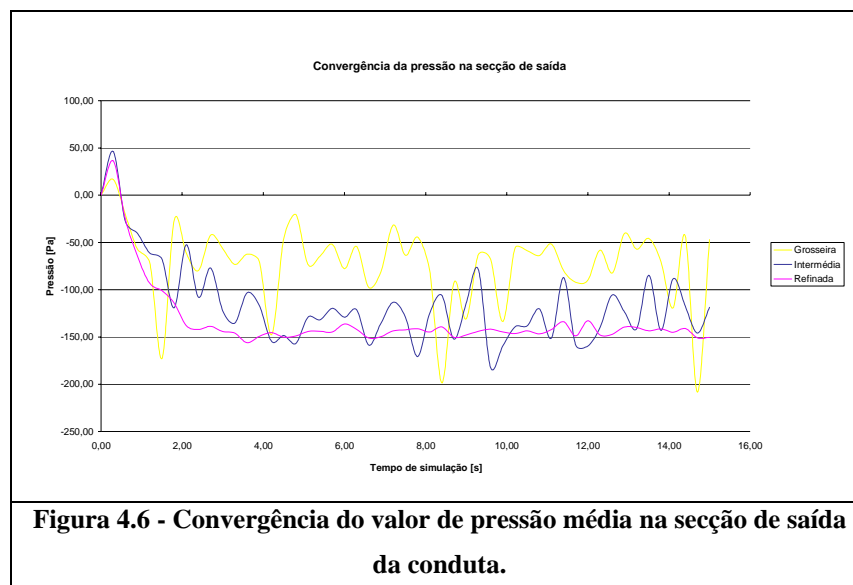
É possível verificar através da tabela anterior que à medida que a malha é refinada existe um aumento dos valores médios calculados à saída da turbina. Este aumento resulta de

uma menor difusão, sendo que a passagem de informação entre os nós que constituem o domínio de cálculo e onde são realizados os cálculos é feita de um modo correcto sem que haja perda de informação. Os valores apresentados para a temperatura e velocidade, no caso da malha refinada, estão de acordo com os referidos pela Marinha, calculados e apresentados em estudos anterior. Para o valor de pressão existe uma diferença em relação ao valor calculado anteriormente, após a leitura do manual do programa chegou-se à conclusão que o FDS não utiliza o valor da pressão estática mas sim um valor simplificado que contabiliza os efeitos da turbulência. Esta aproximação está na base das diferenças apresentadas.

4.5. *Análise de convergência*

Para a análise de convergência da solução do problema foram monitorizadas três variáveis: a temperatura média dos gases à saída; a velocidade média dos gases à saída e a pressão dinâmica média à saída, tendo-se registado os valores instantâneos em cada segundo.

Analisando as figuras seguidamente apresentadas, verifica-se que ao longo dos vários refinamentos de malha os valores das grandezas controladas convergem para um mesmo valor.



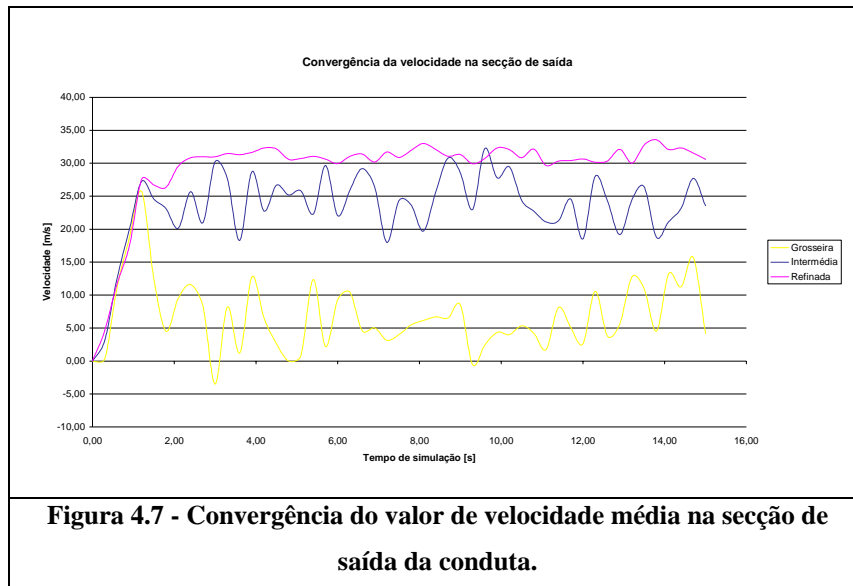


Figura 4.7 - Convergência do valor de velocidade média na seção de saída da conduta.

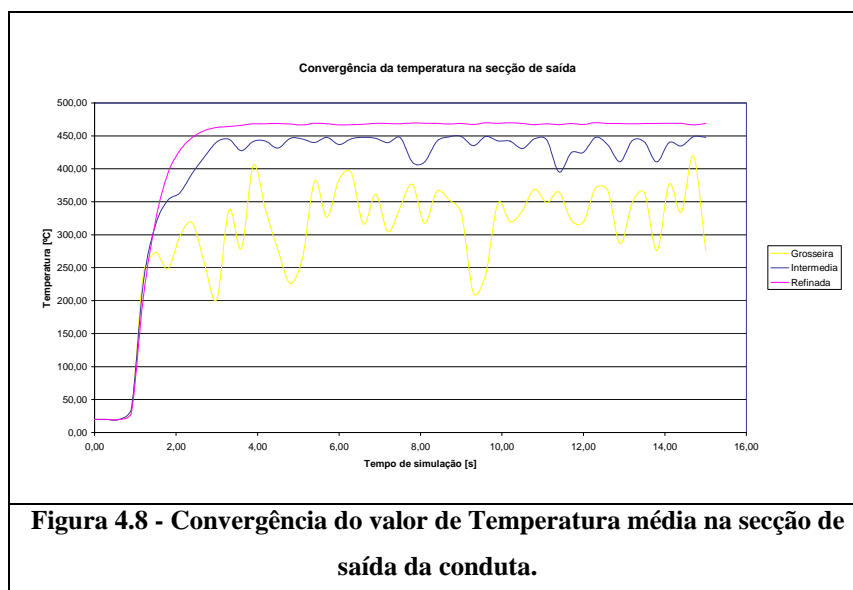
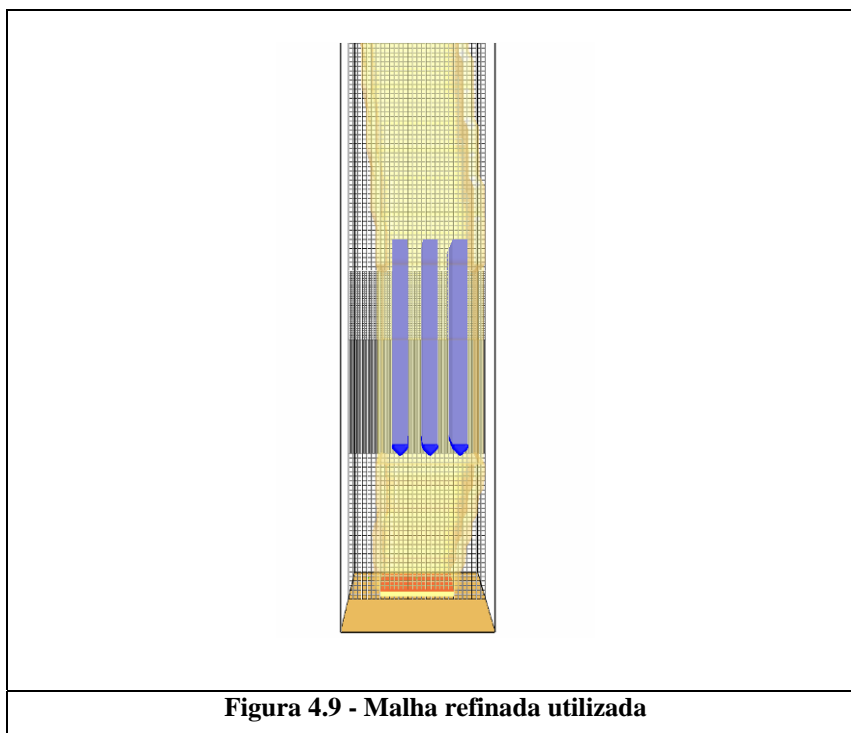


Figura 4.8 - Convergência do valor de Temperatura média na seção de saída da conduta.

Como se pode observar nas figuras anteriores, existe grande influência do nível de refinamento da malha na obtenção de valores de convergência. Nas duas primeiras malhas, grosseira e intermédia, os valores dos campos de pressão, temperatura e velocidade sofrem grandes oscilações, não sendo possível obter a convergência para um valor final. Na malha refinada, embora haja alguma oscilação dos valores, é possível identificar a tendência da curva em convergir para um único valor.

Perante estes resultados seria conveniente utilizar uma malha com um maior refinamento até eliminar qualquer oscilação das curvas obtidas. No caso do campo de velocidades seria conveniente efectuar uma média no tempo, uma vez que o regime é

turbulento e ao registar valores instantâneos de segundo a segundo existirá sempre uma variação do valor apresentado. Estes refinamentos não foram realizados uma vez que, como já foi referido, não existem recursos computacionais para a introdução de uma malha mais refinada. Assim a malha utilizada no estudo do escoamento foi a malha refinada, figura (4.9). Como última verificação pode dizer-se que os resultados obtidos com esta malha estão em conformidade com os resultados analíticos e numéricos obtidos anteriormente em [1].



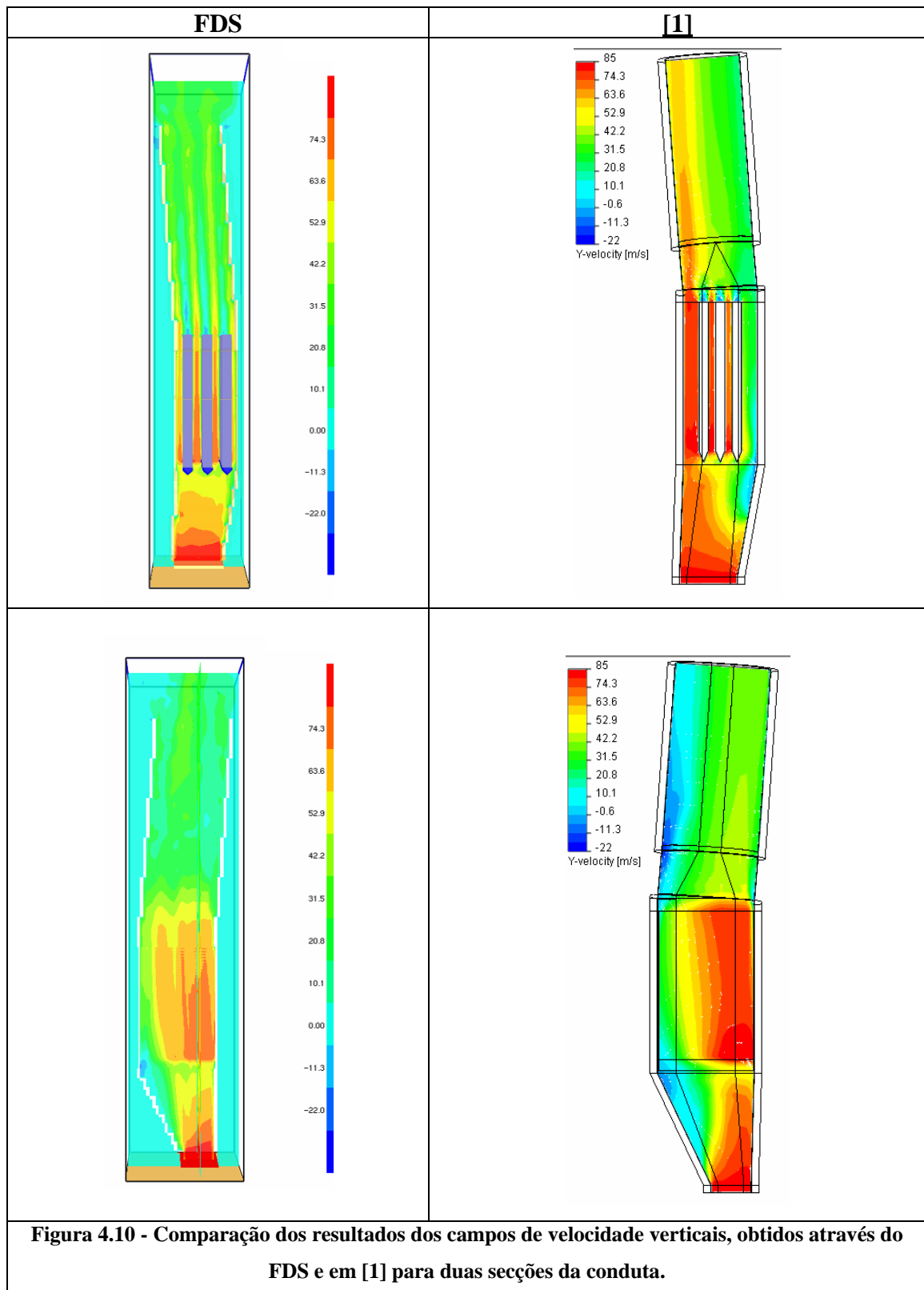
4.6. Análise e comparação de resultados

Nesta fase do estudo são comparados os resultados obtidos nesta primeira fase de desenvolvimento da tese com os resultados obtidos em [1] e com os dados cedidos pela Marinha Portuguesa. Esta comparação permite avaliar o desempenho do FDS na obtenção de resultados satisfatórios na análise de problemas deste tipo.

4.6.1. Campo de velocidades

Através da figura (4.10) podem distinguir-se, para os resultados obtidos com o FDS e apresentados em [1], a existência de duas zonas específicas onde ocorre a formação de vórtices. Uma das zonas está situada no início da conduta central, zona coincidente com o início do bordo de ataque dos atenuadores acústicos, o aparecimento de vórtices nesta região está associado à expansão devida às características geométricas e ao aumento de pressão introduzido pela proximidade dos atenuadores acústicos. A outra zona onde ocorre a

recirculação do fluido marca as esteiras dos atenuadores acústicos. A velocidade média à saída é de 34 m/s, valor concordante com o resultado do cálculo analítico e com [1].



Na figura (4.10) é possível verificar que a vorticidade gerada na zona de esteira tem maior relevância nos resultados obtidos no FDS. Em [1] estes efeitos são mais localizados.

Este diferente comportamento do escoamento nesta zona está ligado não só ao tipo de modelação realizada em cada um dos programas como à dimensão da malha utilizada no FDS na zona acima dos atenuadores acústicos. Este efeito foi minorado em simulações subsequentes através do refinamento da malha nesta zona, sempre tendo como limitação o número total de elementos totais utilizados na discretização da totalidade do domínio de cálculo.

De modo a comparar os valores calculados nos dois estudos, são apresentados de seguida gráficos com a variação dos valores de velocidade ao longo de secções horizontais da conduta para zonas localizadas a diferentes cotas: início dos silenciadores, a meio dos silenciadores e na zona de esteira dos silenciadores. Os resultados são apresentados nas figuras (4.11), (4.12) e (4.13).

Embora seja evidente alguma variação nos valores apresentados, existe concordância tanto nos valores máximos como na tendência que as curvas apresentam. Tanto na figura 4.11 como na figura 4.13 é possível identificar zonas de velocidade negativa correspondentes a zonas de recirculação. As diferenças apresentadas pelas duas curvas podem ser justificadas pela variação da geometria utilizada em cada estudo, sobretudo no que respeita à posição dos silenciadores. A geometria e o erro criado por estas diferenças só foram corrigidos após inspeção ao navio onde foram recolhidos dados exactos sobre a posição dos silenciadores em relação à conduta. De referir ainda a forma mais linear dos resultados apresentados em [1]; esta linearidade está associada à forma como são retirados os valores no pós-processador, enquanto para o FDS cada ponto representa um valor calculado em cada elemento, em [1] o valor obtido é uma média dos valores calculados.

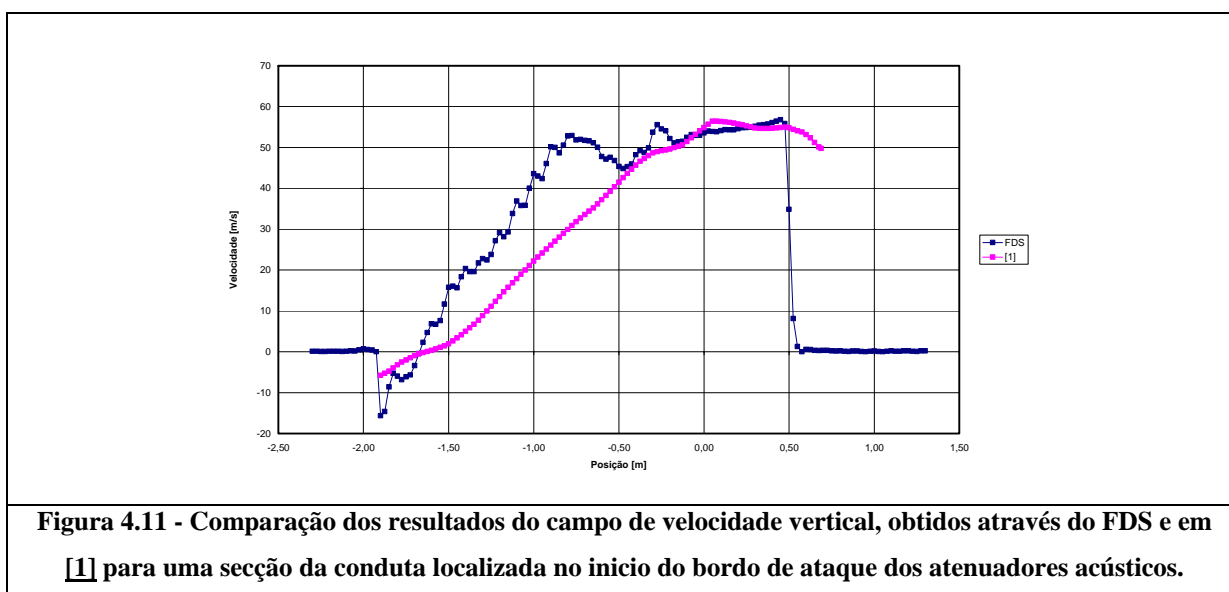


Figura 4.11 - Comparação dos resultados do campo de velocidade vertical, obtidos através do FDS e em [1] para uma secção da conduta localizada no início do bordo de ataque dos atenuadores acústicos.

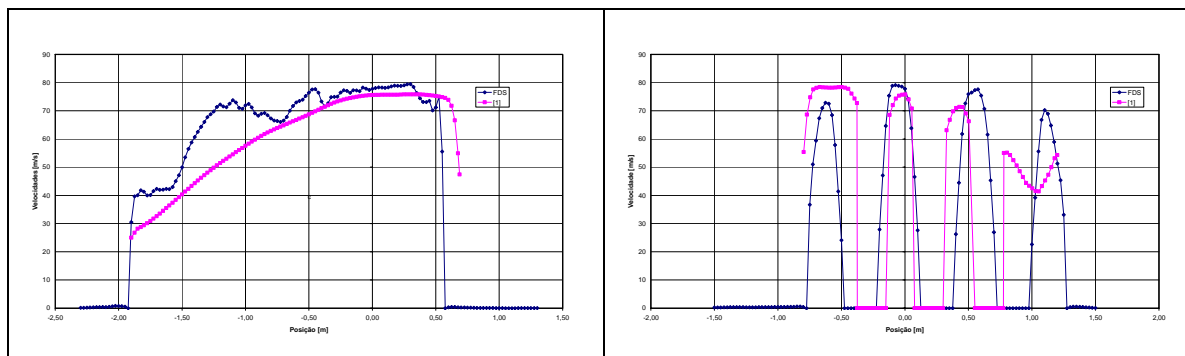


Figura 4.12 - Comparação dos resultados do campo de velocidade vertical, obtidos através do FDS e em [1] para uma secção da conduta localizada a meio dos atenuadores acústicos em duas direcções perpendiculares.

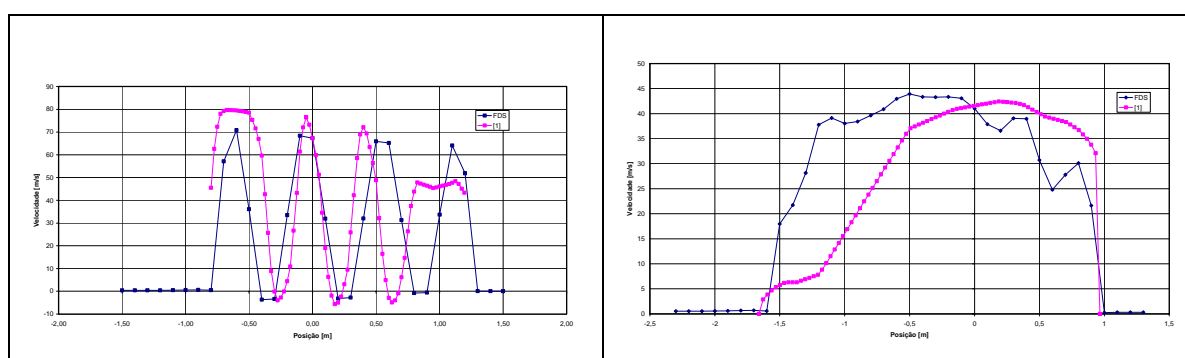


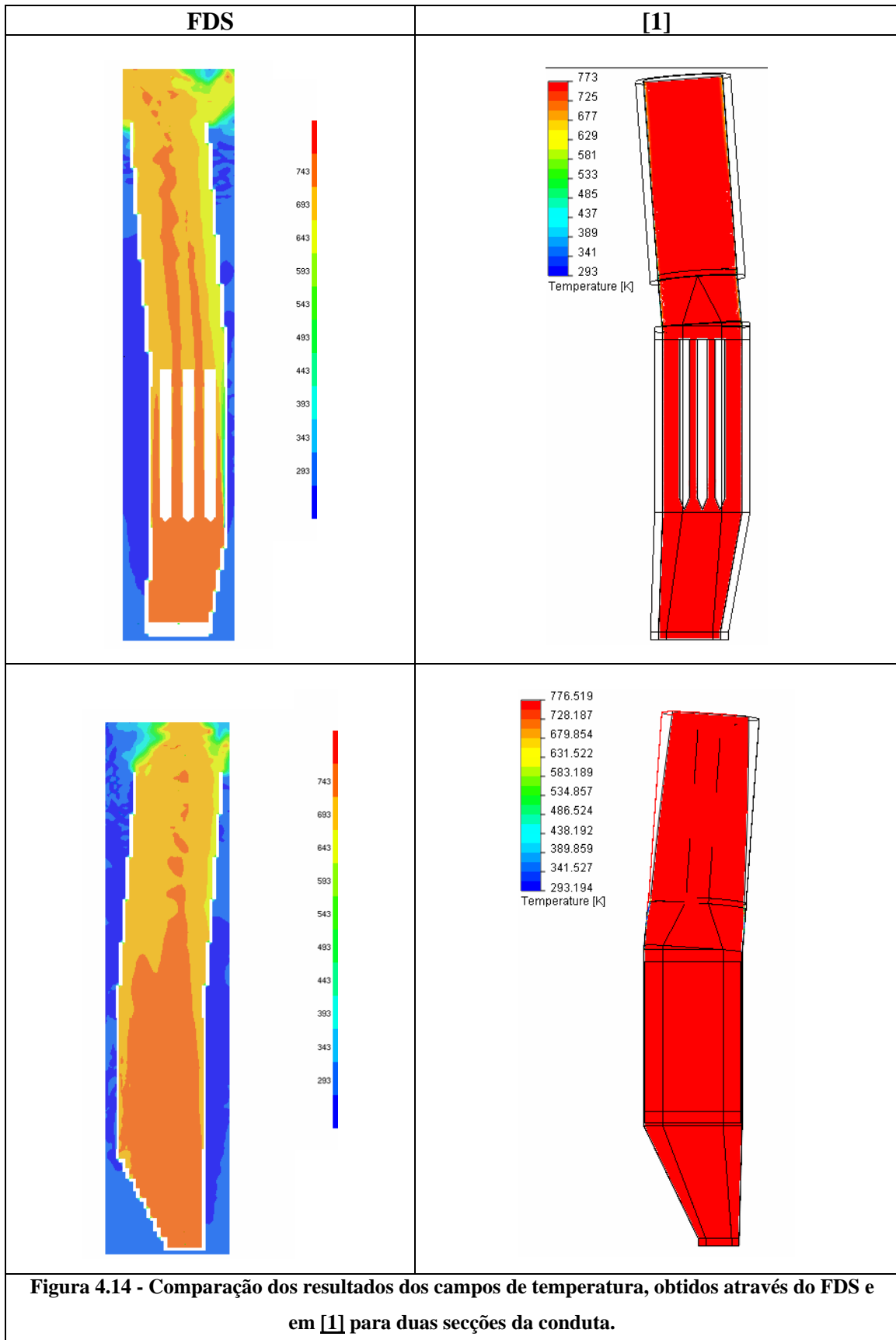
Figura 4.13 - Comparação dos resultados do campo de velocidade vertical, obtidos através do FDS e em [1] para uma secção da conduta localizada na zona de esteira em duas direcções perpendiculares.

4.6.2. Campo de temperaturas

Uma vez que não existem muitos elementos que possam efectuar a dissipação da energia térmica que é fornecida inicialmente, a temperatura obtida à saída não difere muito do valor da zona de entrada dos produtos da combustão. A [figura 4.14](#) mostra os campos de temperatura para duas secções diferentes obtidos através do FDS e em [1]. O valor obtido, através do FDS, à saída, é de 470 °C e está de acordo com os valores fornecidos pela Marinha Portuguesa.

É possível verificar através dos campos apresentados que existem diferenças nos valores obtidos e nos referidos em [1]. Embora nas secções mais próximas da entrada, [figuras 4.15 e 4.16](#), as temperaturas sejam próximas, nas zonas mais afastadas da entrada, [figura 4.17](#), a distribuição de temperaturas nos resultados apresentados em [1] não mostra o efeito dissipativo da parede, sendo as temperaturas apresentadas iguais aos valores iniciais (500°C). Este aspecto foi melhorado nas simulações realizadas com o programa FDS. As maiores diferenças, entre resultados, localizam-se na zona próxima da parede, onde o FDS parece simular o fenómeno físico de maneira mais realista. É possível diferenciar nestes resultados

claramente uma zona de menor temperatura associada à camada limite na proximidade da parede.



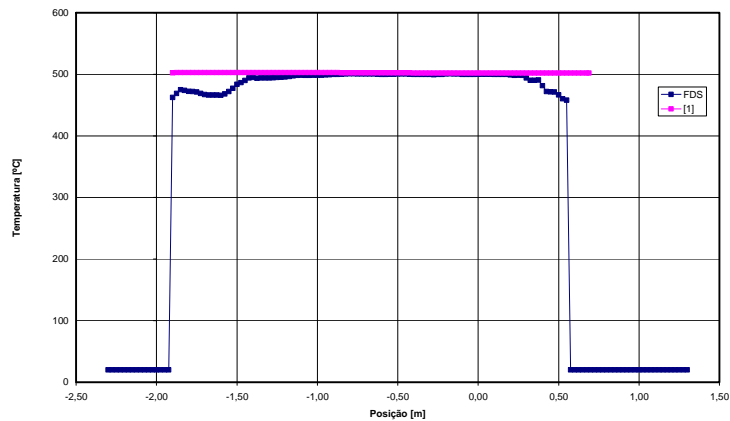


Figura 4.15 - Comparação dos resultados do campo de temperatura, obtidos através do FDS e em [1] para uma secção da conduta localizada no início do bordo de ataque dos atenuadores acústicos.

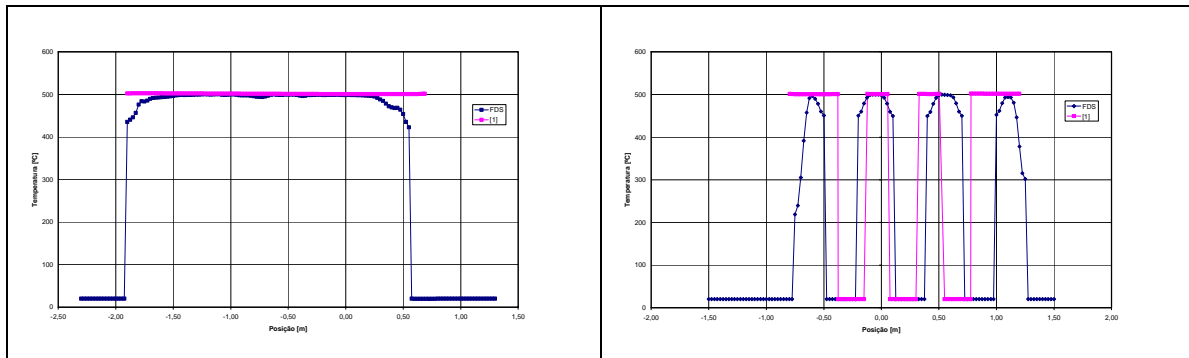


Figura 4.16 - Comparação dos resultados do campo de temperatura, obtidos através do FDS e em [1] para uma secção da conduta localizada a meio dos atenuadores acústicos em duas direcções perpendiculares.

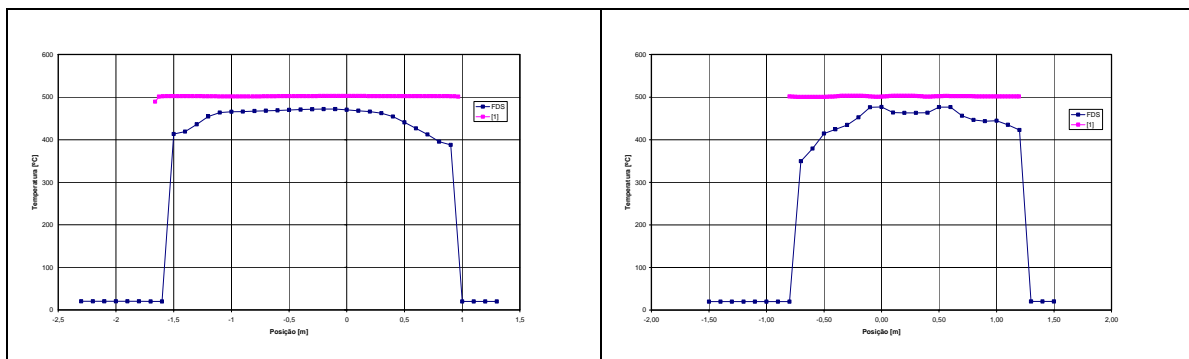


Figura 4.17 - Comparação dos resultados do campo de temperatura, obtidos através do FDS e em [1] para uma secção da conduta localizada na zona de esteira dos atenuadores em duas direcções perpendiculares.

4.6.3. Campo de temperaturas junto à parede

De modo a aferir quanto à importância dos gradientes térmicos no aparecimento das fissuras são apresentados, na [figura \(4.18\)](#), os campos de temperatura do fluido nos elementos mais próximos das paredes da conduta na zona onde se verifica o aparecimento de fissuras. A diferença entre temperaturas mínima (430°C) e máxima (470°C) é de aproximadamente 40°C, o que por si só não parece justificar o aparecimento de problemas estruturais. Assim face aos gradientes de temperatura obtidos, é de admitir que seja também importante contabilizar os efeitos perniciosos introduzidos pelo choque térmico induzido pelo início do funcionamento da turbina e sua paragem.

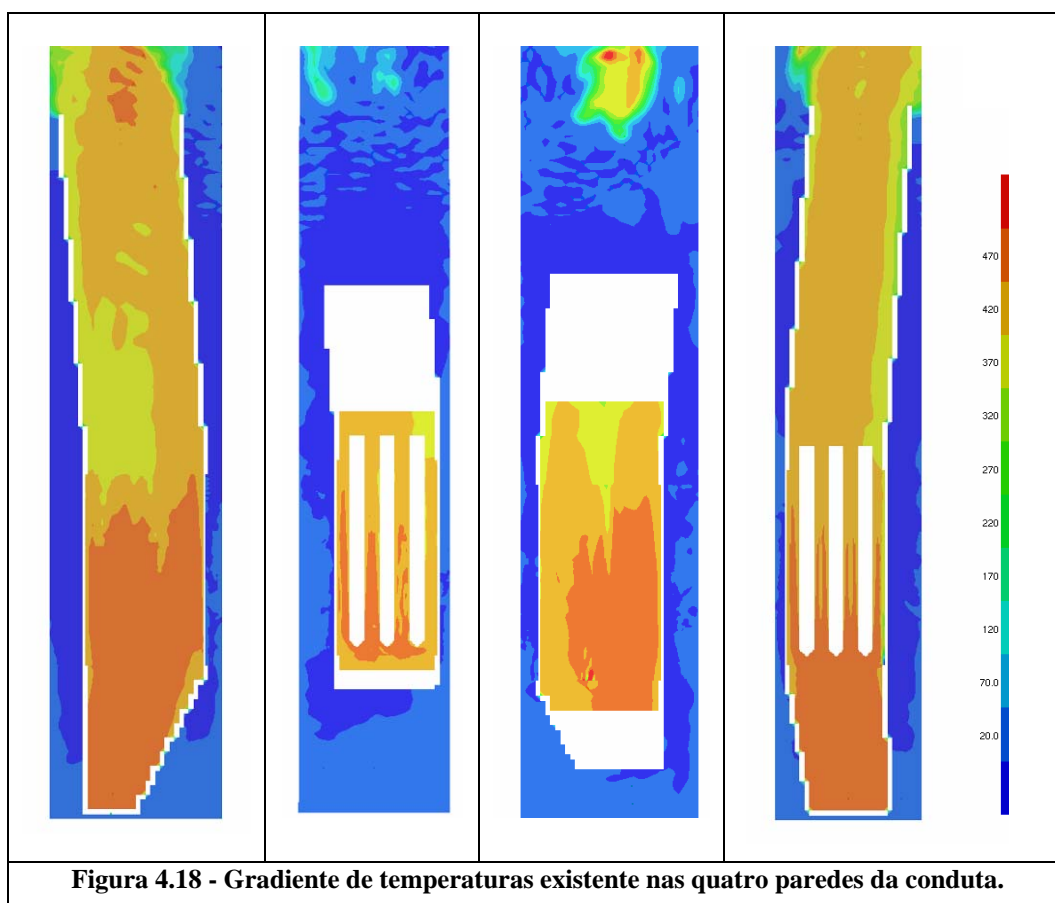


Figura 4.18 - Gradiente de temperaturas existente nas quatro paredes da conduta.

4.6.4. Conclusões

Realizadas as simulações numéricas no FDS, procedeu-se ao estudo e comparação dos resultados obtidos com os apresentados em estudos anteriores. A semelhança entre os resultados obtidos aponta no sentido da adequação das simulações, neste sentido o FDS demonstra ser um programa apropriado para o desenvolvimento dos estudos pretendidos. Como principais melhorias a implementar nas modelações apresentadas verifica-se que é conveniente refinar a malha na zona de esteira de modo a caracterizar melhor a zona de

recirculação aí existente. O modo como é introduzido o refinamento deve ser bem estudado de modo a que este seja realizado apenas nos sítios onde introduza melhorias substanciais nos resultados obtidos. No FDS qualquer refinamento de malha implica um grande aumento quer do tempo de cálculo quer dos recursos computacionais. De salientar ainda a dificuldade que programas que utilizam malhas estruturadas cartesianas apresentam na construção da geometria em estudo, associado a esta característica podem estar o aparecimento de pequenos erros devido a diferenças entre o modelo utilizado e a geometria real. Face ao tamanho do domínio estes erros não são relevantes quando se considera a totalidade do escoamento.

Em relação ao modelo de turbulência utilizado é evidente a qualidade do modelo de turbulência LES para caracterizar o escoamento nas zonas de formação de vórtices. Sendo a sua maior desvantagem o incremento temporal e o número de elementos necessário para a obtenção de resultados que reproduzam com maior exactidão os fenómeno físico.

5. 2ª GEOMETRIA

No seguimento dos trabalhos apresentados, nos capítulos anteriores desta tese, foram introduzidas alterações substanciais na geometria modelada. Nos estudos apresentados de seguida manteve-se a geometria utilizada anteriormente e introduziram-se alterações, de modo a simular de uma forma mais realista o sistema físico, mais concretamente a maneira como é feita a admissão dos dois caudais, ar novo e produtos da combustão, na conduta. As alterações introduzidas resultaram de registos geométricos e visuais efectuados nas várias visitas realizadas ao navio.

Nesta secção serão apresentados os registos visuais obtidos nas várias visitas e as alterações realizadas no modelo numérico: geometria, condições fronteira e malha. No final do capítulo são comparados os resultados apresentados no capítulo anterior, secção (4.6), com os resultados obtidos após a introdução do novo modelo e das novas condições de fronteira.

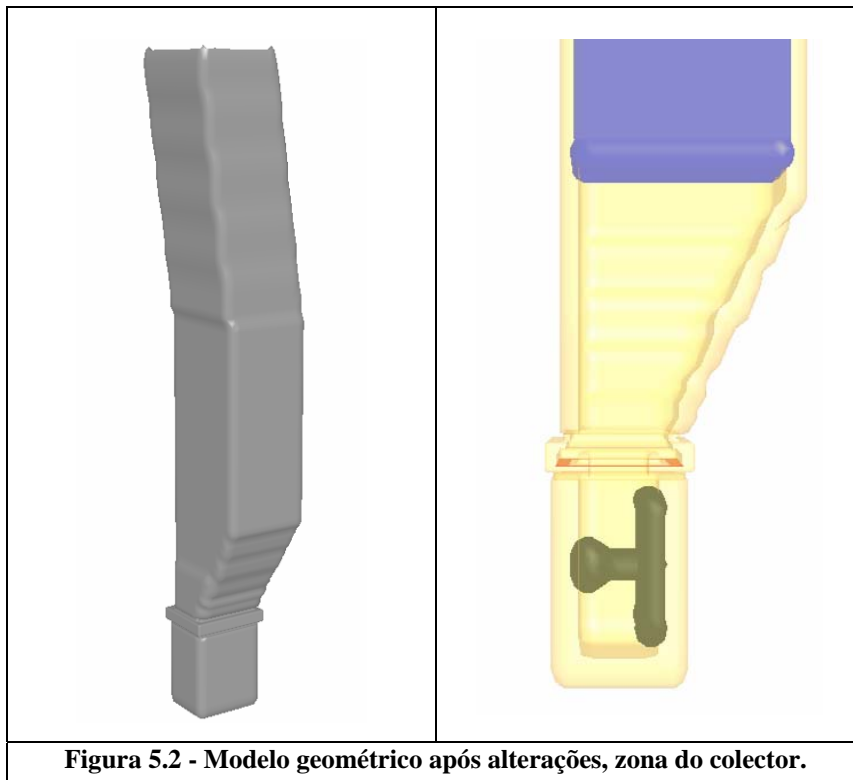
Como resultado dos estudos apresentados nesta secção foi elaborado uma publicação em congresso [16].

5.1. Geometria

Em relação à geometria utilizada nos estudos apresentados na secção (4.1), as alterações efectuadas pretendem simular de um modo mais realista a entrada dos gases na conduta. A entrada dos gases está condicionada pela geometria apresentada na figura (5.1). Na zona central é feita a admissão, para a conduta, dos produtos da combustão provenientes do interior da turbina. Nas zonas laterais e de menor dimensão é feita a admissão de ar novo utilizado para refrigerar o habitáculo onde se encontra a turbina.



No novo modelo numérico foi mantida a geometria da conduta utilizada na secção anterior e foi acrescentada uma zona inferior, [figura \(5.2\)](#), denominada por colector. Nesta nova zona é possível identificar a preto a geometria que simula a zona de passagem do veio da turbina e a zona final da turbina. Foram ainda criadas duas zonas para a introdução das condições fronteira, que permitem simular os dois tipos de caudais existentes, zona a vermelho e zona a verde. As considerações relativas ao tipo de condições fronteira introduzidas serão feitas nos pontos seguintes deste capítulo.



5.2. Condições fronteira na entrada

Foram impostas duas condições de temperatura e velocidade representativas dos dois diferentes tipos de caudais existentes no escoamento, como referido na secção (1.5.2): gases provenientes da combustão e ar novo, correspondendo às zonas a verde e vermelho da figura (5.3), respectivamente. Para o caudal de produtos da combustão foi atribuído uma temperatura de 566°C e uma velocidade de 87,5 m/s e para o caudal de ar novo de 85°C e 10,5 m/s. Estes valores de velocidade foram definidos tendo em conta os valores de caudal especificados pelo fabricante das turbinas e pelas dimensões geométricas definidas, uma vez que na altura da realização destas simulações não eram conhecidas as dimensões reais da zona do colector os valores utilizados são valores aproximados. Estes valores foram corrigidos nas simulações apresentadas no capítulo seguinte.

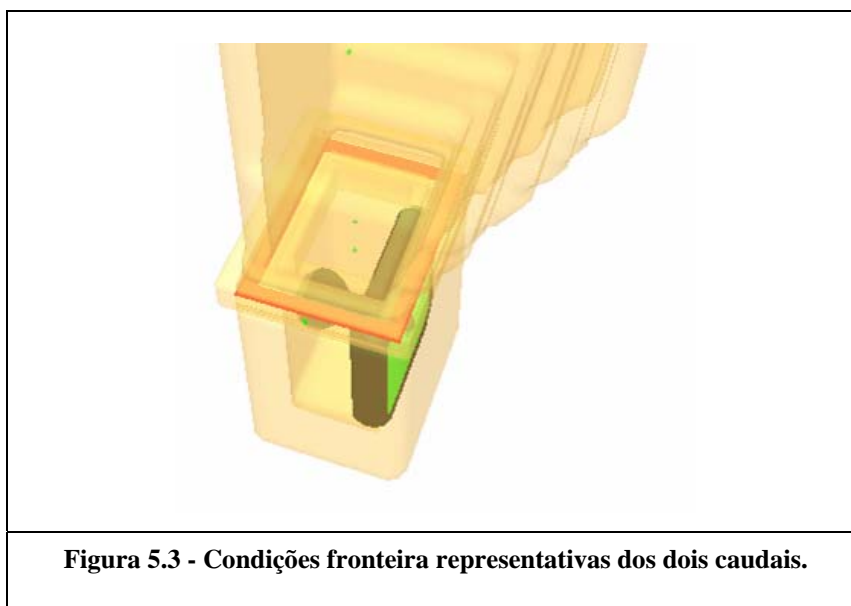


Figura 5.3 - Condições fronteira representativas dos dois caudais.

5.3. Condições fronteira na Parede

De modo a representar mais fielmente o escoamento em estudo, no que respeita aos fenómenos de transmissão de calor através das paredes da conduta, foi corrigida a aproximação feita na secção (4.3), onde não foram definidas características para a parede mas sim assumidas as condições que o FDS considera por defeito. Assim e, depois do levantamento de dados referentes à espessura e características dos materiais que constituem a parede da conduta, foram adicionados parâmetros ao ficheiro de entrada de modo a considerar a verdadeira constituição da parede, figura (5.4): o interior da conduta é constituído por chapas de aço inoxidável AISI 316L, com uma espessura aproximada de 4 mm. Este tipo de aços é caracterizado por ter um coeficiente de condutibilidade térmica à temperatura ambiente

de aproximadamente 15 W/(m.K) , calor específico de $43,5 \text{ J/Kg.K}$ e densidade de 8190 Kg/m^3 ; existe depois uma zona de isolamento térmico, do tipo lã mineral, com uma espessura de 125 mm . Este tipo de isolamento é caracterizado por ter um coeficiente de condutibilidade térmica à temperatura ambiente de aproximadamente $0,045 \text{ W/(m.K)}$, calor específico de 754 J/Kg.K e densidade de 100 Kg/m^3 , segundo [17]; por último existe uma outra chapa exterior, que dá resistência mecânica ao isolamento, de características iguais à primeira mas com um espessura de 1 mm .

Para além da chapa interior e exterior da conduta, foi também considerado que os silenciadores colocados no interior da mesma são constituídos com o mesmo material. Todos os elementos construtivos que constituem a geometria apresentada e que se encontram a montante da entrada da conduta têm características adiabáticas uma vez que não existem dados de modo a caracterizar estes materiais e porque apenas existe o interesse em estudar o escoamento no interior da conduta.



Figura 5.4 - Características do sistema em estudo, chapa interior, isolamento e chapa exterior

5.4. Refinamento de malha

No estudo apresentado nesta secção, devido ao elevado tempo de cálculo que cada simulação exige até estarem disponíveis resultados que possam ser analisados, não se efectuou o estudo de convergência como foi feito na secção (4.5) do capítulo anterior. No entanto tentou-se manter, dentro dos possíveis, o refinamento utilizado anteriormente nessa secção que demonstrou possibilitar a obtenção de bons resultados. Com o aumento da geometria e consequente aumento do domínio de cálculo foi necessário diminuir o número de nós na zona da conduta, de modo a poder manter o número de elementos utilizados na totalidade do domínio. Assim, a malha utilizada, apresentada na figura 5.5, é constituída por cerca de 6×10^5

volumes elementares, distribuídos por três subdomínios diferentes. Os subdomínios da zona inferior e superior apresentam um estiramento progressivo, de modo a ter um maior refinamento na zona próxima da entrada da conduta e menor na zona de saída dos gases para o exterior. Este estiramento só ocorre segundo a direcção vertical, mantendo-se constante a dimensão dos volumes nas outras duas direcções. Na zona onde ocorre a mistura dos dois caudais a malha é constituída por elementos homogéneos com 25mm de comprimento segundo todas as direcções. Esta distribuição prende-se não só com a existência de maiores gradientes nesta zona, como também com pormenores construtivos da geometria. Segundo as conclusões do capítulo anterior, secção (4.6.4), e de modo a melhorar os resultados obtidos na zona de esteira dos atenuadores acústicos foi aumentado o refinamento nessa zona.

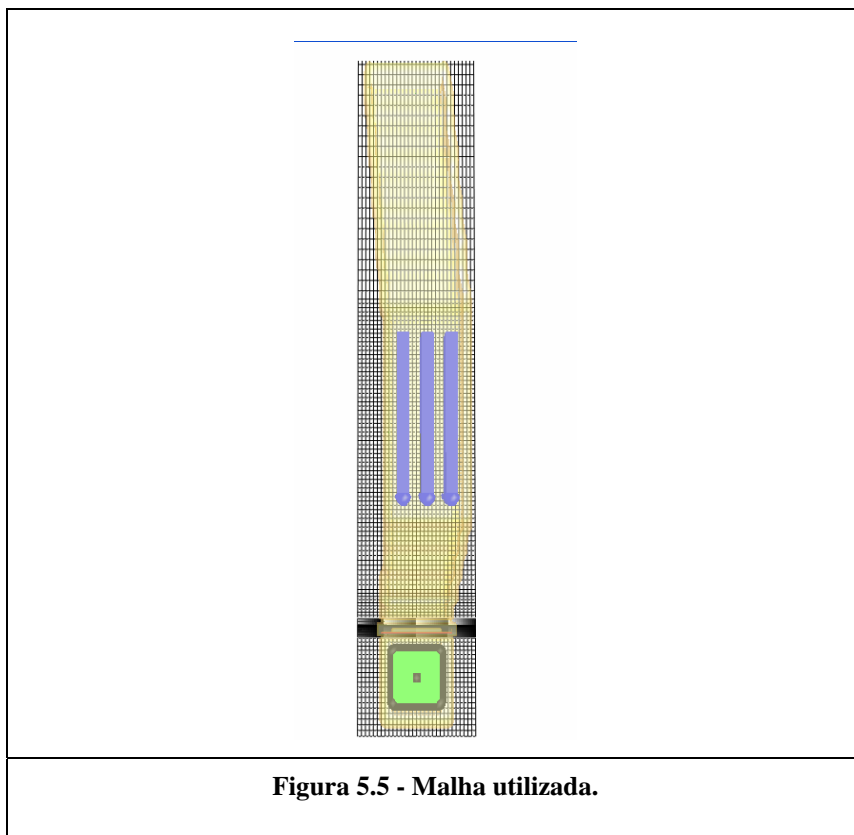


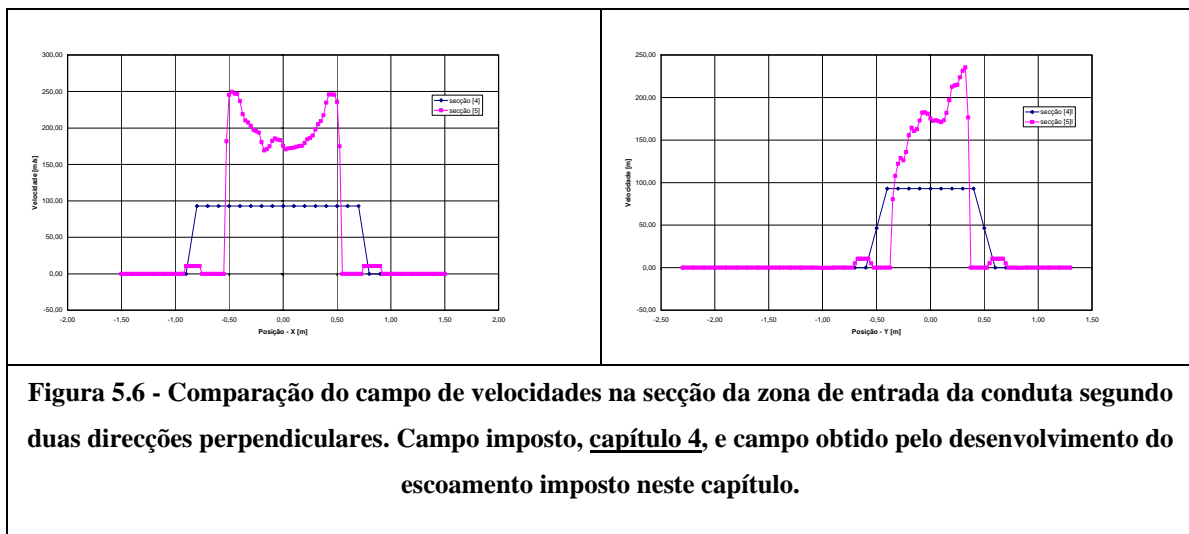
Figura 5.5 - Malha utilizada.

5.5. *Análise e comparação de resultados*

Nesta fase do estudo são comparados os resultados obtidos numa primeira fase de desenvolvimento da tese, secção (4.6), com os resultados obtidos após introduzidas as alterações apresentadas nesta secção. Esta comparação permite aferir sobre quais as alterações nos resultados obtidos após introduzir condições que aproximam o escoamento simulado do escoamento real.

5.5.1. Campo de Velocidades

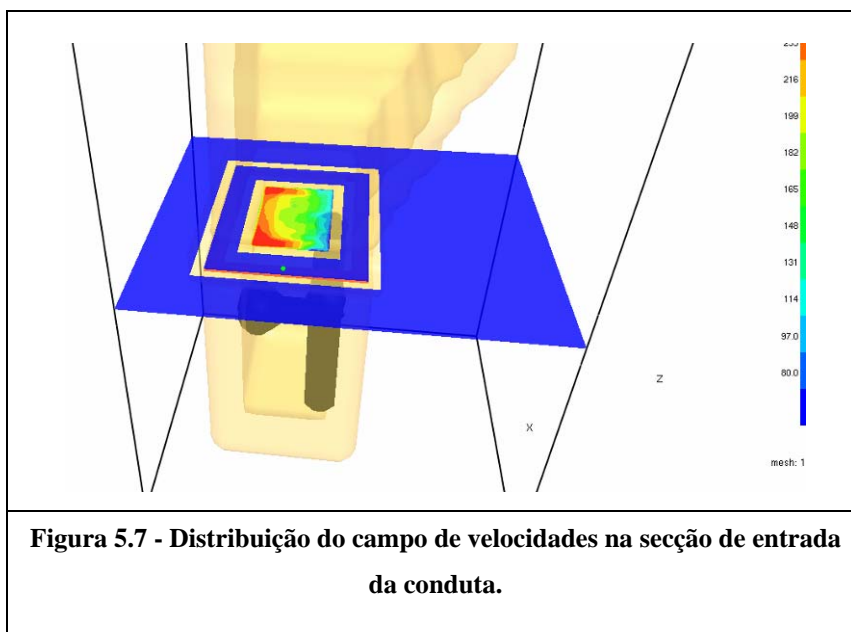
Através dos perfis apresentados na [figura \(5.6\)](#), obtidos numa secção horizontal situada na entrada da conduta, numa posição central relativamente ao eixo da zona inferior, é possível evidenciar a maior alteração efectuada em relação aos desenvolvimentos anteriores, [secção \(4.2\)](#). A modificação da geometria e a imposição de novas condições de fronteira, de modo a simular a entrada dos caudais de ar novo e produtos da combustão, resultam numa significativa variação do campo de velocidades à entrada da conduta e, conseqüentemente, em todo o domínio.



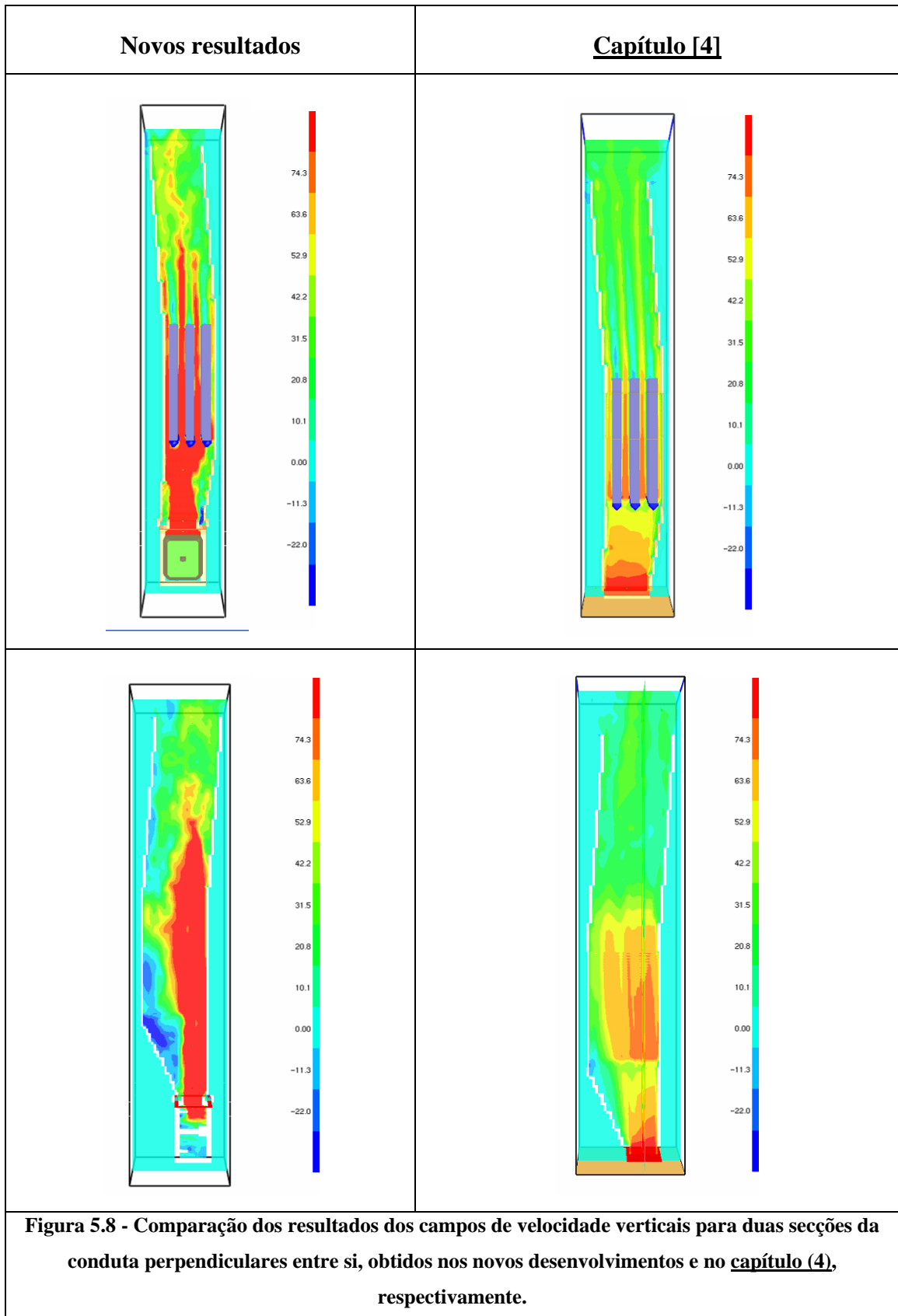
Na [figura \(5.6\)](#) é possível distinguir a forma como é feita a admissão dos gases nos diferentes desenvolvimentos. Na [secção \(4.2\)](#) foi imposta uma condição de velocidade de modo a simular o caudal total dos produtos da combustão e de ar novo. O campo de velocidade imposto é uniforme exceptuando nas zonas próximas da parede onde a velocidade é menor devido à condição de parede imposta pelo programa. Para os resultados obtidos neste capítulo é possível identificar duas zonas distintas. Uma, a que correspondem velocidades mais baixas, que representa o caudal de ar novo, na qual a condição é imposta através de um campo de velocidades uniforme (zona vermelha [figura \(5.3\)](#)), e outra, com velocidades mais elevadas, que resulta do desenvolvimento do escoamento dos gases da combustão desde a saída da turbina (zona verde [figura \(5.3\)](#)) até ao início da conduta.

Os novos resultados estão de acordo com o previsto e espera-se que constituam uma melhor aproximação ao escoamento real. A variação do campo de velocidade ([figuras \(5.6\)](#) e [\(5.7\)](#)), na secção de entrada, para os dois modelos numéricos estudados, justifica-se pelas alterações introduzidas na geometria da conduta e pelo modo como é feita a admissão dos

gases provenientes da turbina. É possível verificar que os gases ao saírem da turbina para o colector, onde se encontra o eixo da turbina, são projectados contra as paredes do próprio compartimento; como resultado, verifica-se a existência de uma zona de maior velocidade nas proximidades das paredes, frontal e laterais, uma vez que nessas zonas existe uma maior obstrução à passagem dos gases. Na zona próxima da saída da turbina e na zona central do escoamento, devido à direcção do escoamento de saída dos gases da mesma, existe uma zona de menor velocidade.

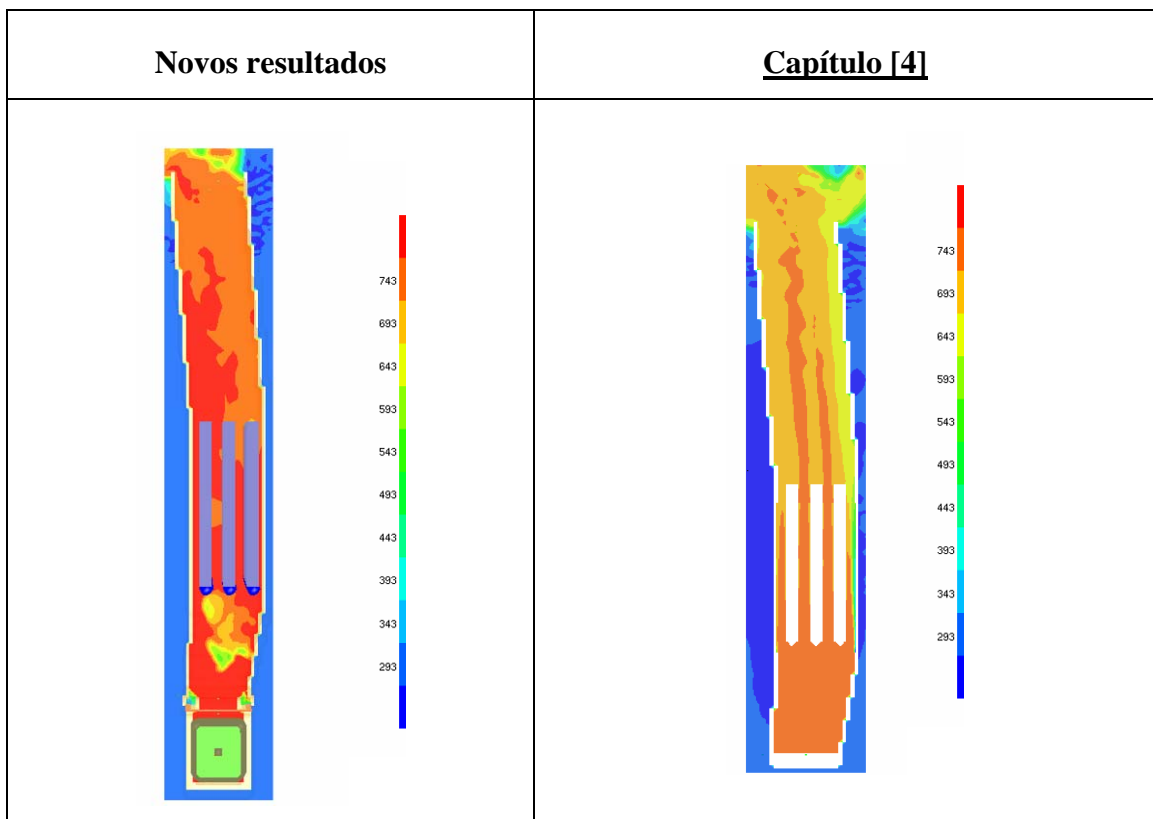


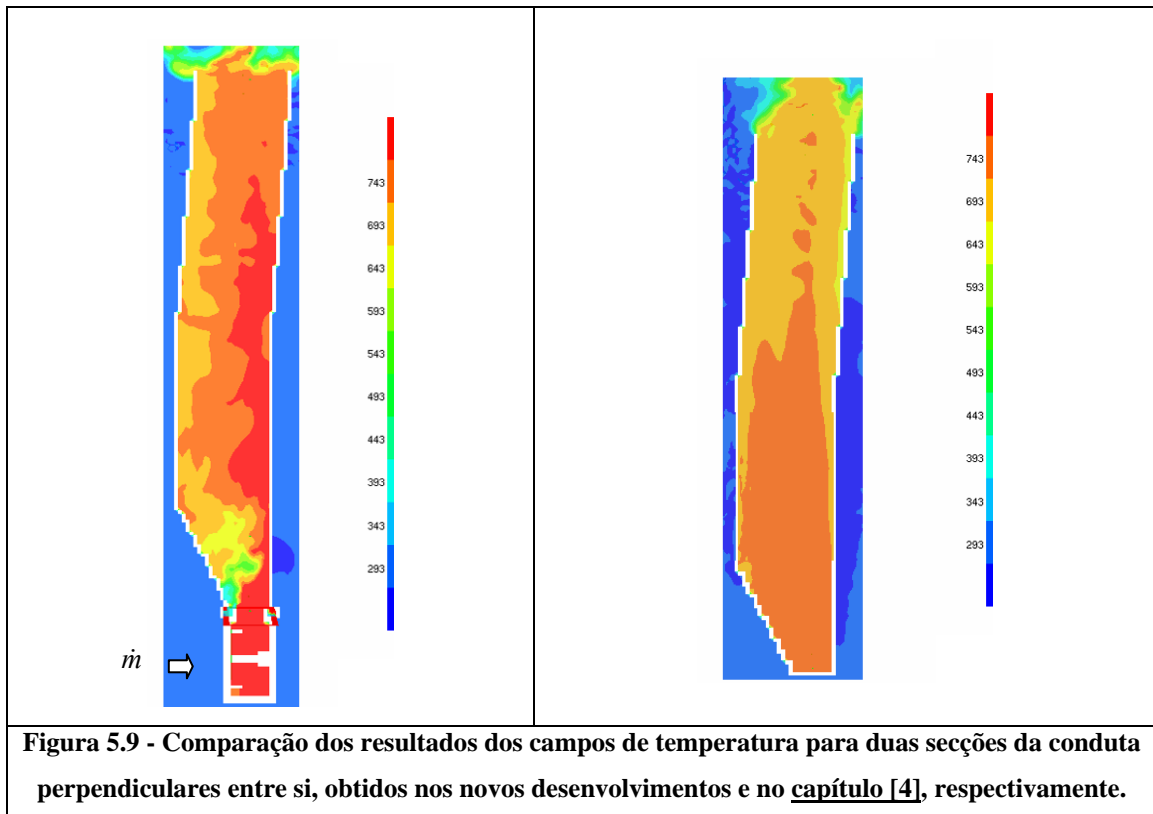
Na figura (5.8) são comparados os resultados obtidos com as duas geometrias, em dois planos perpendiculares entre si, e posicionados sobre o eixo da zona inferior da conduta. Como é possível observar, a introdução da nova condição de entrada dos gases resulta num aumento da velocidade na zona central da conduta, antes e após os atenuadores acústicos, e no aparecimento de uma zona de menores velocidades na zona próxima das paredes da conduta, resultado da introdução de diferentes caudais. Em ambas as simulações observa-se a tendência do escoamento apresentar maiores velocidades na zona contrária à zona de expansão, ou seja, na zona inferior da conduta sem inclinação. Esta tendência está relacionada com a própria geometria da conduta. O vórtice existente na zona de expansão ganha maior dimensão nos novos resultados devido às velocidades e temperaturas mais elevadas (figuras (5.8)) existentes do lado contrário, provenientes do caudal dos produtos da combustão, e devido à forma como é feita a admissão do caudal de ar novo, junto ao início da zona de expansão que contribui para limitar a passagem aos produtos da combustão.



5.5.2. Campo de Temperatura

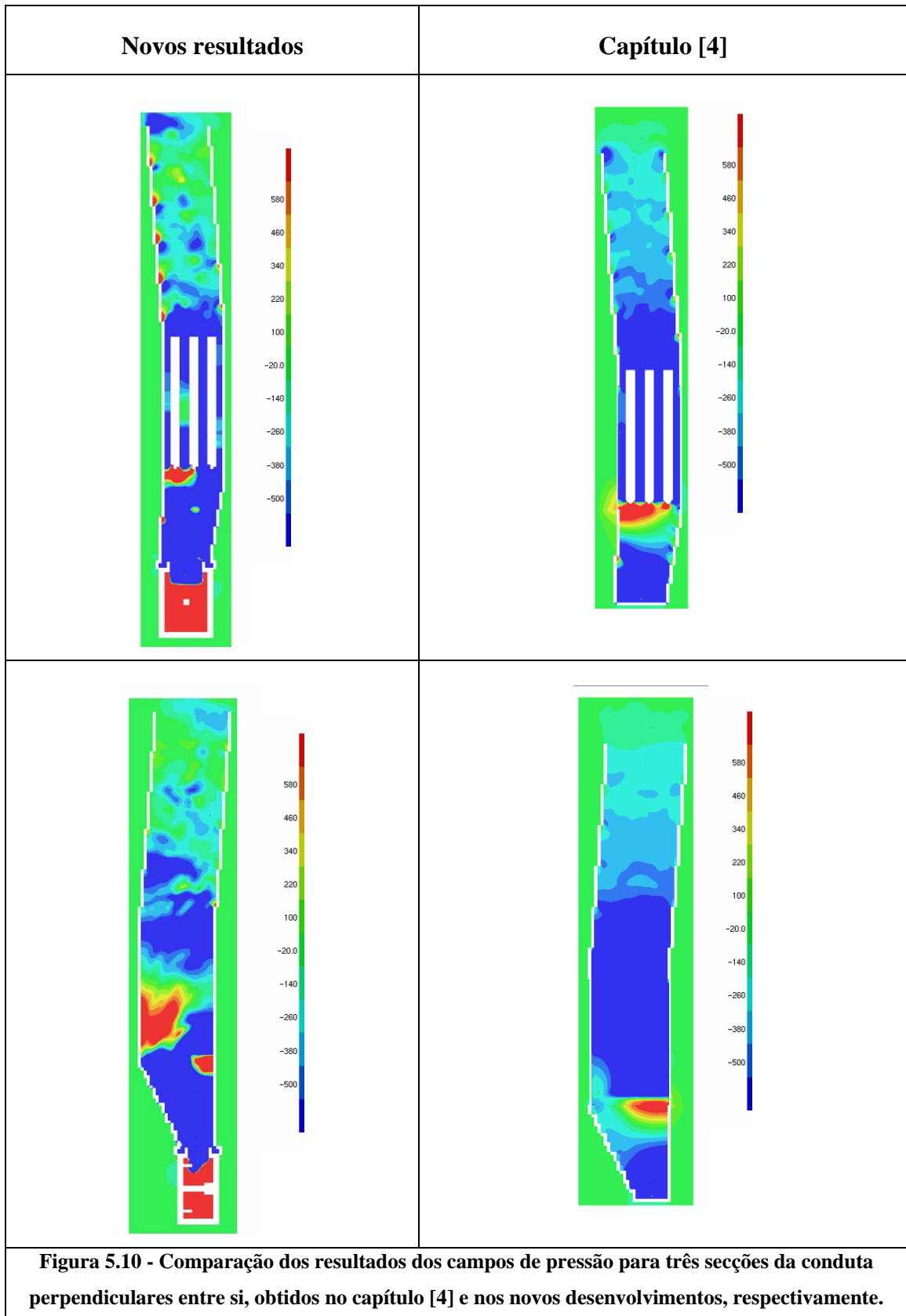
Através da comparação dos campos de temperaturas obtidos para os dois modelos numéricos, [figura 5.9](#), pode observar-se o aparecimento de uma zona de temperatura mais baixa junto das paredes laterais da secção de entrada da conduta. Esta diferença em relação ao estudo anterior, [capítulo \(4\)](#) deve-se à admissão do caudal de ar novo com uma temperatura inferior. Verifica-se também que a existência de dois caudais, com temperaturas e velocidades diferentes, aumenta a turbulência do escoamento. O novo campo de temperaturas apresenta um aspecto menos homogêneo. Ao longo de todo o domínio de cálculo, e para ambas as geometrias, as temperaturas mais elevadas estão localizadas na zona central e na zona onde a conduta não apresenta nenhuma inclinação. As zonas identificadas com maior temperatura são as zonas onde se verificaram o aparecimento de fissuras, o que é indicativo da concordância dos resultados numéricos com o fenómeno real. As temperaturas obtidas à saída em ambas as simulações são próximas e estão de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante do sistema.





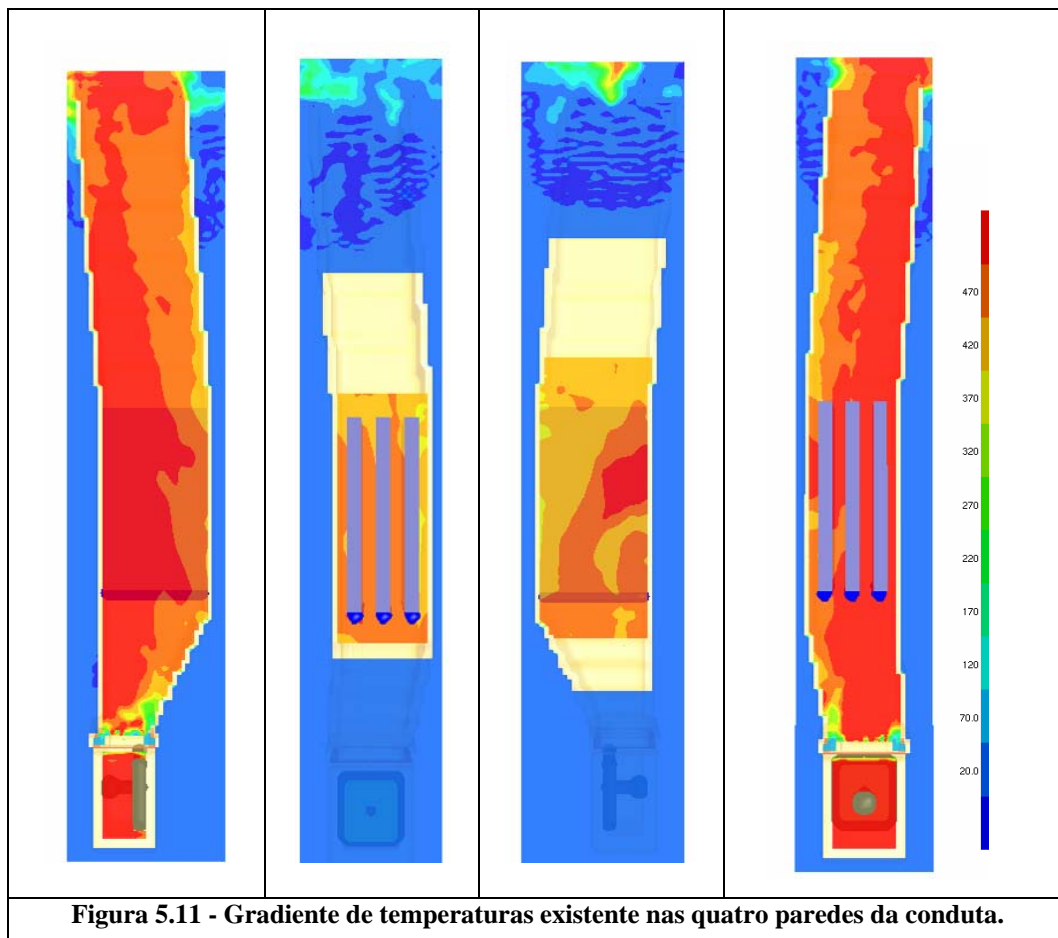
5.5.3. Campo de Pressão

A zona de maior pressão está localizada à saída dos produtos de combustão da turbina e antes da entrada dos mesmos na conduta de evacuação, figura (5.10). Este resultado está de acordo com o esperado, uma vez que é nesta zona que se verificam os maiores valores de velocidade. Em termos da totalidade do domínio, é possível verificar que em ambos os desenvolvimentos existe outra zona de pressões mais elevadas que está localizada no bordo de ataque dos atenuadores acústicos, o aumento da pressão deve-se à obstrução ao escoamento causada por estes. Esta zona coincide também com a zona de aparecimento das fissuras o que também é indicativo da concordância dos resultados numéricos com o fenómeno real. Os dados obtidos para o campo de pressão estão coerentes com os resultados apresentados no ponto 5.5.1 para o campo de velocidade.



5.5.4. Campo de temperaturas junto há parede

De modo a aferir quanto à importância dos gradientes térmicos no aparecimento das fissuras, e de modo análogo ao realizado na secção (4.6.3), são apresentados, na figura (5.11), os campos de temperatura do fluido nos elementos mais próximos das paredes da conduta na zona da onde se registam o aparecimento de fissuras. A diferença entre temperaturas mínima (450°C) e máxima (600°C) é de aproximadamente 150°C, o que em relação aos resultados anteriores evidencia diferenças significativas e indica que existe realmente um contributo do gradientes térmicos no aparecimento dos problemas estruturais.



5.5.5. Conclusões

Com o objectivo de caracterizar o escoamento dos gases provenientes da combustão de uma turbina a gás instalada num navio, foi completada a modelação da geometria do sistema relativamente a estudos numéricos anteriores, capítulo (4). Foram introduzidas alterações na geometria de entrada dos gases provenientes dos caudais de produtos da combustão e de ar novo e modificadas as condições de fronteira de modo a serem adequadamente considerados os valores dos caudais, bem como a sua temperatura, nas respectivas zonas de entrada. Estas

modificações permitiram obter um escoamento mais próximo do real. Realizadas as novas simulações numéricas, procedeu-se ao estudo e comparação dos resultados obtidos com os resultados anteriores. Os valores médios obtidos para o campo de temperatura e velocidade na secção de saída da conduta de evacuação são próximos em ambas as simulações e estão de acordo com os valores fornecidos pelo fabricante, sendo a temperatura próxima dos 450° C e a velocidade próxima dos 30 m/s, o que indicia a adequação das simulações.

Os resultados agora apresentados, quando comparados com os anteriores, mostram a existência de uma zona do escoamento próxima da parede onde os valores de velocidade e temperatura são mais elevados. Esta distribuição dos valores do campo de velocidade está relacionada com o modo como é feita a evacuação dos gases de combustão da turbina e a admissão dos mesmos na conduta. A projecção directa dos gases contra a parede do compartimento anterior à conduta e a dimensão da secção de entrada dos gases na conduta origina este tipo de escoamento, que poderá estar na origem dos problemas de fissuração detectados. Os novos gradientes de temperatura no fluido obtidos na zona mais próxima da parede parecem indicar que realmente existe um contributo da temperatura no aparecimento da fissuração.

6. 3ª Geometria

Por último e, no que respeita aos estudos realizados em CFD, no seguimento dos trabalhos apresentados nos capítulos anteriores desta tese, foram introduzidas as últimas alterações ao modelo numérico. Após indicações do fabricante e aproveitando o período de reparações em que se encontrava o navio, foi introduzido na zona de saída da turbina um deflector, [figura \(6.1\)](#), de modo a eliminar a instabilidade aerodinâmica e o ruído excessivo existentes no interior do colector de exaustão durante o funcionamento da turbina.

Neste capítulo, à semelhança dos capítulos anteriores, serão apresentados os registos visuais e dimensionais obtidos nas últimas inspeções a bordo do navio e as alterações realizadas no modelo numérico: geometria, condições fronteira e malha.

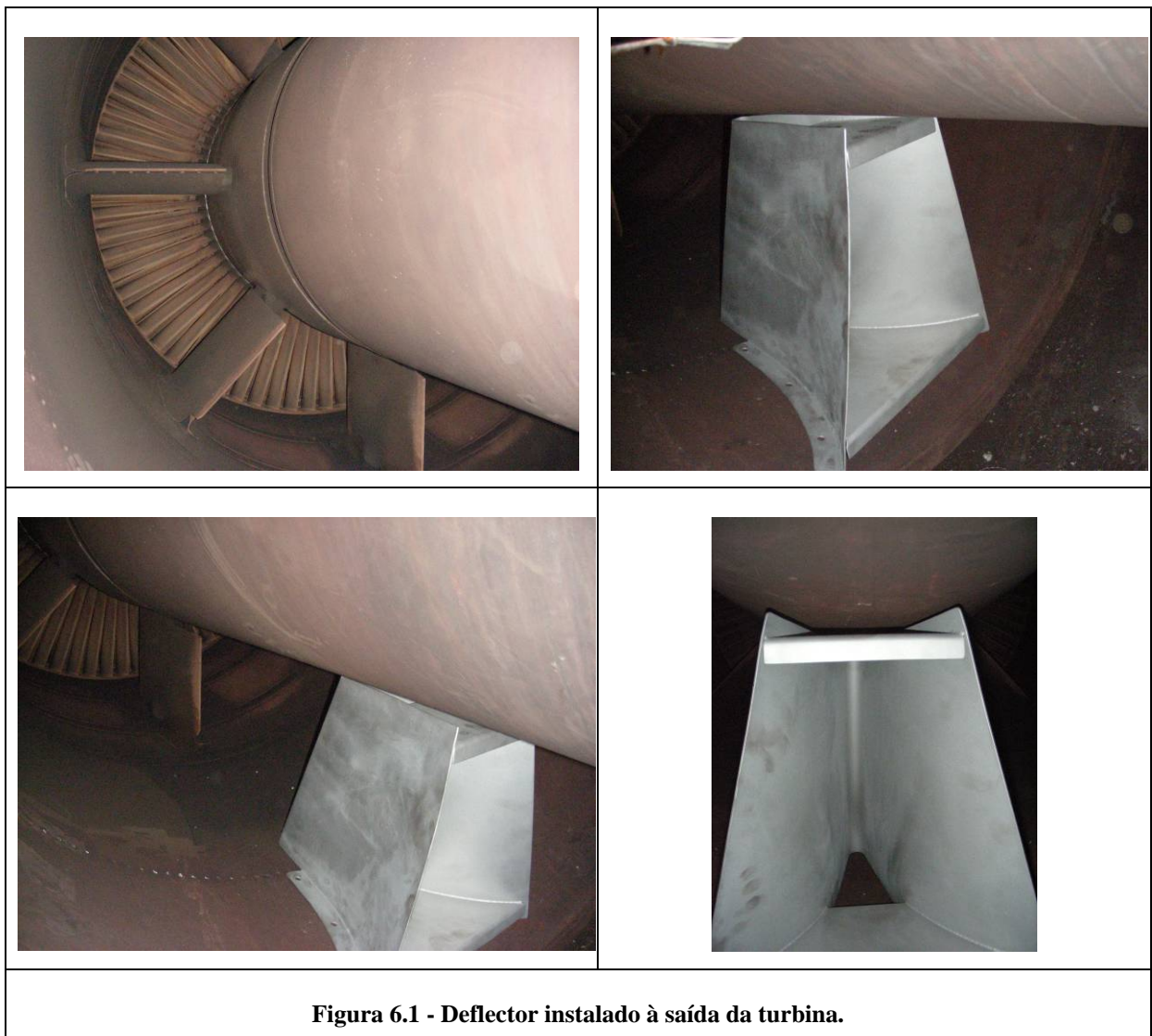
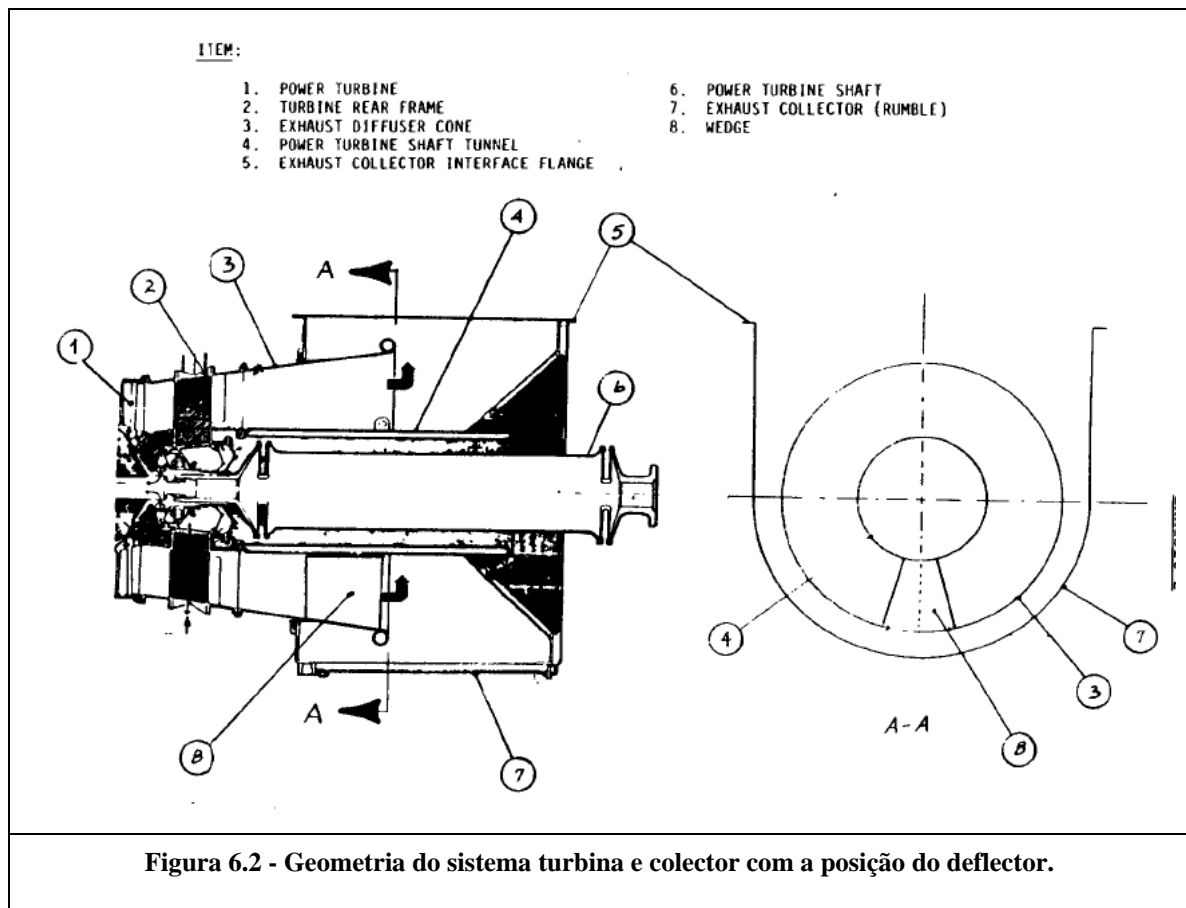


Figura 6.1 - Deflector instalado à saída da turbina.

6.1. Geometria

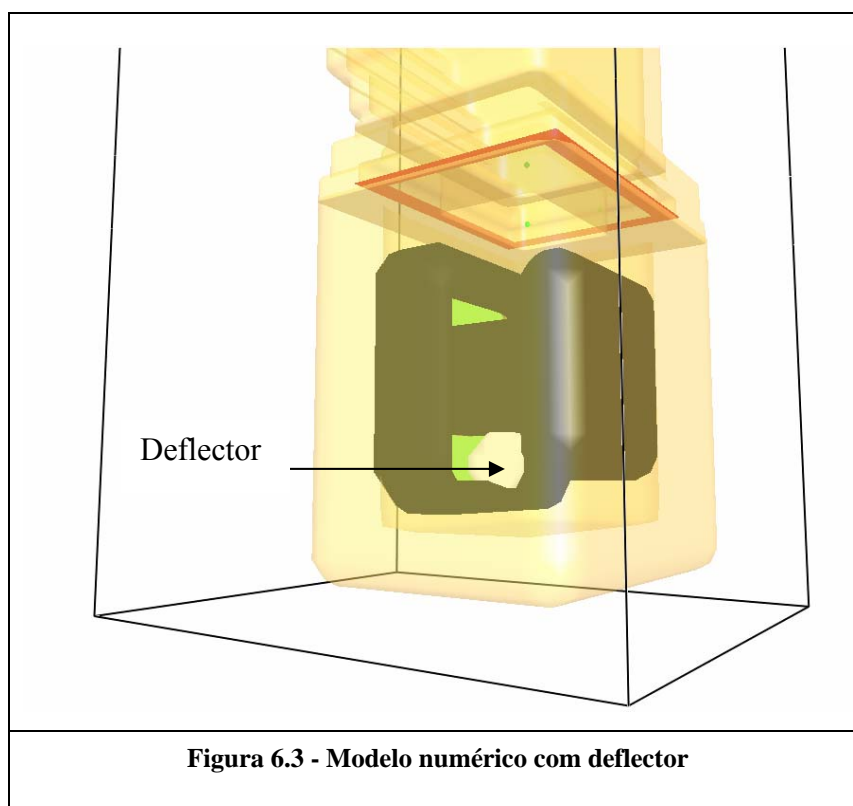
A configuração existente do ducto de exaustão não tem meios efectivos de direccionar os gases de exaustão em direcção à saída. Como resultado, os gases de exaustão tem um escoamento turbulento que resulta num aumento da pressão. A alteração geométrica realizada introduziu um deflector na posição das 6 horas do cone do ducto de exaustão, figura (6.2). O deflector irá alterar o escoamento dos produtos de combustão de modo a que se obtenha um escoamento menos turbulento na exaustão.



O deflector da maneira como foi concebido providencia a estabilidade aerodinâmica necessária, forçando o escoamento de exaustão a um escoamento menos turbulento que redirecciona os gases no sentido da saída do colector eliminando-se assim a instabilidade existente. O deflector mede aproximadamente 43 cm de altura, 40 cm de largura, 40 cm de comprimento e está fixo através de 6 parafusos ao cone do ducto de exaustão.

Em relação à geometria utilizada nos estudos apresentados no capítulo anterior, secção (5.1), e com o intuito de uma vez mais chegar a uma geometria que represente o modelo físico da forma o mais exacta possível, foram alteradas algumas dimensões da zona do colector nomeadamente a secção de entrada dos produtos da combustão (zona a verde) e de ar novo

(zona a vermelho), dimensões do cone do ducto de exaustão e zona de passagem do veio, de modo a manter os caudais fornecidos pelo fabricante foram recalculadas as velocidades para as novas áreas, por último foi introduzido um defusor à saída da turbina, figura (6.3).



6.2. Condições fronteira na entrada

Na última inspeção ao navio foi possível descer até ao interior do colector e registar as medidas reais da área de passagem dos gases provenientes da turbina e de ar novo. Assim para a secção de entrada dos gases provenientes da turbina foi registada uma área de $1,6 \text{ m}^2$ o que para o caudal e temperatura indicados pelo fabricante resulta num valor de velocidade de $80,7 \text{ m/s}$. Para o caudal de ar novo foi medido uma área de $0,9 \text{ m}^2$ o que resulta num valor de velocidade de $9,5 \text{ m/s}$. Estes valores foram calculados utilizando a equação (1.3) e os valores tabelados em [18] para a densidade do ar à respectiva temperatura.

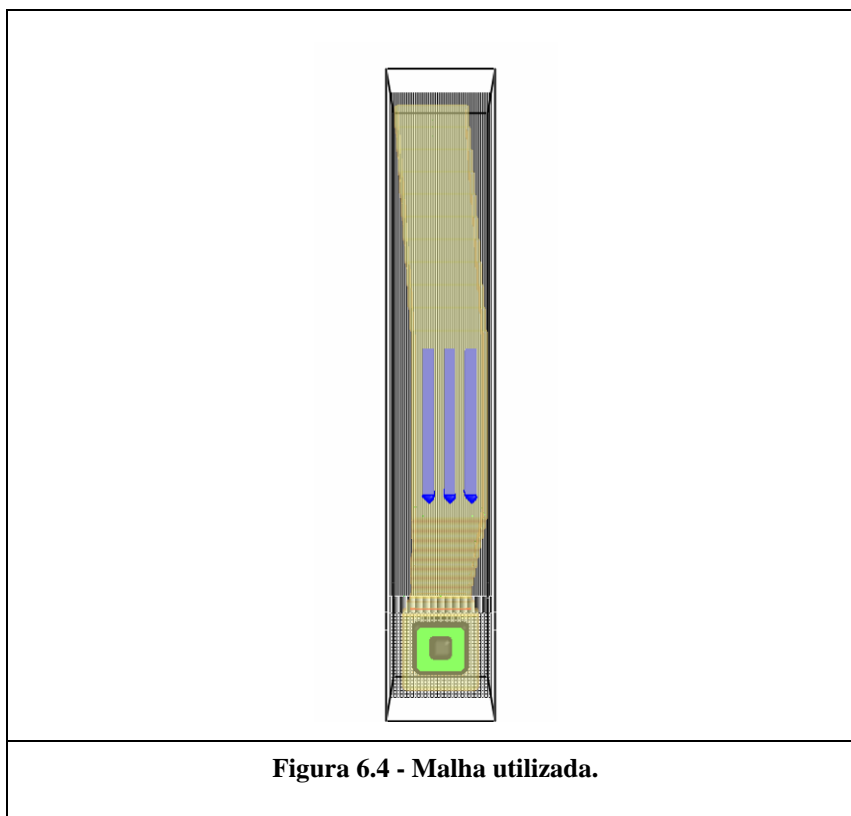
As condições de temperatura impostas nas respectivas superfícies foram mantidas, para o caudal de produtos da combustão uma temperatura de 566°C e para o caudal de ar novo uma temperatura de 85°C

6.3. Condições fronteira na parede

Nas simulações realizadas neste capítulo foram mantidas as condições fronteira na parede descritas no capítulo anterior, secção (5.3).

6.4. Refinamento da malha

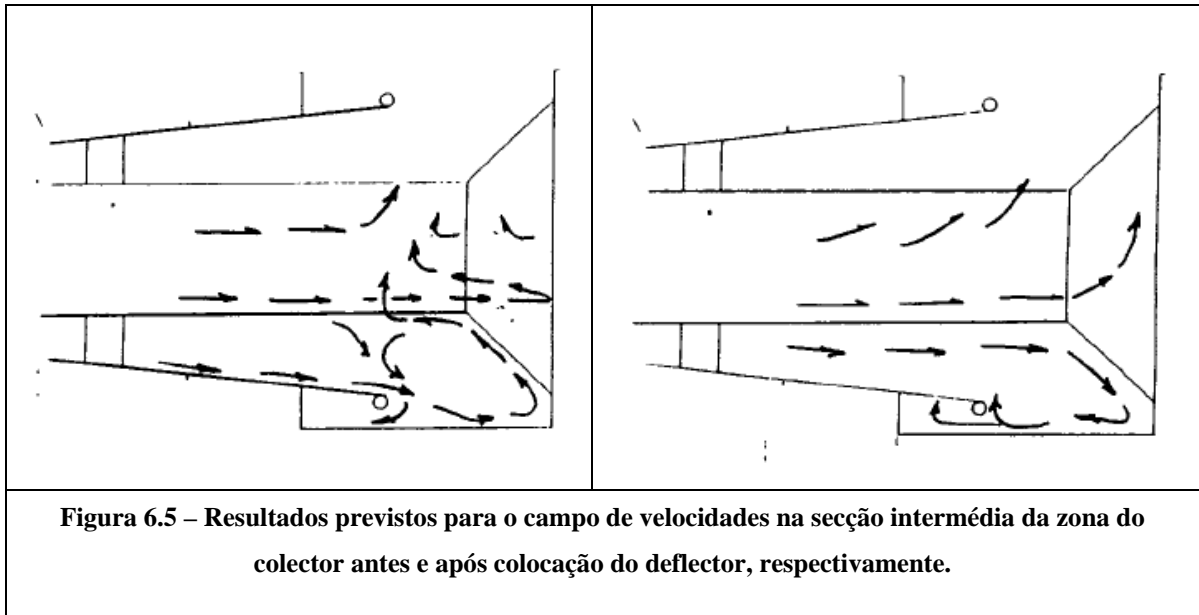
Através da experiência adquirida nas fases anteriores do estudo apresentado, no que respeita à construção da malha, foi definida uma malha idêntica às anteriores no que respeita às zonas de maior refinamento. Assim a malha utilizada apresenta três zonas de refinamentos distintos. A zona do colector e zona de mistura onde foi utilizada a discretização definida na secção (5.4). Na zona do colector foram utilizados elementos uniformes com 100 mm de lado e na zona de mistura foram utilizados elementos uniformes com 25 mm de lado. Na zona de interesse do estudo ou seja na conduta de evacuação utilizou-se uma malha mais refinada com elementos uniformes com 50x50x50 mm de comprimento segundo todas as direcções, figura (6.4). A malha è constituída por cerca de $1,7 \times 10^6$ volumes elementares.



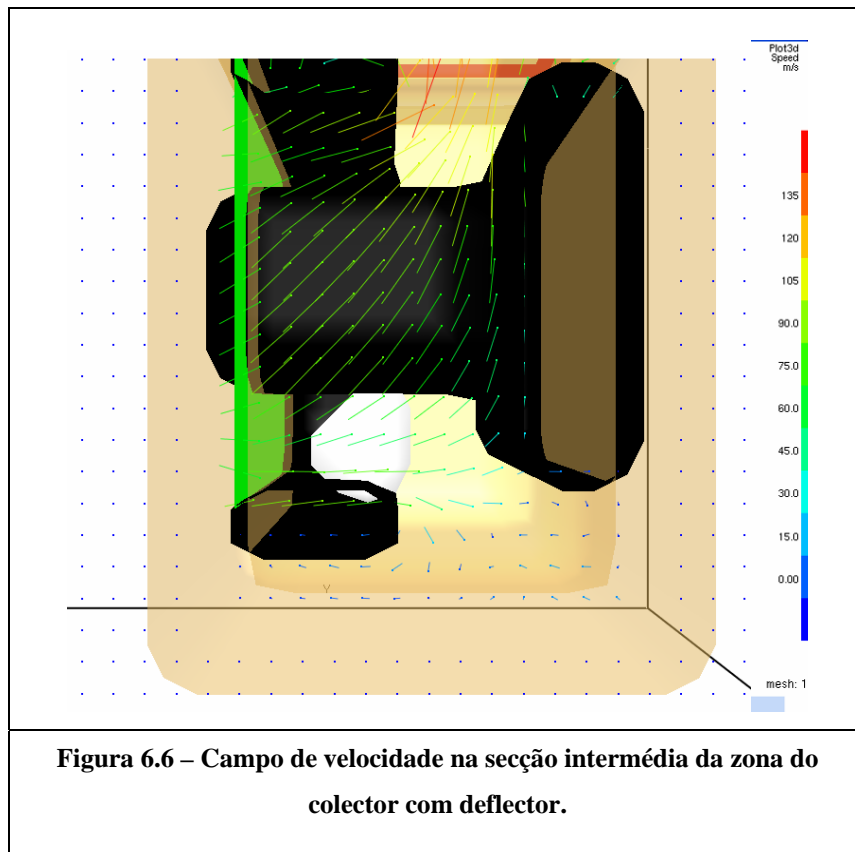
6.5. Análise e comparação de resultados

6.5.1. Campo de Velocidades

Como referido anteriormente a colocação de um deflector no cone do ducto de exaustão da turbina pretende diminuir a turbulência na exaustão e consequentemente evitar os problemas estruturais que possam estar associados a este fenómeno. Na figura seguinte evidenciam-se as alterações previstas, pelo fabricante, no escoamento após a colocação do deflector.



Estes resultados foram confirmados com os resultados obtidos através das simulações realizadas para o caso onde se encontra instalado o deflector, [figura \(6.6\)](#).



Os resultados apresentados indicam que a introdução do deflector poderá ter grande importância no modo como se desenvolve o escoamento na conduta e consequentemente nas causas que levam ao aparecimento de fissuras nas paredes da conduta. Para confirmar estas

hipóteses será de todo o interesse analisar e comparar os resultados apresentados no capítulo anterior com os resultados obtidos nas novas simulações, após introdução do deflector. No entanto, devido aos tempos de cálculo serem elevados não foi possível ter os resultados disponíveis a tempo de serem introduzidos nesta tese e de serem feitas as comparações necessárias.

7. Análise do escoamento no interior da conduta – Método experimental

Embora na altura em que foi entregue esta tese ainda não fosse possível apresentar resultados provenientes de medições experimentais, neste capítulo são apresentadas as características do esquema de aquisição que foi colocado na conduta, de modo a monitorizar os valores de velocidade e temperatura existentes durante o funcionamento do sistema de propulsão. Posteriormente os registos obtidos servirão para validar todo o trabalho numérico realizado e apresentado nos capítulos anteriores.

7.1. Descrição da instalação experimental

7.1.1. Ensaios prévios

Na fase de projecto do sistema de aquisição foram realizados ensaios de evolução da temperatura, cujo objectivo era verificar o funcionamento e adequabilidade dos termopares escolhidos na gama de temperaturas em estudo. Pretendia-se conhecer o comportamento dos termopares, desde uma temperatura próxima da ambiente, existente na zona onde se encontra a conduta, até uma temperatura próxima do valor máximo da temperatura no fluido 600°C. Deste modo é possível registar os valores de temperatura desde que é accionada a turbina até ser atingido um regime estacionário, onde o valor da temperatura na chapa seja aproximadamente constante, caracterizando-se assim o escoamento em regime transiente e estacionário. Embora as temperaturas referidas se encontrassem dentro dos valores de funcionamento dos termopares era necessário confirmar que, quer as bainhas dos termopares quer a soldadura (junção quente), não eram danificadas quando expostas a elevadas temperaturas.

Os ensaios prévios foram realizados numa das muflas disponibilizadas pelo Departamento de Edifícios, Núcleo de Revestimentos e Isolamentos do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. A mufla encontra-se calibrada para temperaturas entre os 300 e 600°C, segundo a recta apresentada na [figura \(7.1\)](#). Os termopares foram introduzidos na mufla e testados em patamares de temperatura de 50°C. Na [figura 7.2](#) pode-se ver o registo de cada termopar. Foram testados sete termopares, estando um deles sujeito à temperatura ambiente, termopar 7 [figura \(7.2\)](#). Os valores registados já se encontram corrigidos segundo a recta de calibração apresentada, uma vez que se programou a mufla para a temperatura corrigida. O

sistema de aquisição e de alimentação, que permitiram efectuar os registos, serão descritos mais à frente.

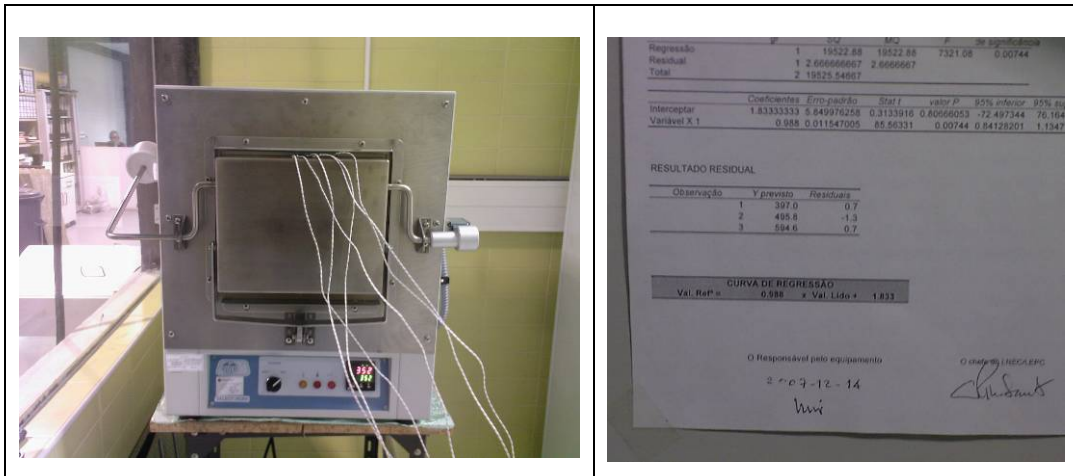
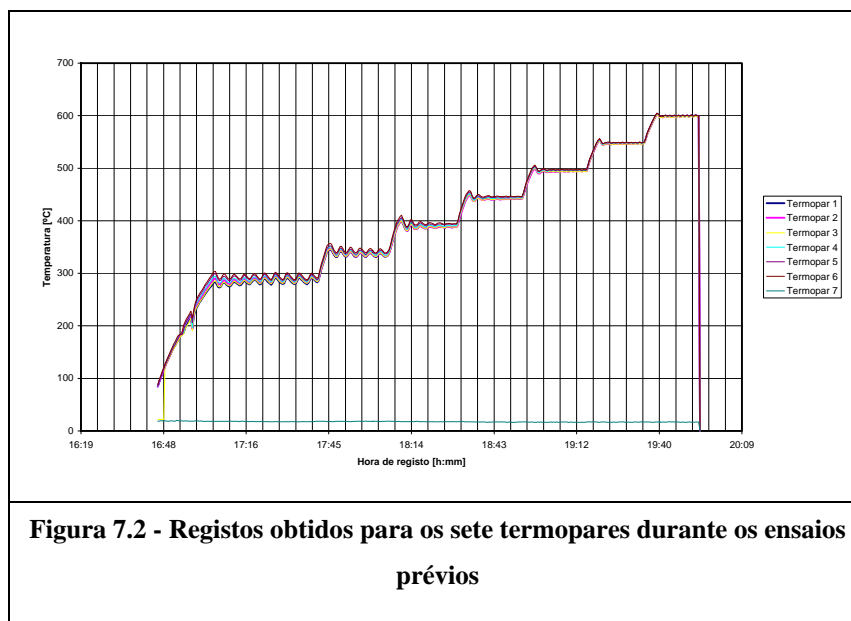


Figura 7.1 – Mufla e respectiva curva de calibração onde foram realizados os ensaios prévios

Os resultados destes ensaios prévios, figura (7.2), mostram que à medida que a temperatura aumenta os termopares mostram um comportamento mais constante entre si, desaparecendo as diferenças existentes nos primeiros patamares bem como as oscilações entre a temperatura lida para o mesmo termopar. Estes dois fenómenos podem ser explicados: o primeiro pela dimensão da junção quente de cada termopar. Embora se tenha tentado que as soldaduras fossem feitas da maneira mais próxima possível, existe sempre alguma diferença na sua dimensão o que contribui para a inércia do registo do termopar. A segunda está relacionada com o campo de temperaturas dentro da mufla. Nos patamares mais baixos é possível que existissem fluxos de ar no interior da mufla que levassem a oscilações no valor da temperatura registado. Apesar dos erros mencionados e tendo em conta os valores esperados e os valores obtidos nas simulações numéricas, estes termopares mostraram ser indicados para a utilização pretendida.



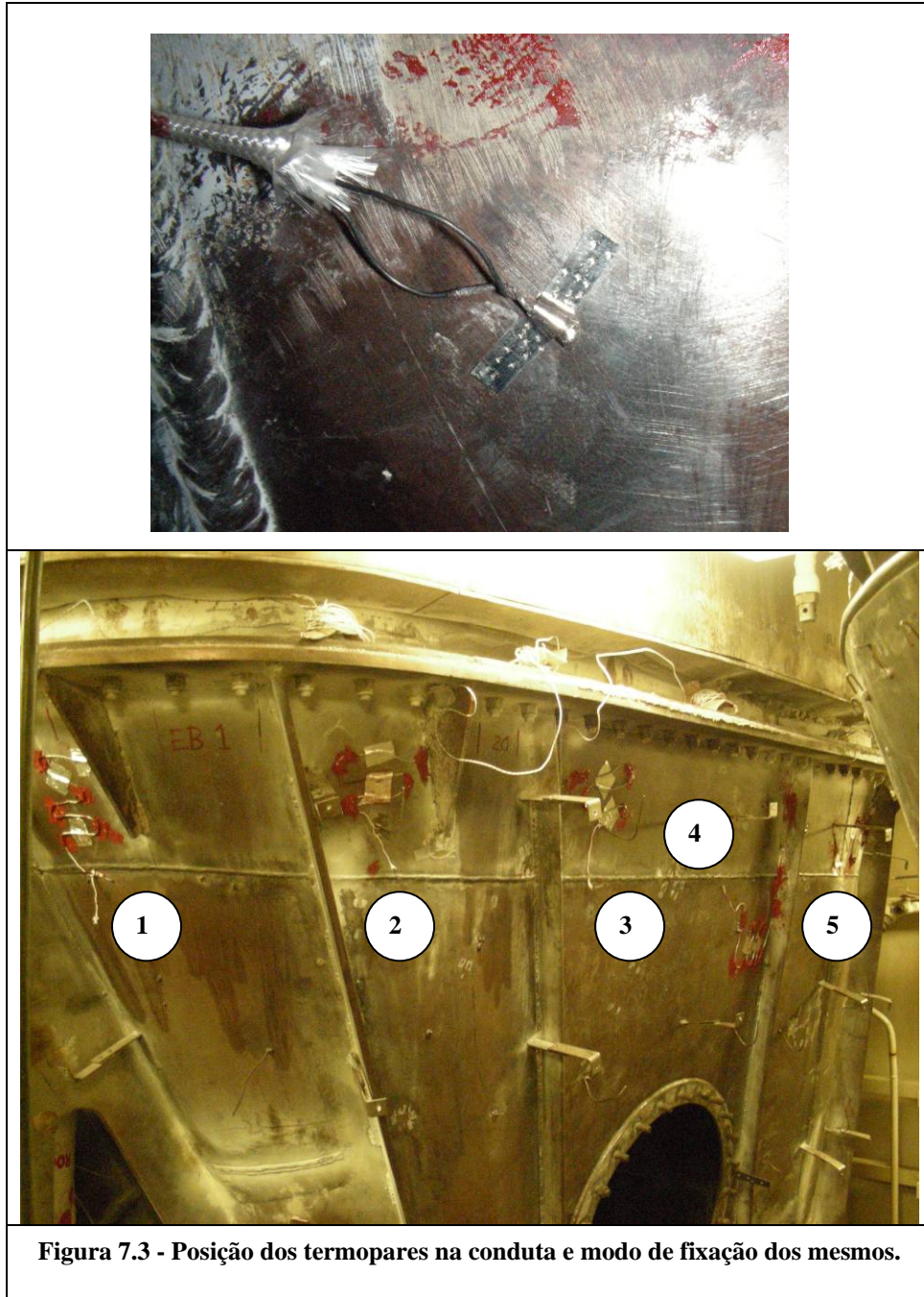
7.1.2. Posicionamento da instrumentação

De modo a validar os dados obtidos nas simulações numéricas do escoamento dos produtos de combustão, foi instrumentada uma das condutas existentes no navio, estando prevista a aquisição de valores de velocidade, temperatura e pressão nas condições normais de funcionamento. Os resultados obtidos serão utilizados para avaliar as solicitações térmicas e mecânicas na zona onde apareceram as fissuras, por forma a ser possível encontrar soluções para as “disfunções” detectadas.

Para que seja possível cumprir estes objectivos foram colocados dois tipos de dispositivos: termopares, para a obtenção da distribuição de temperaturas na zona de ocorrência de fissuras, e um tubo de pitot para a obtenção do valor da velocidade e pressão à saída da conduta.

Os termopares foram colocados na zona crítica onde ocorrem as fissuras. Foram colocados seis termopares em contacto com a parede da conduta e foi colocado um no exterior de modo a medir a temperatura ambiente durante o funcionamento do sistema. Os termopares em contacto com a parede interior da conduta foram fixos através de uma banda metálica que se encontra microsoldada por pontos à parede da conduta, assegurando o contacto da junção quente do termopar com a chapa, [figura \(7.3\)](#). Foram ainda utilizadas colas cerâmicas, de dois tipos, resistentes a altas temperaturas e uma fita de alumínio resistente a temperaturas elevadas, de modo a garantir a fixação dos cabos termopares. Para a escolha da localização de cada termopar foi necessário ter em conta algumas limitações como o acondicionamento dos termopares após a colocação do isolamento térmico, a possibilidade de fazer a passagem do cabo termopar até um local onde fosse possível fazê-lo passar para o exterior da conduta e o

posicionamento do sistema de aquisição de dados. Assim, tendo em conta os condicionantes referidos, posicionaram-se os termopares todos aproximadamente à mesma altura, a uma distância de cerca de 30 cm do final da zona inferior da conduta com um afastamento entre si aproximadamente constante de 40 cm, figura (7.3).



Na figura anterior não aparecem dois dos termopares instalados. O termopar de controlo da temperatura ambiente que, uma vez que não está fixo, pode ser posicionado numa qualquer posição que garanta o seu bom funcionamento. E um termopar que se encontra à

esquerda do termopar número um e cuja posição obedece às mesmas distâncias referidas anteriormente quer em termos de altura quer em termos de distância ao termopar número um. O tubo de pitot será fixo na estrutura existente à saída da conduta, [figura \(7.4\)](#), numa posição o mais central possível em relação ao escoamento. Serão utilizadas braçadeiras metálicas para a sua fixação.

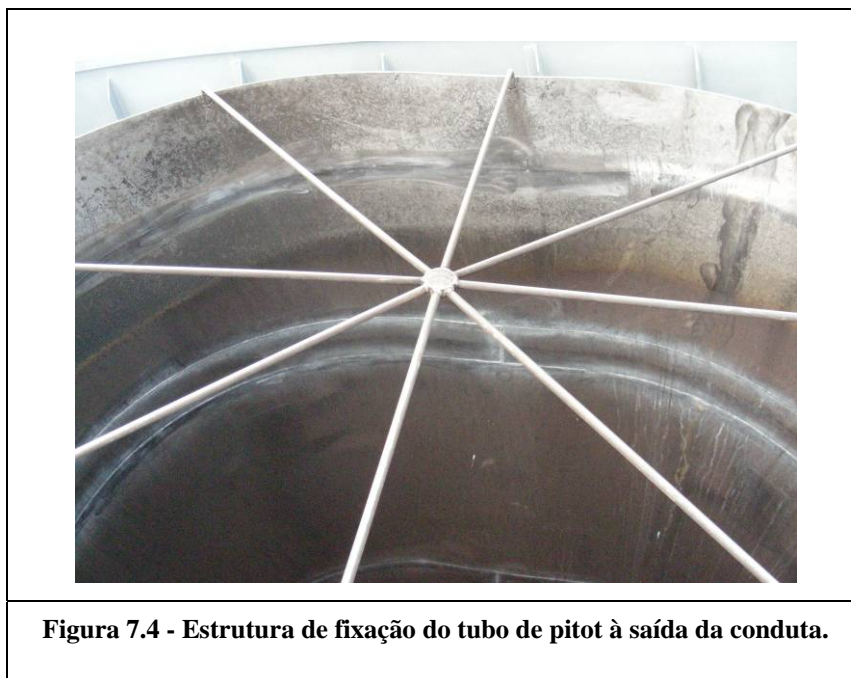


Figura 7.4 - Estrutura de fixação do tubo de pitot à saída da conduta.

7.2. Descrição da instrumentação

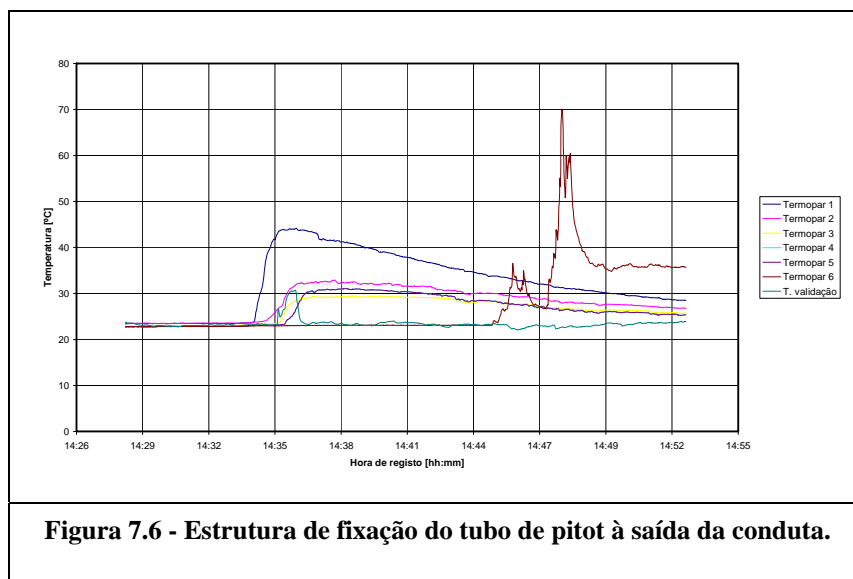
7.2.1. Medição da temperatura

O equipamento para medição da temperatura foi adquirido no âmbito deste trabalho. Foram utilizados termopares do tipo J (ferro-contantan, sendo o constantan uma liga de cobre com níquel) com os dois fios condutores com um diâmetro de 2,4 mm revestidos a fibra de vidro e com a referência OMEGAJI-24-SLE-60M. A gama de temperaturas de funcionamento destes termopares está compreendida entre 0°C e 700°C. Após a sua execução, a junção quente dos termopares ficou com uma forma aproximadamente esférica. Optou-se pela utilização de fios com diâmetro significativo uma vez que era necessário garantir uma resistência mecânica compatível com a operação de montagem da camada de isolamento térmico exterior.

De modo a verificar o funcionamento dos termopares, uma vez fixos na conduta, foi montado o sistema de aquisição de dados e identificado um canal para cada termopar. Procedeu-se ao aquecimento da chapa na vizinhança de cada um dos termopares utilizando para isso um maçarico, [figura \(7.5\)](#).



Na figura seguinte mostram-se os registos obtidos para cada um dos termopares após solicitados com a fonte de calor.



É possível verificar através do gráfico que todos os termopares respondem ao aumento da temperatura. Embora não seja possível aferir neste ensaio se as temperaturas registadas são as correctas, quando combinado este ensaio com o anterior na mufla (secção (7.1.1)), tudo aponta no sentido da adequação e eficiência do esquema de aquisição projectado. De referir ainda a diferença existente entre o tempo de arrefecimento entre o termopar de validação, que mede a temperatura ambiente, e os restantes termopares em contacto com a chapa. Como era de esperar o tempo de arrefecimento da chapa é bastante superior, este fenómeno é identificável nas curvas apresentadas, após o aquecimento brusco segue-se um arrefecimento lento semelhante em todos os termopares em contacto com a chapa.

7.2.2. Medição da velocidade

A medição das velocidades no decurso dos ensaios será realizada através da utilização de um tubo de pitot ligado a um micromanómetro através de um tubo de poliamida, [figura \(7.7\)](#). Este equipamento foi especificado e adquirido no âmbito deste trabalho.

O tubo de pitot utilizado tem um comprimento de 80 cm e um diâmetro externo de 8 mm. A temperatura de funcionamento deste pitot está compreendida entre os 0°C e os 600°C e permite a leitura de velocidades compreendidas entre os 0 e 100 m/s. O pitot devido às suas características construtivas, não tem a possibilidade de indicar a direcção do escoamento. Na sua montagem deve ficar o mais alinhado possível com o sentido do escoamento. De modo a ser possível a leitura das velocidades ou pressões do escoamento, o pitot funciona com uma saída em pressão, que deve ser lida num micromanómetro. As características do sistema de aquisição de dados são descritas no subcapítulo seguinte desta tese.

Para ligar o pitot ao sistema de aquisição de dados foi utilizado um tubo de poliamida revestido por PVC de referência PAN-V0-10X1.25-SW. O tubo tem um diâmetro interno de 8 mm e externo de 10 mm e suporta temperaturas compreendidas entre os 0°C e os 90°C. Esta característica limita o posicionamento do tubo às imediações do escoamento, uma vez que o tubo não pode estar em contacto directo com a zona de saída dos gases. A gama de pressões onde é garantido o bom desempenho do material está compreendida entre os 0,95 e 3 bar. O raio de curvatura mínimo é de 30mm.



Figura 7.7 – Pitot e tubo de poliamida utilizados para a medição de velocidades

7.2.3. Aquisição de dados e alimentação da instrumentação

O sistema de aquisição de dados é constituído por dois aparelhos. Um aparelho DataTaker para a aquisição dos registos dos termopares e um micromanómetro modelo PVM620 da Airflow para aquisição da velocidade e pressão à saída da conduta, figura (7.8).

Os termopares serão ligados directamente ao sistema de aquisição de dados, uma vez que a diferença de potencial induzida na junção quente é directamente mensurável por este sistema. Serão utilizados sete canais, um para cada termopar. O sistema de aquisição de dados dispensa a realização da junção fria dos termopares, pois procede à compensação da temperatura tendo como referência a temperatura do quadro de ligação dos termopares ao sistema de aquisição de dados. A gestão do aparelho de aquisição de dados e o registo dos dados em disco será realizado através de um computador portátil de modelo e características a definir tendo como requisitos mínimos os necessários à instalação do software do DT800.

O tubo de poliamida será ligado directamente ao micromanómetro, numa das tomadas de pressão que este dispõe. A aquisição será feita directamente no micromanómetro pois este permite controlar directamente o registo de dados na sua memória interna, sendo possível, posteriormente, descarregar os ficheiros, através de um cabo USB, para um computador portátil.

A alimentação dos aparelhos de aquisição de dados é garantida por bateria no caso do computador portátil e do DT800 e por pilhas no caso do micromanómetro. Para o caso de haver alguma falha está disponível no navio uma fonte de alimentação de 115V, figura (7.8), onde é possível ligar os aparelhos com o auxílio de um transformador também disponível no navio.



Figura 7.8 – Aparelhos de aquisição de dados DataTaker e PVM620, respectivamente. Fonte de alimentação disponível a bordo do navio.

7.2.4. Planificação dos ensaios

O objectivo fundamental dos ensaios consiste na aquisição de dados experimentais que permitam a validação das simulações numéricas realizadas e apresentadas nos capítulos anteriores. O procedimento adoptado consiste numa única aquisição, sem repetições, uma vez que devido à natureza da embarcação não existe grande disponibilidade para a repetição de ensaios. O ensaio será feito durante as provas de teste da embarcação depois do período de manutenção em que se encontra. As provas são feitas em alto mar numa zona de navegação onde é permitida a utilização das turbinas a gás como meio de propulsão.

De forma a captar o regime transiente e estacionário do escoamento no interior da conduta, e tendo como limitação a capacidade de memória disponível em cada uns dos aparelhos de aquisição de dados, pretende-se programar os aparelhos para um tempo de aquisição inicial mais curto, de segundo a segundo, de modo a captar o regime transiente e depois aumentar o tempo de aquisição, de modo a registar o regime estacionário ao longo de toda a viagem. Os tempos utilizados nesta programação são resultado dos valores obtidos nas simulações numéricas efectuadas.

8. Avaliação da resistência à corrosão de aços inoxidáveis

De modo a responder ao ponto C.2 apresentado na secção 1.3 foi encomendado ao LNEC, mais concretamente ao núcleo de Materiais Metálicos (NMM), ensaios que pudessem avaliar a resistência à corrosão dos dois tipos de ligas de aço em estudo. Neste capítulo serão apresentados alguns dos dados mais relevantes de cada ensaio realizado. Todas as características dos ensaios, bem como os resultados obtidos podem ser consultados em [19].

O Plano de ensaios elaborado para a avaliação do comportamento à corrosão das ligas de aço inoxidável inclui os seguintes ensaios:

- Ensaio cíclico de oxidação/corrosão em nevoeiro salino/secagem;
- Ensaio de imersão contínua
- Ensaio electroquímico

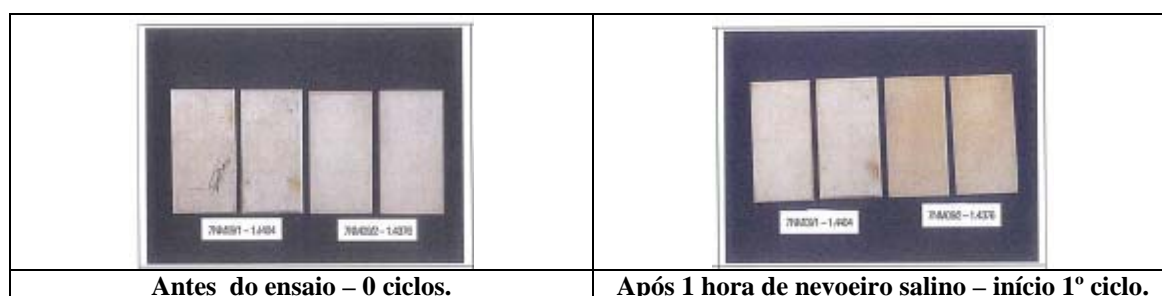
A definição das condições de exposição nos ensaios teve em conta as condições de funcionamento da conduta. O material de construção da conduta vai estar em contacto com condensados de gases de exaustão, em ambiente atmosférico marítimo. Assim, a solução corrosiva usada nos ensaios de imersão e electroquímico tem a composição indicada no quadro II, que pretende simular o condensado de gases de exaustão. O ensaio cíclico de oxidação/corrosão em nevoeiro salino/secagem pretende simular condições de exposição a uma atmosfera marítima húmida após o aquecimento resultante da passagem de gases a altas temperaturas.

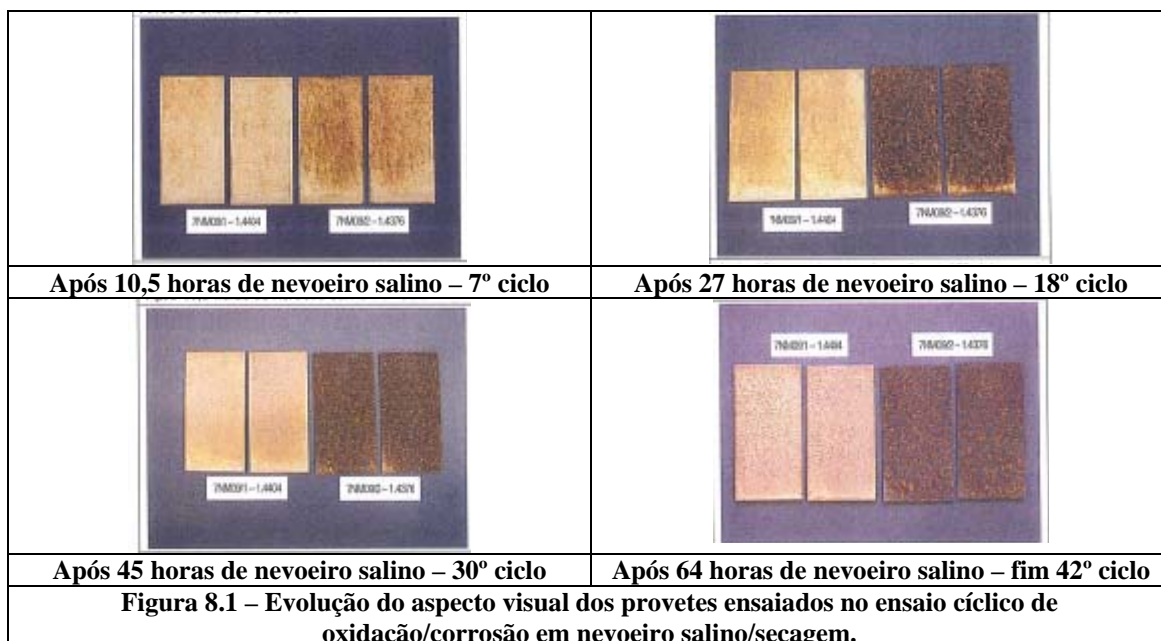
Cloretos, [Cl] mg/l	Sulfatos, [SO ₄ ²⁻] mg/l	Carbonatos, [CO ₃ ⁻] mg/l	Nitratos, [NO ₃ ⁻] mg/l	pH
100	100	100	100	3

Quadro 8.1– Composição da solução de simulação do condensado de gases de exaustão (adaptado de [20]).

8.1. Ensaio cíclico de oxidação/corrosão em nevoeiro salino/secagem

Após submetidas duas chapas de cada um dos aços em estudo às condições de ensaio descritas em [19] mostram-se alguns dos resultados mais relevantes obtidos (figura 8.1).

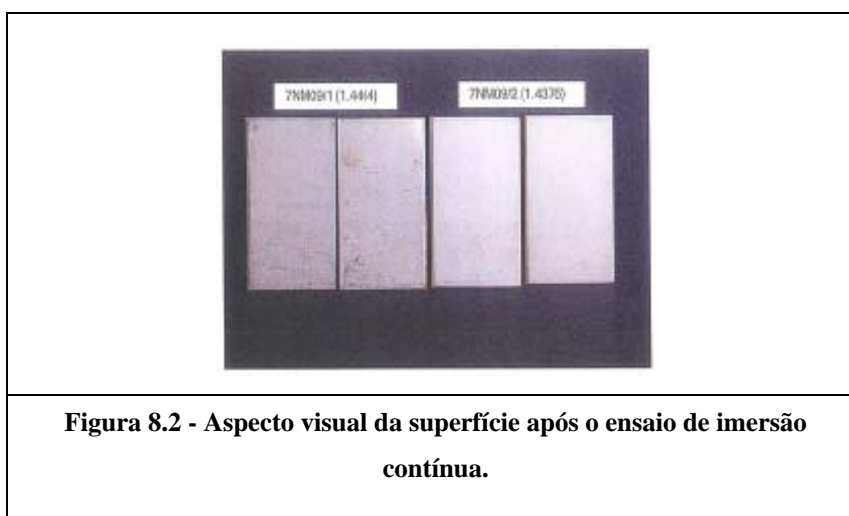




Verificou-se uma diferença muito significativa no comportamento à corrosão dos dois tipos de liga: ambas apresentam a superfície com corrosão generalizada por picadas, mas as chapas da amostra correspondente à liga 1.4376 têm corrosão bastante mais extensa e intensa (maior dimensão das picadas) do que as chapas da amostra correspondente à liga 1.4404. Esta diferença de comportamento foi notória logo desde o início do ensaio, durante os primeiros ciclos ([figura 8.1](#)).

8.2. Ensaio de imersão contínua

Após submetidas duas chapas de cada um dos aços em estudo às condições de ensaio descritas em [19] mostram-se de seguida alguns dos resultados mais relevantes obtidos.



Visualmente não existe diferença significativa no comportamento a corrosão dos dois tipos de liga: as chapas de ambas apresentam a superfície praticamente inalterada, apenas

ligeiramente mais brilhante, e sem produtos de corrosão visíveis. De modo a conseguir ter uma noção dos efeitos da corrosão em cada uma das ligas, após trinta dias de imersão, as chapas foram retiradas da imersão lavadas com água desionizada e pesadas após secagem. Os valores medidos são apresentados no quadro seguinte:

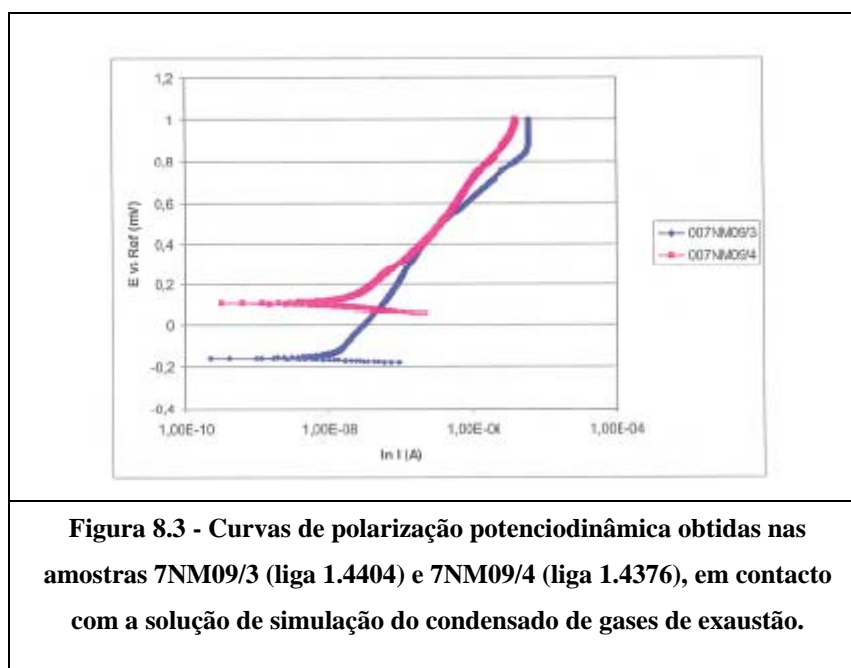
Amostra	Massa antes do ensaio [g]	Massa após ensaio [g]	Perda de massa [g]
7NM09/1C	116,8504	116,8485	0,0019
7NM09/1D	116,9324	116,9303	0,0021
7NM09/2C	98,7535	98,7484	0,0051
7NM09/2D	97,2211	97,2160	0,0051

Quadro 8.2– Massa das chapas antes e após o ensaio de imersão contínua.

As amostras 7NM09/1C e 7NM09/1D correspondem à liga 1.4404 e as amostras 7NM02/2C e 7NM09/2D à liga 1.4376.

8.3. Ensaio electroquímico

Por último e, no que respeita aos ensaios de corrosão, seguindo as condições de ensaio descritas em [19], obtiveram-se as curvas de polarização para ambas as amostras, figura 8.3.



O formato e a posição relativa das curvas de polarização revela que os dois tipos de liga têm um comportamento à corrosão muito semelhante, na solução de simulação do condensado de gases e exaustão. Ambas as amostras apresentam velocidades de corrosão muito baixas na solução de ensaio, o que evidencia a acção protectora da camada de óxidos que naturalmente

cobre a superfície deste tipo de ligas que, no caso da amostra 7NM09/3 (liga 1.4404) é ligeiramente mais passivante (protectora).

9. Conclusões e trabalhos futuros

Da análise dos resultados obtidos numa primeira fase do estudo verifica-se que os valores finais das grandezas que podem de algum modo contribuir para o problema em estudo são bastante próximos entre simulações realizadas com diferentes programas e com os valores medidos experimentalmente em outros trabalhos. A concordância entre resultados obtidos serviu para demonstrar a validade do *software* utilizado, o FDS, neste tipo de estudos.

Após a confirmação do bom funcionamento do *software* nas condições de estudo pretendidas foram realizados desenvolvimentos no sentido de tornar o escoamento o mais semelhante possível com o real. Nesse sentido, foram introduzidas alterações na geometria de entrada dos gases provenientes dos caudais de produtos da combustão e de ar novo e modificadas as condições de fronteira, de modo a serem adequadamente considerados os valores dos caudais, bem como a sua temperatura, nas respectivas zonas de entrada. Os resultados obtidos mostram a existência de uma zona do escoamento próxima da parede onde os valores de velocidade e temperatura são mais elevados. Os novos gradientes de temperatura no fluido obtidos na zona mais próxima da parede, no início do bordo de ataque dos atenuadores acústicos, onde se registam os maiores valores de pressão parecem indicar que realmente existe um contributo da temperatura no aparecimento da fissuração.

Por último e no que respeita aos desenvolvimentos realizados no modelo numérico, a introdução de um deflector altera o modo como é feita a admissão dos gases provenientes da combustão. A diminuição da turbulência do escoamento poderá diminuir alguns dos efeitos perniciosos associados ao campo de velocidades e temperaturas existentes na zona de início do bordo de ataque dos atenuadores acústicos, evidenciada pelos resultados obtidos numericamente. É de todo conveniente prosseguir os estudos já iniciados com o novo modelo numérico, de modo a comparar resultados e aferir quanto ao real contributo do deflector na diminuição dos fenómenos de fractura.

Em todos os desenvolvimentos realizados existiu a preocupação de adequar o modo de funcionamento do programa às características do escoamento, sobretudo no que diz respeito à discretização da malha. Para isso foi necessário ter em conta o fenómeno em estudo e proceder à avaliação dos resultados com sentido crítico.

Como resultado final de todo o trabalho numérico realizado, e tendo em conta a sua contribuição para a obtenção de uma solução final para o problema em estudo, obtiveram-se valores de temperatura da ordem dos 450°C e de pressão estática de 1500 Pa para a zona de início dos atenuadores acústicos que coincide com a zona de fissuração. Estes valores serão

tidos em consideração nos ensaios mecânicos a realizar, de modo a estudar o comportamento dos aços de referência 1.4404 e 1.4376, nas condições de funcionamento do sistema de exaustão.

De modo a validar os resultados obtidos através da modelação numérica foi instalado um sistema de aquisição de dados de temperatura e velocidade na conduta. Apesar de não ter sido possível a aquisição de dados até à data de entrega desta tese, como trabalhos futuros estão agendados a aquisição de dados, durante as provas de mar, de um dos navios que utilizam este sistema de propulsão, bem como a sua comparação com os resultados numéricos.

Os resultados obtidos no ensaio cíclico de oxidação/corrosão, em nevoeiro salino/secagem, mostram que o aço inoxidável do tipo 1.4376 tem uma resistência à corrosão bastante inferior à do aço inoxidável do tipo 1.4404, quando sujeito a temperaturas elevadas (350°), temperatura a que a conduta está sujeita durante o seu funcionamento, e subsequentemente exposto a um ambiente com uma elevada concentração de cloretos. Esta diferença de comportamento entre os dois tipos de liga foi patente após a primeira exposição à temperatura elevada: as superfícies das amostras da liga 1.4376 apresentavam mais oxidação do que a das amostras da liga 1.4404, e o desenvolvimento de corrosão foi mais acentuado logo desde os primeiros ciclos do ensaio, conduzindo à formação de mais e maiores picadas, e de uma maior quantidade de produtos de corrosão nas chapas da amostra da liga 1.4376.

Por outro lado, no ensaio de corrosão em imersão contínua, em que houve a exposição a um meio com menor teor de cloretos, apesar de conter outros agentes corrosivos como sulfatos e ser ácido (pH 3), mas sem a sujeição cíclica a temperaturas elevadas, ambos os tipos de liga revelaram uma boa resistência à corrosão, mesmo ao fim de trinta dias de exposição. As perdas de massa medidas para este período foram da ordem das 2 mg/dm e 5 mg/dm, que correspondem a velocidades de corrosão de cerca 0,007 g.m.f e 0,017, respectivamente, para as ligas 1.4404 e 1.4376. Estes valores são baixos, mas ainda assim revelam que, mesmo nestas condições, a liga 1.4404 tem uma resistência à corrosão ligeiramente superior à da liga 1.4376, facto que foi também indicado pelas curvas de polarização obtidas no ensaio electroquímico realizado com a mesma solução de ensaio.

10. Bibliografia

- [1]. Cruz, H. J., Projecto de Desenvolvimento Tecnológico de Conduatas de Evacuação dos Produtos da Combustão de Turbinas a Gás Utilizadas para Propulsão Naval, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, IST, (2008).
- [2]. Martins, R.F., Análise de Falha de Conduatas de Evacuação de Gases de Turbinas a Gás utilizadas para Propulsão Naval, Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica, IST, Maio de 2005.
- [3]. Branco, C. Moura, Martins, R.F., Fatigue behaviour of 316 grade austenitic stainless steel – Pipes at Elevated Temperature, FATIGUE 2000- Fatigue & Durability Assessment of Materials, Components and Structures, Cambridge. London: Chameleon Press LTD (Editors: M.R. Bache, P.A. Blackmore, J. Draper, J.H. Edwards, P. Roberts and J.R. Yates): 2000, p. 139-151, 10-12/04/2000, ISBN 1 901537 16 1.
- [4]. Martins, R.F., Moura Branco, C., A fatigue and creep study in austenitic stainless steel 316L used in exhaust pipes of naval gas turbines, Fatigue Fract Engng Mater Struct, 27, pp. 861-871, 2004.
- [5]. Martins, R.F., Branco, C.M., Gomes, E.C., A failure analysis study in exhaust tubes of naval gas turbine, ICEFA – 1, 1st International Conference on Engineering Failure Analysis, Lisbon University of Technology, Portugal, 2004.
- [6]. Martins, Rui Fernando, Branco, Carlos Moura, Gomes, Edgar C., Gonçalves-Coelho, António, Finite element analysis of a gas turbine exhaust system of a military navy ship, pp. 509-520, 9th Portuguese Conference on Fracture, Setúbal, 2004.
- [7]. Martins, Rui F., Branco, C.M., Gonçalves-Coelho, A., Gomes, E.C., (2006), “Metallurgical study of a AISI 316L stainless steel used in a gas turbine exhaust system”, Materials Science Forum, Advanced Materials Forum III (Ed. Paula Maria Vilarinho), Vol. 514-516, pp.1521, ISSN: 0255-5476, Trans Tech Publications Inc., Switzerland.
- [8]. Cruz, Hildebrando J.T., Martins, R.F., Viegas, João Carlos G., Aveiro, João L.G., Redesign of Exhaust System for Naval Gás Turbines: Usage of a New Cr-Mn Austenitic steel, IST, Materials 2009.
- [9]. Viegas, João C.G., Segurança Contra Incêndios em Edifícios – Modelação Matemática de Incêndios e Validação experimental, Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica, IST, Maio de 1999.

- [10]. Kevin McGrattan, Bryan Klein, Simo Hostikka, Jason Floyd. Fire Dynamics Simulator (version 5) User's Guide. NIST Special Publication 1019-5, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, January 2008.
- [11]. J. Smagorinsky. General Circulation Experiments with the Primitive Equations. I. The Basic Experiment. Monthly Weather Review, 91(3): 99-164, March 1963.
- [12]. J.P. Holman. Heat Transfer. McGraw-Hill, New York, 5th edition, 1989.
- [13]. W. Zhang, N. Ryder, R.J. Roby, and D.Carpenter. Modeling of the Combustion in Compartement Fires Using Large Eddy Simulation Approach. In Proceedings of 2001 Fall Techical Meeting, Eastern States Section. Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, December 2001.
- [14]. WWW.fire.nist.gov/fds/. – página online.
- [15]. Cruz, H. J., Aveiro, J.L., Viegas, J.C. e Martins, R.F., “Simulação Numérica do escoamento de um Sistema de Evacuação dos Produtos da Combustão através da utilização de dois Modelos de Turbulência – Comparação dos Resultados Obtidos”, Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería 2009, Barcelona, 29 Junho a 2 de Julho 2009.
- [16]. Cruz, H. J., Aveiro, J.L., Viegas, J.C. e Martins, R.F., “Simulação Numérica do escoamento de um Sistema Naval de Evacuação dos Produtos da Combustão”, III Conferência Nacional em mecânica de fluidos, termodinâmica e energia, Bragança, 17 a 18 de Setembro de 2009.
- [17]. Pina dos Santos. C., Matias, L. M., Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios. Informação Técnica de Edifícios n.º 50, Lisboa e LNEC 2006. ISBN: 972-49-2065-8.
- [18]. White, F.M, Mecânica dos Fluidos, 4ª Edição de McGraw-Hill, 2002.
- [19]. Nota Técnica 41/2009 – DM, Avaliação da Resistência à Corrosão de Aços Inoxidáveis, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Materiais Núcleo de Materiais Metálicos, Lisboa, Agosto de 2009.
- [20]. Doche et all, Corrosion Science, 48 (2006), 4080-4093.

Anexos

Escoamento numa conduta de evacuação de produtos da combustão de turbinas a gás utilizadas para propulsão naval

&HEAD CHID=' final ', TITLE=' conduta ' /

MALHA GROSSEIRA

CONDUTA INFERIOR

MALHA GROSSEIRA

&MESH ID=' Entrada_turbina ', IJK=30, 36, 25, XB=-1.50, 1.50, -2.30, 1.30, -2.8, -0.30, /

&MESH ID=' Entrada_ar ', IJK=120, 144, 20, XB=-1.50, 1.50, -2.30, 1.30, -0.30, 0.2, /

&MESH ID=' CONDUTA ', IJK=60, 72, 300 XB=-1.50, 1.50, -2.30, 1.30, 0.2, 15.2 /

REFINAMENTO DA MALHA

TRNZ I DERIV=1 CC=-0.3, PC=0.8, MESH_NUMBER=1 /

TRNZ CC=1.5, PC=0.9, MESH_NUMBER=3 /

TRNZ CC=3.3, PC=2.4, MESH_NUMBER=3 /

TRNZ CC=11.5, PC=8.5, MESH_NUMBER=3 /

CONDIÇÕES

&TIME TWFIN=6000.0, /

&MISC RADIATION=. FALSE., RESTART=. False., /

&MATERIAL ID=' PAREDES ', CONDUCTIVITY=11.4, SPECIFIC_HEAT=43.5, DENSITY=8190. /

&MATERIAL ID=' ISOLANTE ', CONDUCTIVITY=0.045, SPECIFIC_HEAT=754, DENSITY=100 /

&SURFACE ID=' ENTRADA_AR ', VEL=-12.0, TMP_FRONT=85., POROUS=. TRUE., COLOR=' RED ', /

&SURFACE ID=' ENTRADA_TURBINA ', VEL=-88.0, TMP_FRONT=566., POROUS=. TRUE., COLOR=' GREEN ', /

&SURFACE ID=' PAREDES ', MATERIAL_ID=' PAREDES ', ' ISOLANTE ', ' PAREDES ', THICKNESS=0.004, 0.125, 0.001, TRANSPARENCY=0.5, BACKING=' EXPOSED ' /

&SURFACE ID=' SILENCIADORES ', ADIABATIC=. TRUE. /

&SURFACE ID=' TURBINA ', COLOR=' BLACK ', ADIABATIC=. TRUE. /

&SURFACE ID=' DEFLECTOR ', COLOR=' WHITE ', ADIABATIC=. TRUE. /

Geometria

Conduta inferior

Paredes verticais

reforço no início da parede

&OBST XB=-0.90,0.90,-0.70,-0.55,0.1,0.25, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 1° degrau

&OBST XB=-0.90,0.90,0.60,0.50,0.1,0.30, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 1° degrau

Left wall

&OBST XB=-0.90,-0.80,-0.55,0.55,0.1,0.30, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 1° degrau

&OBST XB=-0.85,-0.80,-0.70,0.55,0.30,0.60, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 2° degrau

&OBST XB=-0.85,-0.80,-0.85,0.55,0.60,0.90, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 3° degrau

&OBST XB=-0.85,-0.80,-1.0,0.55,0.90,1.20, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 4° degrau

&OBST XB=-0.85,-0.80,-1.15,0.55,1.20,1.50, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 5° degrau

&OBST XB=-0.80,-0.75,-1.30,0.55,1.50,1.80, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 6° degrau

&OBST XB=-0.80,-0.75,-1.45,0.55,1.80,2.10, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 7° degrau

&OBST XB=-0.80,-0.75,-1.60,0.55,2.10,2.40, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 8° degrau

&OBST XB=-0.80,-0.75,-1.75,0.55,2.40,2.70, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 9° degrau

&OBST XB=-0.80,-0.75,-1.90,0.55,2.70,3.00, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 10° degrau

Back wall

&OBST XB=-0.85,0.85,0.60,0.55,0.1,0.30, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 1° degrau

&OBST XB=-0.85,0.90,0.60,0.55,0.30,0.60, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 2° degrau

&OBST XB=-0.85,0.95,0.60,0.55,0.60,0.90, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 3° degrau

&OBST XB=-0.85,1.0,0.60,0.55,0.90,1.20, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 4° degrau

&OBST XB=-0.85,1.05,0.60,0.55,1.20,1.50, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 5° degrau

&OBST XB=-0.80,1.10,0.65,0.55,1.50,1.80, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 7° degrau

&OBST XB=-0.80, 1.15, 0.60, 0.55, 1.80, 2.10, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 8° degrau

&OBST XB=-0.80, 1.20, 0.60, 0.55, 2.10, 2.40, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 9° degrau

&OBST XB=-0.80, 1.25, 0.60, 0.55, 2.40, 2.70, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 10° degrau

&OBST XB=-0.80, 1.30, 0.60, 0.55, 2.70, 3.00, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 11° degrau

Right wall

&OBST XB=0.80, 0.90, -0.55, 0.55, 0.1, 0.30, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 1° degrau

&OBST XB=0.85, 0.90, -0.70, 0.55, 0.30, 0.60, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 2° degrau

&OBST XB=0.90, 0.95, -0.85, 0.55, 0.60, 0.90, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 3° degrau

&OBST XB=0.95, 1.0, -1.0, 0.55, 0.90, 1.20, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 4° degrau

&OBST XB=1.0, 1.05, -1.15, 0.55, 1.20, 1.50, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 5° degrau

&OBST XB=1.05, 1.10, -1.30, 0.55, 1.50, 1.80, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 7° degrau

&OBST XB=1.10, 1.15, -1.45, 0.55, 1.80, 2.10, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 8° degrau

&OBST XB=1.15, 1.20, -1.60, 0.55, 2.10, 2.40, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 9° degrau

&OBST XB=1.20, 1.25, -1.75, 0.55, 2.40, 2.70, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 10° degrau

&OBST XB=1.25, 1.30, -1.90, 0.55, 2.70, 3.00, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 11° degrau

Front wall

&OBST XB=-0.85, 0.85, -0.65, -0.55, 0.1, 0.25, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 1° degrau

&OBST XB=-0.85, 0.90, -0.75, -0.70, 0.30, 0.55, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 2° degrau

&OBST XB=-0.85, 0.95, -0.90, -0.85, 0.60, 0.85, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 3° degrau

&OBST XB=-0.85, 1.00, -1.05, -1.00, 0.90, 1.15, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 4° degrau

&OBST XB=-0.85, 1.05, -1.20, -1.15, 1.20, 1.45, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 5° degrau

&OBST XB=-0.80, 1.10, -1.35, -1.30, 1.50, 1.75, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 6° degrau

&OBST XB=-0.80, 1.15, -1.50, -1.45, 1.80, 2.05, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE. / 7° degrau

&OBST XB=-0.80, 1.20, -1.65, -1.60, 2.10, 2.35, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE. / 8° degrau

&OBST XB=-0.80, 1.25, -1.80, -1.75, 2.40, 2.65, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE. / 9° degrau

&OBST XB=-0.80, 1.30, -1.95, -1.90, 2.70, 3.00, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE. / 10° degrau

Paredes horizontais

Front

&OBST XB=-0.85, 0.85, -0.55, -0.70, 0.25, 0.30, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE. / 1° degrau

&OBST XB=-0.85, 0.90, -0.70, -0.85, 0.55, 0.60, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE. / 2° degrau

&OBST XB=-0.85, 0.95, -0.85, -1.00, 0.85, 0.90, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE. / 3° degrau

&OBST XB=-0.85, 1.00, -1.00, -1.15, 1.15, 1.20, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE. / 4° degrau

&OBST XB=-0.85, 1.05, -1.15, -1.30, 1.45, 1.50, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE. / 5° degrau

&OBST XB=-0.80, 1.10, -1.30, -1.45, 1.75, 1.80, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE. / 6° degrau

&OBST XB=-0.80, 1.15, -1.45, -1.60, 2.05, 2.10, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE. / 7° degrau

&OBST XB=-0.80, 1.20, -1.60, -1.75, 2.35, 2.40, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE. / 8° degrau

&OBST XB=-0.80, 1.25, -1.75, -1.90, 2.65, 2.70, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE. / 9° degrau

Conduta central

Paredes verticais

&OBST XB=-0.80, -0.75, -1.90, 0.55, 3.00, 7.50, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE., / Left wall

&OBST XB=1.25, 1.30, -1.90, 0.55, 3.00, 7.50, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE., / Right wall

&OBST XB=-0.80, 1.30, -1.95, -1.90, 3.00, 7.50, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE., / Front wall

&OBST XB=-0.80, 1.30, 0.60, 0.55, 3.00, 7.50, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE., / Back wall

Silenciadores

Central

&OBST XB=0.1, 0.4, 0.55, -1.90, 3.4, 7.5, SURF_ID='SILENCIADORES',
THICKEN=.TRUE. COLOR='BLUE' /

&OBST XB=0.1, 0.4, 0.55, -1.90, 3.3, 3.4 , SURF_ID='SI LENCI ADORES' ,
SAWTOOTH=. FALSE. , THICKEN=. TRUE. COLOR=' BLUE' /

&OBST XB=0.125, 0.375, 0.55, -1.90, 3.275, 3.3
, SURF_ID='SI LENCI ADORES' , SAWTOOTH=. FALSE. , THICKEN=. TRUE. COLOR=' BLUE' /

&OBST XB=0.15, 0.35, 0.55, -1.90, 3.25, 3.275 , SURF_ID='SI LENCI ADORES' ,
SAWTOOTH=. FALSE. , THICKEN=. TRUE. COLOR=' BLUE' /

&OBST XB=0.175, 0.325, 0.55, -1.90, 3.225, 3.25
, SURF_ID='SI LENCI ADORES' , SAWTOOTH=. FALSE. , THICKEN=. TRUE. COLOR=' BLUE' /

&OBST XB=0.2, 0.3, 0.55, -1.90, 3.2, 3.225 , SURF_ID='SI LENCI ADORES' ,
SAWTOOTH=. FALSE. , THICKEN=. TRUE. COLOR=' BLUE' /

&OBST XB=0.225, 0.275, 0.55, -1.90, 3.175, 3.2
, SURF_ID='SI LENCI ADORES' , SAWTOOTH=. FALSE. , THICKEN=. TRUE. COLOR=' BLUE' /

Esquerdo

&OBST XB=-0.5, -0.2, 0.55, -1.90, 3.4, 7.5 , SURF_ID='SI LENCI ADORES' ,
THICKEN=. TRUE. COLOR=' BLUE' /

&OBST XB=-0.5, -0.2, 0.55, -1.90, 3.3, 3.4 , SURF_ID='SI LENCI ADORES' ,
SAWTOOTH=. FALSE. , THICKEN=. TRUE. COLOR=' BLUE' /

&OBST XB=-0.475, -0.225, 0.55, -1.90, 3.275, 3.3
SURF_ID='SI LENCI ADORES' , SAWTOOTH=. FALSE. , THICKEN=. TRUE. COLOR=' BLUE' /

&OBST XB=-0.45, -0.25, 0.55, -1.90, 3.25, 3.275
SURF_ID='SI LENCI ADORES' , SAWTOOTH=. FALSE. , THICKEN=. TRUE. COLOR=' BLUE' /

&OBST XB=-0.425, -0.275, 0.55, -1.90, 3.225, 3.25
SURF_ID='SI LENCI ADORES' , SAWTOOTH=. FALSE. , THICKEN=. TRUE. COLOR=' BLUE' /

&OBST XB=-0.4, -0.3, 0.55, -1.90, 3.2, 3.225
SURF_ID='SI LENCI ADORES' , SAWTOOTH=. FALSE. , THICKEN=. TRUE. COLOR=' BLUE' /

&OBST XB=-0.375, -0.325, 0.55, -1.90, 3.175, 3.2
SURF_ID='SI LENCI ADORES' , SAWTOOTH=. FALSE. , THICKEN=. TRUE. COLOR=' BLUE' /

Di rei to

&OBST XB=0.7, 1.0, 0.55, -1.90, 3.4, 7.5 , SURF_ID='SI LENCI ADORES' ,
THICKEN=. TRUE. COLOR=' BLUE' /

&OBST XB=0.7, 1.0, 0.55, -1.90, 3.3, 3.4 , SURF_ID='SI LENCI ADORES' ,
SAWTOOTH=. FALSE. , THICKEN=. TRUE. COLOR=' BLUE' /

&OBST XB=0.725, 0.975, 0.55, -1.90, 3.275, 3.3
, SURF_ID='SI LENCI ADORES' , SAWTOOTH=. FALSE. , THICKEN=. TRUE. COLOR=' BLUE' /

&OBST XB=0.75, 0.95, 0.55, -1.90, 3.25, 3.275
, SURF_ID='SI LENCI ADORES' , SAWTOOTH=. FALSE. , THICKEN=. TRUE. COLOR=' BLUE' /

&OBST XB=0.775, 0.925, 0.55, -1.90, 3.225, 3.25
, SURF_ID='SI LENCI ADORES' , SAWTOOTH=. FALSE. , THICKEN=. TRUE. COLOR=' BLUE' /

&OBST XB=0.8, 0.9, 0.55, -1.90, 3.2, 3.225
, SURF_ID='SI LENCI ADORES' , SAWTOOTH=. FALSE. , THICKEN=. TRUE. COLOR=' BLUE' /

&OBST XB=0.825, 0.875, 0.55, -1.90, 3.175, 3.2
, SURF_ID='SI LENCI ADORES' , SAWTOOTH=. FALSE. , THICKEN=. TRUE. COLOR=' BLUE' /

C0nduta superior

Paredes verticais

Left wall

&OBST XB=-0.80, -0.75, -1.90, 0.55, 7.50, 8.00, SURF_ID=' PAREDES', THICKEN=. TRUE. / 1ºdegrau SAWTOOTH=. FALSE. ,

&OBST XB=-0.85, -0.80, -1.85, 0.60, 8.00, 8.65, SURF_ID=' PAREDES', THICKEN=. TRUE. / 2ºdegrau SAWTOOTH=. FALSE. ,

&OBST XB=-0.90, -0.85, -1.80, 0.65, 8.65, 9.30, SURF_ID=' PAREDES', THICKEN=. TRUE. / 3ºdegrau SAWTOOTH=. FALSE. ,

&OBST XB=-0.95, -0.90, -1.75, 0.70, 9.30, 9.95, SURF_ID=' PAREDES', THICKEN=. TRUE. / 4ºdegrau SAWTOOTH=. FALSE. ,

&OBST XB=-1.00, -0.95, -1.70, 0.75, 9.95, 10.60, SURF_ID=' PAREDES', THICKEN=. TRUE. / 5ºdegrau SAWTOOTH=. FALSE. ,

&OBST XB=-1.05, -1.00, -1.65, 0.80, 10.60, 11.25, SURF_ID=' PAREDES', THICKEN=. TRUE. / 6ºdegrau SAWTOOTH=. FALSE. ,

&OBST XB=-1.10, -1.05, -1.60, 0.85, 11.25, 11.90, SURF_ID=' PAREDES', THICKEN=. TRUE. / 7ºdegrau SAWTOOTH=. FALSE. ,

&OBST XB=-1.15, -1.10, -1.55, 0.90, 11.90, 12.55, SURF_ID=' PAREDES', THICKEN=. TRUE. / 8ºdegrau SAWTOOTH=. FALSE. ,

&OBST XB=-1.20, -1.15, -1.50, 0.95, 12.55, 13.20, SURF_ID=' PAREDES', THICKEN=. TRUE. / 9ºdegrau SAWTOOTH=. FALSE. ,

&OBST XB=-1.25, -1.20, -1.45, 1.00, 13.20, 13.85, SURF_ID=' PAREDES', THICKEN=. TRUE. / 10ºdegrau SAWTOOTH=. FALSE. ,

&OBST XB=-1.30, -1.25, -1.40, 1.05, 13.85, 14.5, SURF_ID=' PAREDES', THICKEN=. TRUE. / 10ºdegrau SAWTOOTH=. FALSE. ,

Right wall

&OBST XB=1.25, 1.30, -1.90, 0.55, 7.50, 8.00, SURF_ID=' PAREDES', THICKEN=. TRUE. / 1ºdegrau SAWTOOTH=. FALSE. ,

&OBST XB=1.20, 1.25, -1.85, 0.60, 8.00, 8.65, SURF_ID=' PAREDES', THICKEN=. TRUE. / 2ºdegrau SAWTOOTH=. FALSE. ,

&OBST XB=1.15, 1.20, -1.80, 0.65, 8.65, 9.30, SURF_ID=' PAREDES', THICKEN=. TRUE. / 3ºdegrau SAWTOOTH=. FALSE. ,

&OBST XB=1.10, 1.15, -1.75, 0.70, 9.30, 9.95, SURF_ID=' PAREDES', THICKEN=. TRUE. / 4ºdegrau SAWTOOTH=. FALSE. ,

&OBST XB=1.05, 1.10, -1.70, 0.75, 9.95, 10.60, SURF_ID=' PAREDES', THICKEN=. TRUE. / 5ºdegrau SAWTOOTH=. FALSE. ,

&OBST XB=1.00, 1.05, -1.65, 0.80, 10.60, 11.25, SURF_ID=' PAREDES', THICKEN=. TRUE. / 6ºdegrau SAWTOOTH=. FALSE. ,

&OBST XB=0.95, 1.00, -1.60, 0.85, 11.25, 11.90, SURF_ID=' PAREDES', THICKEN=. TRUE. / 7ºdegrau SAWTOOTH=. FALSE. ,

&OBST XB=0.90, 0.95, -1.55, 0.90, 11.90, 12.55, SURF_ID=' PAREDES', THICKEN=. TRUE. / 8ºdegrau SAWTOOTH=. FALSE. ,

&OBST XB=0.85, 0.90, -1.50, 0.95, 12.55, 13.20, SURF_ID=' PAREDES', THICKEN=. TRUE. / 9ºdegrau SAWTOOTH=. FALSE. ,

&OBST XB=0.80,0.85,-1.45,1.00,13.20,13.85, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 10°degrau

&OBST XB=0.75,0.80,-1.40,1.05,13.85,14.5, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 10°degrau

Front wall

&OBST XB=-0.80,1.30,-1.95,-1.90,7.50,8.00, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 1°degrau

&OBST XB=-0.85,1.25,-1.90,-1.85,8.00,8.65, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 2°degrau

&OBST XB=-0.90,1.20,-1.85,-1.80,8.65,9.30, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 3°degrau

&OBST XB=-0.95,1.15,-1.80,-1.75,9.30,9.95, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 4°degrau

&OBST XB=-1.00,1.10,-1.75,-1.70,9.95,10.60, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 5°degrau

&OBST XB=-1.05,1.05,-1.70,-1.65,10.60,11.25, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 6°degrau

&OBST XB=-1.10,1.00,-1.65,-1.60,11.25,11.90, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 7°degrau

&OBST XB=-1.15,0.95,-1.60,-1.55,11.90,12.55, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 8°degrau

&OBST XB=-1.20,0.90,-1.55,-1.50,12.55,13.20, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 9°degrau

&OBST XB=-1.25,0.85,-1.50,-1.45,13.20,13.85, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 10°degrau

&OBST XB=-1.30,0.80,-1.45,-1.40,13.85,14.5, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 10°degrau

Back wall

&OBST XB=-0.80,1.30,0.60,0.55,7.50,8.00, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 1°degrau

&OBST XB=-0.85,1.25,0.65,0.60,8.00,8.65, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 2°degrau

&OBST XB=-0.90,1.20,0.70,0.65,8.65,9.30, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 3°degrau

&OBST XB=-0.95,1.15,0.75,0.70,9.30,9.95, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 4°degrau

&OBST XB=-1.00,1.10,0.80,0.75,9.95,10.60, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 5°degrau

&OBST XB=-1.05,1.05,0.85,0.80,10.60,11.25, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 6°degrau

&OBST XB=-1.10,1.00,0.90,0.85,11.25,11.90, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 7°degrau

&OBST XB=-1.15,0.95,0.95,0.90,11.90,12.55, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 8ºdegrau

&OBST XB=-1.20,0.90,1.00,0.95,12.55,13.20, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./ 9ºdegrau

&OBST XB=-1.25,0.85,1.05,1.00,13.20,13.85, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./10ºdegrau

&OBST XB=-1.30,0.80,1.10,1.05,13.85,14.5, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./10ºdegrau

Veio da turbina

&OBST XB=-0.60,0.60,0.65,0.25,-0.70,-1.90, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='TURBINA', THICKEN=.TRUE., PERMIT_HOLE=.FALSE./

&OBST XB=-0.30,0.30,-0.70,0.5,-1.00,-1.60, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='TURBINA', THICKEN=.TRUE., PERMIT_HOLE=.FALSE./

&OBST XB=-0.75,-0.7,-0.65,-0.15,-0.65,-2.05, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='TURBINA', THICKEN=.TRUE., PERMIT_HOLE=.FALSE./

&OBST XB=0.7,0.75,-0.65,-0.15,-0.65,-2.05, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='TURBINA', THICKEN=.TRUE., PERMIT_HOLE=.FALSE./

&OBST XB=-0.70,0.7,-0.65,-0.15,-2.0,-2.05, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='TURBINA', THICKEN=.TRUE., PERMIT_HOLE=.FALSE./

&OBST XB=-0.70,0.7,-0.65,-0.15,-0.6,-0.65, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='TURBINA', THICKEN=.TRUE., PERMIT_HOLE=.FALSE./

Deflector

&OBST XB=-0.05,0.05,-0.45,-0.25,-2.0,-1.70, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='DEFLECTOR', THICKEN=.TRUE., PERMIT_HOLE=.FALSE./

&OBST XB=-0.15,0.15,-0.25,-0.15,-2.0,-1.60, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='DEFLECTOR', THICKEN=.TRUE., PERMIT_HOLE=.FALSE./

Entrada na Conduita

&OBST XB=-0.615,0.615,-0.440,0.440,-0.160,0.05, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./

&OBST XB=-1.1,1.1,-0.8,0.8,-2.50,-0.15, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./

&HOLE XB=-0.515,0.515,-0.340,0.340,-2.32,0.1/

&HOLE XB=-0.93,0.93,-0.65,0.65,-2.30,-0.3/

&OBST XB=-1.0,-0.90,-0.8,0.8,-0.150,-0.01, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./

&OBST XB=-0.90,0.90,0.70,0.80,-0.15,-0.01, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./

&OBST XB=0.90,1.0,-0.8,0.8,-0.15,-0.01, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./

&OBST XB=-0.90,0.90,-0.70,-0.8,-0.15,-0.01, SAWTOOTH=.FALSE.,
SURF_ID='PAREDES', THICKEN=.TRUE./

&OBST XB=-1.0, -0.80, -0.8, 0.8, -0.01, 0.1, SAWTOOTH=. FALSE. ,
SURF_ID=' PAREDES' , THICKEN=. TRUE. /

&OBST XB=-0.8, 0.8, 0.6, 0.8, -0.01, 0.1, SAWTOOTH=. FALSE. , SURF_ID=' PAREDES' ,
THICKEN=. TRUE. /

&OBST XB=0.80, 1.0, -0.8, 0.8, -0.01, 0.1, SAWTOOTH=. FALSE. , SURF_ID=' PAREDES' ,
THICKEN=. TRUE. /

&OBST XB=-0.80, 0.80, -0.6, -0.8, -0.01, 0.1, SAWTOOTH=. FALSE. ,
SURF_ID=' PAREDES' , THICKEN=. TRUE. /

Condições fronteira

Entrada Turbina (produtos da combustão)

&VENT XB=-0.7, 0.70, -0.65, -0.65, -0.6, -2.0, SURF_ID=' ENTRADA_TURBINA' , / (Area
de passagem 1.6m²)

Entrada ar

&OBST XB=-1.0, -0.615, -0.8, 0.8, -0.21, -0.15, SAWTOOTH=. FALSE. ,
SURF_ID=' PAREDES' , THICKEN=. TRUE. /

&OBST XB=-0.615, 0.615, 0.440, 0.8, -0.21, -0.15, SAWTOOTH=. FALSE. ,
SURF_ID=' PAREDES' , THICKEN=. TRUE. /

&OBST XB=0.615, 1.0, -0.8, 0.8, -0.21, -0.15, SAWTOOTH=. FALSE. ,
SURF_ID=' PAREDES' , THICKEN=. TRUE. /

&OBST XB=-0.615, 0.615, -0.440, -0.8, -0.21, -0.15, SAWTOOTH=. FALSE. ,
SURF_ID=' PAREDES' , THICKEN=. TRUE. /

&VENT XB=-0.90, -0.75, -0.70, 0.70, -0.15, -0.15, SURF_ID=' ENTRADA_AR' /

&VENT XB=-0.75, 0.75, 0.550, 0.70, -0.15, -0.15, SURF_ID=' ENTRADA_AR' /

&VENT XB=0.75, 0.90, -0.70, 0.70, -0.15, -0.15, SURF_ID=' ENTRADA_AR' /

&VENT XB=-0.75, 0.75, -0.550, -0.70, -0.15, -0.15, SURF_ID=' ENTRADA_AR' /

Limites do domínio

&VENT MB=' XMIN' , SURF_ID=' OPEN' /

&VENT MB=' XMAX' , SURF_ID=' OPEN' /

&VENT MB=' YMIN' , SURF_ID=' OPEN' /

&VENT MB=' YMAX' , SURF_ID=' OPEN' /

&VENT MB=' ZMIN' , SURF_ID=' OPEN' /

&VENT MB=' ZMAX' , SURF_ID=' OPEN' /

OUTPUT

SLCF PBX=0.0, QUANTITY=' PRESSURE' , VECTOR=. TRUE. /

SLCF PBX=0.0, QUANTITY=' VELOCITY' , /

SLCF PBX=0.0, QUANTITY=' TEMPERATURE' , /

```

&DEVC ID=' PRESSAO ENTRADA' XB=-0. 80, 0. 80, -0. 60, 0. 60, 0. 1, 0. 1,
QUANTI TY=' PRESSURE' , /

&DEVC ID=' PRESSAO SAÍ DA' XB=-1. 30, 0. 80, -1. 45, 1. 10, 14. 5, 14. 5,
QUANTI TY=' PRESSURE' , /

&DEVC ID=' PRESSAO ATM' XYZ=-1. 10, 0, 0. 1 QUANTI TY=' PRESSURE' , /

&DEVC ID=' VELOCIDADE SAI DA' , XB=-1. 30, 0. 80, -1. 45, 1. 10, 14. 5, 14. 5,
QUANTI TY=' W-VELOCI TY' , /

&DEVC ID=' VELOCIDADE SAI DA' , XB=-1. 30, 0. 80, -1. 45, 1. 10, 14. 0, 14. 0,
QUANTI TY=' W-VELOCI TY' , /

&DEVC ID=' VELOCIDADE ENT' , XB=-0. 80, 0. 80, -0. 60, 0. 60, 0. 1, 0. 1, QUANTI TY=' W-
VELOCI TY' , /

&DEVC ID=' TEMPERATURA S' , XB=-1. 30, 0. 80, -1. 45, 1. 10, 14. 5, 14. 5,
QUANTI TY=' TEMPERATURE' , /

&DEVC ID=' TEMPERATURA ENTRADA' , XB=-0. 85, 0. 85, -0. 60, 0. 60, 0. 1, 0. 1,
QUANTI TY=' TEMPERATURE' , /

&DEVC ID=' CAUDAL MÁSSI CO SAI DA' , XB=-1. 30, 0. 80, -1. 45, 1. 10, 14. 3, 14. 3,
QUANTI TY=' MASS FLOW +' , /

&DEVC ID=' CAUDAL MÁSSI CO ENTRADA' , XB=-0. 93, 0. 93, -0. 65, 0. 65, -0. 3, -0. 3,
QUANTI TY=' MASS FLOW +' , /

&DEVC ID=' DENSIDADE ENTRADA' , XB=-0. 80, 0. 80, -0. 60, 0. 60, 0. 1, 0. 1,
QUANTI TY=' DENSI TY' , /

&DEVC ID=' DENSIDADE SAI DA' , XB=-0. 93, 0. 93, -0. 65, 0. 65, -0. 3, -0. 3,
QUANTI TY=' DENSI TY' , /

&DUMP PLOT3D_QUANTI TY(1: 5)=' TEMPERATURE' , ' U-VELOCI TY' , ' V-VELOCI TY' , ' W-
VELOCI TY' , ' PRESSURE' , WRI TE_XYZ=. TRUE. , DT_PL3D=1,

DT_DEVC=1, DT_SLCF=1, DT_RESTART=1/

OUTPUT SOLI DOS

&DEVC XYZ=-0. 75, 0. 0, 2. 80, QUANTI TY=' WALL_TEMPERATURE' , I OR=1, ID=' face
i nteri or' /

&DEVC XYZ=-0. 80, 0. 00, 2. 80, QUANTI TY=' WALL_TEMPERATURE' , I OR=1, ID=' face
exteri or' /

&DEVC XYZ=-0. 75, 0. 00, 2. 80, QUANTI TY=' I NSI DE_WALL_TEMPERATURE' , DEPTH=0. 001
I OR=1, ID=' 0. 001' /

&DEVC XYZ=-0. 75, 0. 00, 2. 80, QUANTI TY=' I NSI DE_WALL_TEMPERATURE' , DEPTH=0. 002
I OR=1, ID=' 0. 002' /

&DEVC XYZ=-0. 75, 0. 00, 2. 80, QUANTI TY=' I NSI DE_WALL_TEMPERATURE' , DEPTH=0. 003
I OR=1, ID=' 0. 003' /

&DEVC XYZ=-0. 75, 0. 00, 2. 80, QUANTI TY=' I NSI DE_WALL_TEMPERATURE' , DEPTH=0. 004
I OR=1, ID=' 0. 004' /

Gradiente em profundi dade

&DEVC XYZ=-0. 75, 0. 00, 2. 80, QUANTI TY=' I NSI DE_WALL_TEMPERATURE' , DEPTH=0. 005
I OR=1, ID=' 0. 005' /

```

&DEVC XYZ=-0.75,0.00,2.80, QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE', DEPTH=0.010
IOR=1, ID='0.010' /

&DEVC XYZ=-0.75,0.00,2.80, QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE', DEPTH=0.015
IOR=1, ID='0.015' /

&DEVC XYZ=-0.75,0.00,2.80, QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE', DEPTH=0.050
IOR=1, ID='0.050' /

&DEVC XYZ=-0.75,0.00,2.80, QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE', DEPTH=0.100
IOR=1, ID='0.100' /

&DEVC XYZ=-0.75,0.00,2.80, QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE', DEPTH=0.115
IOR=1, ID='0.115' /

&DEVC XYZ=-0.75,0.00,2.80, QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE', DEPTH=0.120
IOR=1, ID='0.120' /

&DEVC XYZ=-0.75,0.00,2.80, QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE', DEPTH=0.125
IOR=1, ID='0.125' /

&DEVC XYZ=-0.75,0.00,2.80, QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE', DEPTH=0.129
IOR=1, ID='0.129' /

&DEVC XYZ=-0.75,0.00,2.80, QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE', DEPTH=0.130
IOR=1, ID='0.130' /

&DEVC XYZ=-0.75,0.00,2.80, QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE', DEPTH=0.131
IOR=1, ID='0.131' /

&DEVC XYZ=-0.75,0.00,2.80, QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE', DEPTH=0.140
IOR=1, ID='0.140' /

Gradiente ao longo da parede (termopares)

&DEVC XYZ=0.9,-1.9,2.80, QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE', DEPTH=0.004
IOR=-2, ID='termopar 1' /

&DEVC XYZ=1.25,-1.6,2.80, QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE', DEPTH=0.004
IOR=1, ID='termopar 2' /

&DEVC XYZ=1.25,-1.2,2.80, QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE', DEPTH=0.004
IOR=1, ID='termopar 3' /

&DEVC XYZ=1.25,-0.2,2.80, QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE', DEPTH=0.004
IOR=1, ID='termopar 4' /

&DEVC XYZ=1.25,0.3,2.80, QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE', DEPTH=0.004
IOR=1, ID='termopar 5' /

&DEVC XYZ=-0.50,-1.9,2.80, QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE', DEPTH=0.004
IOR=-2, ID='termopar 6' /

&DEVC XYZ=1.05,0.3,1.7, QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE', DEPTH=0.005
IOR=1, ID='termopar 7' /

&DEVC XYZ=0.9,0.3,0.7, QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE', DEPTH=0.005
IOR=1, ID='termopar 8' /

&TAIL /

