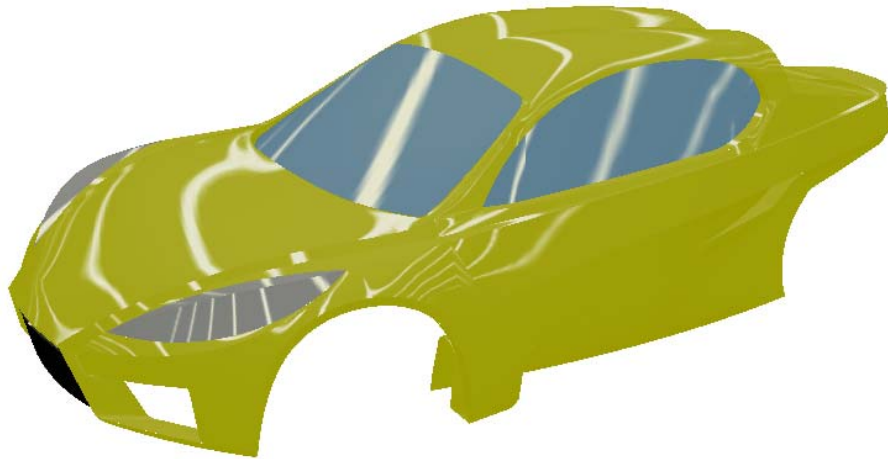




ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Mecânica



Modelação e concepção da carroçaria do Veículo Eléctrico Ecológico (VEECO)

INGO ROHACEK COSTA
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor José Filipe Castanheira Pereira Antunes Simões
Mestre Afonso Manuel da Costa de Sousa Leite

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Jorge Mendonça e Costa

Vogais:

Prof. Doutor Luís Manuel Rodrigues Coelho
Doutor José Filipe Castanheira Pereira Antunes Simões
Mestre Afonso Manuel da Costa de Sousa Leite

Março de 2013

Aos meus pais.

À Claudia.

AGRADECIMENTOS

É com muita satisfação que agradeço a todos aqueles que tornaram este trabalho possível.

Gostaria antes de mais agradecer ao Professor José Simões, orientador desta dissertação, por me ter proporcionado a possibilidade de realizar este trabalho, atendendo às complicadas circunstâncias que envolveram a sua realização, pelo seu apoio e disponibilidade demonstrados.

Gostaria também de agradecer ao Professor Afonso Leite, co-orientador desta dissertação, pelo seu apoio, pelas suas sugestões, motivação e pela tremenda disponibilidade que demonstrou durante todo este trabalho.

Desejo agradecer também ao Instituto Politécnico de Lisboa que acompanhado dos esforços do Professor Afonso Leite, em conjunto com a VE- Fabricação de Veículos de Tracção Eléctrica, Lda. permitiu a realização de uma acção de formação que impulsionou a realização deste trabalho.

Agradeço à empresa VE- Fabricação de Veículos de Tracção Eléctrica, Lda. pela disponibilização de documentação e dados de ensaios.

Agradeço minha família por todo o apoio e incentivo que sempre me deram.

RESUMO

Neste trabalho aborda-se o desenvolvimento da carroçaria do Veículo Eléctrico Ecológico – VEECO recorrendo a tecnologias assistidas por computador. Devido à impossibilidade de abranger toda a temática das tecnologias assistidas por computador, associadas ao desenvolvimento de uma carroçaria automóvel, o foco deste trabalho assenta no processo de obtenção de um modelo digital válido e no estudo do desempenho aerodinâmico da carroçaria.

A existência de um modelo digital válido é a base de qualquer processo de desenvolvimento associado a tecnologias assistidas por computador. Neste sentido, numa primeira etapa, foram aplicadas e desenvolvidas técnicas e metodologias que permitem o desenvolvimento de uma carroçaria desde a sua fase de “design” até à obtenção de um modelo digital CAD. Estas abrangem a conversão e importação de dados, a realização de engenharia inversa, a construção/reconstrução CAD em CATIA V5 e a preparação/correção de modelos CAD para a análise numérica.

Numa segunda etapa realizou-se o estudo da aerodinâmica exterior da carroçaria, recorrendo à ferramenta de análise computacional de fluidos (CFD) Flow Simulation da CosmosFloworks integrado no programa SolidWorks 2010.

Associado à temática do estudo aerodinâmico e devido à elevada importância da validação dos resultados numéricos por meio de dados experimentais, foi realizado o estudo de análise dimensional que permite a realização de ensaios experimentais à escala, bem como a análise dos resultados experimentais obtidos.

PALAVRAS – CHAVE: Carroçaria, Modelação 3D automóvel, Engenharia inversa, Análise aerodinâmica, CFD, CFD automóvel, Coeficiente de arrasto, Aerodinâmica automóvel,

ABSTRACT

In the present work the development of the body of the Ecological Electric Vehicle - VEECO using computer-assisted technologies is addressed. Due to the impossibility to address the entire subject of computer-assisted technologies, in the development of a road vehicle body, the focus of this work lies in obtaining a valid digital model and in the study of the aerodynamic performance of the body.

The existence of a valid digital model is the starting point for any development process associated with computer-assisted technologies. In this sense, in a first step, techniques and methodologies were applied and developed that enable the development of a body from its design phase until the obtainment of a digital CAD model. These include the conversion and importing of data, reverse engineering, the CAD construction/reconstruction in CATIA V5 and the preparation/correction of CAD models for the numerical analysis.

In a second step, the external aerodynamics study of the body was performed, using the computational fluid dynamics (CFD) tool Flow Simulation from CosmosFloworks integrated in the software SolidWorks 2010.

Associated with the thematic of aerodynamic analysis and the importance of validating the numerical results with experimental data, a dimensional analysis which allows to conduct experimental tests with scale models was performed, as well as the analysis of the obtained experimental results.

KEYWORDS: Car body structures, Automotive 3D modeling, Reverse engineering, Aerodynamic analysis, CFD, Car CFD, Drag Coefficient, Road vehicle aerodynamics,

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Abreviaturas

2D	– Bidimensional
3D	– Tridimensional
3DS	– 3D Studio
DSE	– Digital Shape Editor (Editor de formas digitais)
CAD	– Computer Aided Design (Desenho assistido por computador)
CAE	– Computer Aided Engineering (Engenharia assistida por computador)
CAM	– Computer Aided Manufacturing (Fabrico assistido por computador)
CAQ	– Computer Aided Quality Assurance (Qualidade assistida por computador)
CAT	– Computer Aided Testing (Teste assistido por computador)
CATIA	– Computer-Graphic Aided Three-Dimensional Interactive Application
CFD	– Computational Fluid Dynamics (Dinâmica de fluidos computacional)
CGR	– CATIA Graphical Representation (Representação gráfica do CATIA)
DC	– Corrente continua
DMU	– Digital Mock Up (Maqueta digital)
DWG	– Drawing (Desenho)
FAC	– Faces
FEM	– Finite Element Method (Método de elementos finitos)
Freestyle	– Freestyle Shaper, Optimizer and Profiler
FVM	– Finite Volume Method (Método de volumes finitos)

G0	– Continuidade pontual
G1	– Continuidade em tangência
G2	– Continuidade em curvatura
GB	– Giga Bytes
GHz	– Giga Hertz
GSD	– Generative Shape Design
IAS	– Institute for Advanced Study (Instituto para estudos avançados)
IGES	– Initial Graphics Exchange Specification
IPS	– Instructions per Second (Instruções por segundo)
MB	– Mega Byte
MEF	– Método dos Elementos Finitos
MIPS	– Million instructions per second (Milhões de instruções por segundo)
NURBS	– Non-Uniform Rational B-Splines
NVH	– Noise Vibration Harshness (Severidade de vibrações e ruído)
PC	– Personal Computer (Computador pessoal)
RAM	– Random Access Memory (Memória de acesso aleatório)
STEP	– Standard for the Exchange of Product Model data
SUR	– Surfaces (Superfícies)
VEECO	– Veículo Elétrico Ecológico
WS	– Workstation (Estação de Trabalho)

Símbolos

μ	– Viscosidade dinâmica
a	– Aceleração
a_m	– Aceleração do modelo
A_p	– Área projectada
a_p	– Aceleração do protótipo
a_r	– Escala de acelerações
C_d, C_x	– Coeficiente de atrito aerodinâmico
C_l, C_z	– Coeficiente de sustentação aerodinâmica
D	– Força de arrasto aerodinâmico
Eu	– Número de Euler
F_c	– Força de compressibilidade
F_g	– Força da gravidade
F_i	– Força de inércia
F_l	– Força de sustentação aerodinâmica
F_p	– Força de pressão
Fr	– Número de Froude
F_t	– Força de tensão superficial
F_v	– Força de viscosidade
g	– Força da gravidade
L	– Comprimento
L_m	– Comprimento do modelo
L_p	– Comprimento do protótipo
L_r	– Escala de comprimentos
M, m	– Massa

Ma	– Número de Mach
P	– Pressão
R	– Constante de um gás perfeito
Re	– Número de Reynolds
T	– Temperatura
t	– Tempo
T_m	– Tempo do modelo
T_p	– Tempo do protótipo
T_r	– Escala de tempos
V	– Velocidade
V_m	– Velocidade do modelo
V_p	– Velocidade do protótipo
V_r	– Escala de velocidades
We	– Número de Weber
γ	– Relação dos calores específicos
Δp	– Variação de pressão
ρ	– Massa volúmica

ÍNDICE GERAL

Capítulo 1	INTRODUÇÃO	1
1.1.	ASPECTOS GERAIS	1
1.2.	OBJECTIVO DO TRABALHO	2
1.3.	ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
Capítulo 2	TECNOLOGIAS ASSISTIDAS POR COMPUTADOR: ESTADO DA ARTE	5
2.1.	INTRODUÇÃO AO CAPÍTULO 2	5
2.2.	TECNOLOGIAS ASSISTIDAS POR COMPUTADOR NA INDÚSTRIA AUTOMÓVEL	6
2.2.1	<i>Tecnologia CAD</i>	8
2.2.2	<i>Tecnologia CAE</i>	12
Capítulo 3	DESENVOLVIMENTO DA CARROÇARIA DO VEECO	17
3.1.	INTRODUÇÃO AO CAPÍTULO 3	17
3.2.	DESENVOLVIMENTO DE UMA CARROÇARIA AUTOMÓVEL	18
3.3.	PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DA CARROÇARIA DO VEECO	19
3.3.1	<i>Processo de design</i>	22
3.3.2	<i>Processo de exportação e conversão de dados</i>	25
3.3.2.1	Exportação directa	26
3.3.2.2	Exportação indirecta com conversão de dados	26
3.3.3	<i>Processo de engenharia inversa</i>	29
3.3.3.1	Tratamento de dados	33
3.3.4	<i>Modelação da carroçaria</i>	36
3.3.4.1	Reconstrução automática da carroçaria	36
3.3.4.2	Modelação detalhada da carroçaria	39
3.4.	PREPARAÇÃO PARA A ANÁLISE NUMÉRICA	49
3.4.1	<i>Determinação da área projectada</i>	50
3.4.2	<i>Correcção do modelo CAD</i>	52
3.5.	CONCLUSÃO PRELIMINAR DO CAPÍTULO 3	55

Capítulo 4	ESTUDO AERODINÂMICO DA CARROÇARIA DO VEECO.....	58
4.1.	INTRODUÇÃO AO CAPÍTULO 4.....	58
4.2.	ANÁLISE NUMÉRICA EM COSMOSFLOWWORKS – FLOW SIMULATION	60
4.2.1	<i>Análises preliminares</i>	60
4.2.2	<i>Pré-processamento</i>	62
4.2.3	<i>Pós-processamento</i>	69
4.2.3.1	Modelo com spoiler traseiro	71
4.2.3.2	Modelo sem spoiler traseiro	73
4.3.	ANÁLISE DE RESULTADOS	73
4.4.	CONCLUSÃO PRELIMINAR DO CAPÍTULO 4.....	81
Capítulo 5	PREPARAÇÃO PARA O ESTUDO EM TÚNEL AERODINÂMICO	83
5.1.	INTRODUÇÃO AO CAPÍTULO 5.....	83
5.2.	DESCRIÇÃO DO TÚNEL AERODINÂMICO.....	84
5.3.	CÁLCULOS DE APLICAÇÃO AO TÚNEL.....	85
5.3.1	<i>Revisão teórica de análise dimensional e semelhança</i>	85
5.3.1.1	Semelhança geométrica	85
5.3.1.2	Semelhança cinemática	86
5.3.1.3	Semelhança dinâmica	87
5.3.1.4	Parâmetros adimensionais	87
5.3.2	<i>Cálculos para o modelo à escala 1:5</i>	90
5.4.	CONCLUSÃO PRELIMINAR DO CAPÍTULO 5.....	93
Capítulo 6	ENSAIOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	95
6.1.	INTRODUÇÃO AO CAPÍTULO 6.....	95
6.2.	ENSAIOS EXPERIMENTAIS EM PISTA	95
6.2.1	<i>Considerações e realização</i>	95
6.2.2	<i>Resultados</i>	96
6.3.	ENSAIOS EXPERIMENTAIS EM TÚNEL DE VENTO	97
6.4.	CONCLUSÃO PRELIMINAR DO CAPÍTULO 6.....	97
Capítulo 7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	101
7.1.	CONCLUSÃO.....	101
7.2.	TRABALHOS FUTUROS.....	102
ANEXO A – VEECO RT CARACTERÍSTICAS DE MODELAÇÃO	108	
ANEXO B – VEECO RT CARACTERÍSTICAS DO MODELO.....	112	
ANEXO C – DADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA DO MODELO COM SPOILER.....	114	

ANEXO D – DADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA DO MODELO SEM SPOILER.....	153
ANEXO E – DADOS DAS ANÁLISES NUMÉRICAS DO MODELO À ESCALA.....	158
ANEXO F – RESULTADOS DO ENSAIO EM TUNEL DE VENTO	176
ANEXO G – MODELO NUMÉRICO UTILIZADO PELO SOFTWARE FLOW SIMULATION	180

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tecnologias assistidas por computador utilizadas	6
Tabela 2 - Condições ambiente utilizadas para a análise numérica no software CosmosFlowworks.....	62
Tabela 3 - Condições de fronteira utilizadas para a análise numérica no software CosmosFlowworks.....	63
Tabela 4 - Dados para os cálculos dos coeficientes de arrasto e sustentação	70
Tabela 5 - Resultados obtidos da simulação do modelo com spoiler traseiro em Flow Simulation	71
Tabela 6 - Resultados obtidos do modelo sem spoiler traseiro em Flow Simulation.....	73
Tabela 7 - Valores calculados dos coeficientes de arrasto C_d	96
Tabela 8 - Dados para os cálculos dos coeficientes de arrasto e sustentação	97
Tabela 9 - Resultados obtidos da simulação do ensaio de túnel de vento.....	97
Tabela 10 - Resultados obtidos da simulação do ensaio de túnel de vento em Flow Simulation	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Relação entre os diversos sectores de desenvolvimento de um automóvel e as suas respectivas tecnologias computacionais	7
Figura 2 - Desenvolvimento das tecnologias CAD e CAE.....	11
Figura 3 - Alocação dos recursos computacionais pelas diversas áreas CAE na indústria automóvel.....	13
Figura 4 - Simulação de um embate frontal.....	14
Figura 5 - Escoamento turbulento em torno de uma carroçaria.....	14
Figura 6 - Processo de desenvolvimento da carroçaria do VEECO	20
Figura 7 - Primeiros esboços da solução de design	22
Figura 8 - Modelo final da carroçaria em malha de polígonos realizado no software SketchUp	23
Figura 9 - Modelo da carroçaria suavizada realizado no software SketchUp.....	24
Figura 10 - “Renders” fotorrealistas da proposta final de design do VEECO realizados no software SketchUp..	24
Figura 11 - Modelos de maquinaria realizados no software SketchUp	28
Figura 12 - Carroçaria obtida através do processo de importação.....	30
Figura 13 - Nuvem de pontos resultante da digitalização de uma porta	31
Figura 14 - Nuvem de pontos após o processamento de pontos	32
Figura 15 - Malha gerada sobre a nuvem de pontos tratada	32
Figura 16 - Malha obtida realizando um “Tessellate” da carroçaria.....	33
Figura 17 - Descontinuidades detectadas na malha da carroçaria	35
Figura 18 - Carroçaria obtida através do processo de reconstrução automática em CATIA V5	37
Figura 19 - Parâmetros para a definição do processo de reconstrução automática em CATIA V5	37
Figura 20 - Construção superficial da carroçaria obtida através do processo de reconstrução automática em CATIA V5.....	38
Figura 21 - Carroçaria, sem spoiler traseiro, obtida pelo processo de reconstrução automática em CATIA V5... 39	
Figura 22 - Comparação entre uma superfície definida com continuidade G1 e G0.....	42
Figura 23 - Organização dos grupos geométricos para o processo de modelação da carroçaria em CATIA V5 ..	44
Figura 24 - Exemplo curvas do capô analisadas quanto à sua curvatura (Porcupine Curvature Analysis) em CATIA V5.....	45
Figura 25 - Exemplo curvas do capô analisadas quanto ao seu asfamento do modelo de referência (Distance Analysis) em CATIA V5.....	46
Figura 26 - Rede de curvas características definidas e CATIA V5	47

Figura 27 - Superfície do capô analisado quanto a sua curvatura em CATIA V5	48
Figura 28 - Modelo final da carroçaria do VEECO RT	49
Figura 29 - Área projectada da carroçaria obtida no software CATIA V5	51
Figura 30 - Área projectada da carroçaria com rodas obtida no software CATIA V5.....	51
Figura 31 - Erros contidos na carroçaria modelada	53
Figura 32 - Modelo sólido da carroçaria obtido após a correcção do modelo em CATIA V5.....	55
Figura 33 - Representação esquemática da metodologia de análise típica para problemas de simulação numérica.	59
Figura 34 - Domínio computacional utilizado para iniciar os estudos computacionais preliminares	61
Figura 35 - Domínio computacional utilizado para as simulações em Flow Simulation	64
Figura 36 - Células da malha computacional nas zonas de interface sólido – fluido.....	65
Figura 37 - Malha inicial da malha 1 definida manualmente em Flow Simulation	68
Figura 38 - Vista de topo e lateral da malha 1 obtida em Flow Simulation.....	68
Figura 39 - Vista de topo e lateral da malha 2 obtida em Flow Simulation	68
Figura 40 - Vista superior das linhas de escoamento sobre a carroçaria obtidas utilizando as ferramentas de pós- processamento do Flow Simulation	72
Figura 41 - Vista frontal e traseira das linhas de escoamento sobre a carroçaria obtidas utilizando as ferramentas de pós-processamento do Flow Simulation	72
Figura 42 - Distribuição da pressão do modelo com spoiler resultante da simulação em Flow Simulation.	74
Figura 43 - Variação da velocidade do modelo com spoiler resultante da simulação em Flow Simulation.	75
Figura 44 - Vórtices estacionários que ocorrem na junção entre o para brisas e o capô.....	76
Figura 45 - Smart Roadster e Smart Coupé	77
Figura 46 - Ângulo de inclinação da traseira do veículo	77
Figura 47 - Distribuição de pressão sobre a superfície da carroçaria com e sem spoiler traseiro, obtida utilizando as ferramentas de pós processamento do Flow Simulation.....	78
Figura 48 - Variação de pressão superficial ao longo da carroçaria com spoiler.....	79
Figura 49 - Variação de pressão superficial ao longo da carroçaria sem spoiler	79
Figura 50 - Distribuição da pressão do modelo sem spoiler resultante da simulação em Flow Simulation	80
Figura 51 - Malha gerada automaticamente com refinamentos progressivos ao longo do refinamento em Flow Simulation.....	82
Figura 52 - Túnel Aerodinâmico do Laboratório de Aeronáutica da AFA	84
Figura 53 - Modelo utilizado para a realização da simulação do ensaio em túnel de vento	98
Figura 54 - Modelo final da carroçaria do VEECO RT.....	109
Figura 55 - Carroçaria do VEECO RT sem porta.....	109
Figura 56 - Carroçaria do VEECO RT sem capô.....	110
Figura 57 - Estrutura interior da carroçaria do VEECO RT	110
Figura 58 - Vistas diferenciadas da análise de isótopos da carroçaria do VEECO RT.....	111
Figura 59 - Vista lateral e medidas principais da carroçaria do VEECO.....	113

Figura 60 - Vista frontal e medidas principais da carroçaria do VEECO.....	113
Figura 61 - Vista de topo da malha 1 com refinamentos ao longo da simulação obtida em Flow Simulation	126
Figura 62 - Vista lateral da malha 1 com refinamentos ao longo da simulação obtida em Flow Simulation.....	126
Figura 63 - Vista lateral da malha 2 com refinamentos ao longo da simulação obtida em Flow Simulation.....	140
Figura 64 - Vista de topo da malha 2 com refinamentos ao longo da simulação obtida em Flow Simulation	140
Figura 65 - Vista lateral da malha automática com refinamentos ao longo da simulação obtida em	146
Figura 66 - Vista de topo da malha automática com refinamentos ao longo da simulação obtida em	146

Capítulo 1_I

INTRODUÇÃO

1.1. ASPECTOS GERAIS

A individualidade e a independência que o automóvel possibilita para a curta e a média distância, fizeram com este se tornasse o principal meio de transporte do quotidiano da humanidade e indispensável ao mesmo.

No entanto, com aumento progressivo do preço dos combustíveis e o agravamento de problemas relacionados com as temáticas ambientais, como o aquecimento global, surge então a necessidade de repensar o conceito automóvel da actualidade e de desenvolver formas alternativas de tracção para este meio de transporte. Ao longo dos anos surgiram várias alternativas quanto à forma como é gerada a força motriz num automóvel, como sistemas de tracção eléctrica, ou motores de combustão de hidrogénio, entre outros.

Os automóveis com sistemas de tracção eléctrica, também vulgarmente designados por veículos eléctricos, encontram-se ainda num estado prematuro de desenvolvimento, primariamente devido ao estado de arte do sistema de armazenamento de energia, mais propriamente as baterias, essenciais para este tipo de configuração. Actualmente, estas ainda são demasiado grandes, pesadas e com uma capacidade de armazenamento de energia insuficiente. São ainda dispendiosas e tem fases de carregamento demasiado longas. No entanto, menosprezando as deficiências mencionadas, que se esperam ultrapassar com o

desenvolvimento tecnológico das mesmas, os veículos eléctricos são possivelmente uma das alternativas mais viáveis da actualidade.

A elevada eficiência dos motores eléctricos, a possibilidade de obter a energia eléctrica a partir de fontes alternativas e os baixos níveis de emissão de ruído (de importância crescente especialmente em cidades) são apenas algumas das vantagens da aplicação deste meio de tracção.

Existem no entanto outros factores, como o peso e a aerodinâmica de um veículo (estes influenciam fortemente a sua autonomia), que contribuem para a sua eficiência global. A sua optimização é importante para o desenvolvimento de automóveis em geral, no entanto devido às limitações descritas anteriormente, estes factores poderão ser cruciais no desenvolvimento de veículos eléctricos.

Dada a importância destes factores e com o objectivo de se estabelecer no segmento dos veículos de tracção eléctrica, surge um projecto de investigação e desenvolvimento da empresa VE - Fabricação de Veículos de Tracção Eléctrica, Lda. em parceria com o Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), com o selo EUREKA e co-financiado pelo Quadro de Referência Estratégico Nacional (QREN), o projecto do Veículo Eléctrico Ecológico – VEECO. Este projecto visa o desenvolvimento de um veículo eléctrico eficiente com uma configuração de três rodas, tipo “reverse trike”, totalmente desenvolvido e construído em Portugal.

1.2. OBJECTIVO DO TRABALHO

Pretende-se, no âmbito do projecto VEECO, realizar a concepção e dimensionamento da carroçaria do VEECO.

Os principais objectivos deste trabalho são o desenvolvimento e a aplicação de técnicas e metodologias que permitem:

- o desenvolvimento da carroçaria desde a sua fase de “design” até à obtenção de um modelo digital CAD;

- a realização de estudos do desempenho aerodinâmico da carroçaria, recorrendo a ferramentas de simulação computacional (CFD).

1.3. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O trabalho desenvolvido apresenta a seguinte estrutura:

- No capítulo dois é feita a descrição do estado da arte das tecnologias assistidas por computador, com ênfase nos métodos computacionais utilizados na indústria automóvel. Neste capítulo serão também analisados quais os factores que influenciam o desenvolvimento destes métodos, quais as suas aplicações e as suas principais vantagens para o desenvolvimento da indústria automóvel.
- No capítulo três é explicado todo o processo de desenvolvimento da carroçaria, desde a sua fase de “design” até à obtenção um modelo digital CAD, bem como o processo de pré-processamento dos dados CAD para a análise numérica, utilizando o programa CATIA V5.
- O capítulo quatro incide sobre o estudo da aerodinâmica exterior da carroçaria, recorrendo à ferramenta de simulação computacional (CFD) Flow Simulation da CosmosFlowworks integrado no programa SolidWorks 2010 e a respectiva análise dos resultados. Este estudo envolve a análise da carroçaria, contemplando a análise de alterações na carroçaria de ordem estética.
- O capítulo cinco aborda o método de análise dimensional e de semelhança necessário para a realização de ensaios experimentais com modelos à escala. Explicando todo o processo de análise dimensional necessário para realizar um estudo em túnel de vento (as especificações para o túnel de vento em causa encontram-se no respectivo capítulo) com um modelo da carroçaria à escala 1:5.

- No capítulo seis é realizada uma análise comparativa entre resultados numéricos e os resultados experimentais obtidos em pista e no túnel de vento do Laboratório de Aeronáutica da Academia da Força Aérea Portuguesa (ambos facultados pela VE - Fabricação de Veículos de Tracção Eléctrica, Lda.).
- Por último, no capítulo sete retiram-se as principais conclusões deste trabalho e enunciam-se sugestões para trabalho futuro.

Capítulo 2_T

ECNOLOGIAS ASSISTIDAS POR COMPUTADOR: ESTADO DA ARTE

2.1. INTRODUÇÃO AO CAPÍTULO 2

O constante avanço tecnológico que acompanha a história da humanidade permitiu-lhe não só um desenvolvimento próspero mas também ultrapassar fronteiras físicas e políticas deste mundo. A globalização que se vive actualmente implica que uma dada empresa, de um determinado sector industrial, não concorre apenas com os seus adversários nacionais mas sim a nível mundial, exigindo das empresas um desenvolvimento constante para que se possam manter na linha da frente.

Este desenvolvimento resultou também numa crescente pressão sobre o sector da indústria automóvel, a crescente concorrência exige, desta, ciclos de desenvolvimento cada vez mais curtos, no entanto, com qualidade crescente. Os métodos tradicionais de desenvolvimento automóvel, que dependem apenas do intelecto e perícia do ser humano, demonstram-se demorados e dispendiosos, surgindo então a necessidade de desenvolver novas tecnologias para fazer frente as exigências do mercado mundial, os métodos computacionais ou tecnologias assistidas por computador. Estas tiveram tal impacto na indústria automóvel que se tornaram um pilar fundamental no desenvolvimento automóvel da actualidade.

Neste capítulo pretende-se apresentar o estado da arte das tecnologias assistidas por computador na indústria automóvel, com ênfase nas tecnologias para a definição geométrica

(CAD) e nas tecnologias para a definição de características físicas (CAE), focando suas características principais, vantagens e limitações.

2.2. TECNOLOGIAS ASSISTIDAS POR COMPUTADOR NA INDÚSTRIA AUTOMÓVEL

A utilização destas tecnologias tem como objectivo detectar falhas numa fase prematura do desenvolvimento de um automóvel e optimizá-lo ainda antes da construção do protótipo.

Estas tecnologias permitem a modelação, o cálculo e simulação virtual das características de um automóvel em desenvolvimento, permitindo reduzir a prototipagem e análise experimental ao estritamente necessário.

As tecnologias assistidas por computador são utilizadas em vários sectores da indústria automóvel. A Tabela 1 enuncia as tecnologias computacionais utilizadas na indústria automóvel.

Tabela 1 - Tecnologias assistidas por computador utilizadas (Meywer, 2007)

Descrição	
CAD	Modelação e projecto assistido por computador
CAE	Abrange na realidade todas as tarefas de engenharia assistidas por computador, embora a utilização comum deste termo restringe-se às áreas de cálculo e simulação, que será também o caso do presente texto
CAM	Fabrico assistido por computador
CAQ	Garantia de qualidades assistida por computador
CAT	Realização e avaliação automatizada de testes assistidos por computador
DMU	Modelo digital baseado em geometrias, essencialmente para a realização de análises espaciais do volume de trabalho

Será importante salientar que estas tecnologias não substituem o especialista, embora os resultados sejam obtidos computacionalmente, é necessário um profundo conhecimento, por parte do especialista, das teorias que fundamentam o estudo ou trabalho a realizar, de forma a garantir a sua validade.

As áreas de aplicação dos métodos computacionais são extremamente especializadas sendo geralmente ocupadas por especialistas. No entanto, não foi a utilização dos métodos computacionais individualmente que permitiu a grande evolução presenciada na indústria automóvel; tal deveu-se sim à sua utilização em conjunto (ver Figura 1).

Figura 1 - Relação entre os diversos sectores de desenvolvimento de um automóvel e as suas respectivas tecnologias computacionais (Meywer, 2007)

No processo de desenvolvimento de um automóvel todos os sectores encontram-se interligados e em permanente comunicação. Esta capacidade de “feedback” possibilitou à

indústria automóvel a detecção prematura de falhas e a reacção quase instantânea por parte dos sectores envolvidos.

Para o funcionamento desta rede de partilha de informação é necessário em primeiro lugar superar algumas barreiras, como:

- Dados incompatíveis entre sistemas;
- Exigências impostas por cada área de aplicação aos dados de importação;

A primeira é facilmente superada pela utilização de formatos neutros, como o seu nome indica, são formatos aceites pela maioria dos programas comerciais.

Contudo, a utilização de formatos neutros por si só não é suficiente, uma vez que, entre as diferentes áreas de aplicação existem também diferentes exigências quanto ao tratamento dos dados em si. Para superar esta barreira é necessário que cada especialista tenha um certo conhecimento base das restantes áreas, de forma a ter em consideração pormenores essenciais a estas na realização do seu trabalho.

Esta nova capacidade de trabalhar em ambientes virtuais não só fez evoluir substancialmente a capacidade de resposta dos sectores individuais, como também todo o processo de desenvolvimento automóvel, devido às possibilidades de partilha de informação que os métodos computacionais permitem.

Segundo (Meywer, 2007), actualmente a definição virtual das características de um automóvel (CAE e CAT) é realizada numa fase inicial do projecto, em paralelo com a definição geométrica do automóvel (CAD e DMU).

É esta capacidade, de realizar estudos e otimizar permanentemente os modelos virtuais ainda antes de ser construído um modelo físico, que permite a redução de custos e tempos de desenvolvimento, melhorando-se simultaneamente a qualidade geral.

2.2.1 TECNOLOGIA CAD

A representação geométrica computadorizada, assente em bases matemáticas, com projecção industrial, iniciou-se em maior escala no final dos anos 60, início dos anos 70. Um grande

avanço para o trabalho visual e interactivo com geometrias, além do desenvolvimento cada vez mais rápido do hardware, foi a introdução da tecnologia Bezier, nomeada segundo o seu inventor. Esta tecnologia combina a capacidade de representação de curvas e superfícies segundo bases matemáticas, com a possibilidade de modificações rápidas. Nos anos 80 surge uma generalização desta tecnologia designada por representação NURBS, tornando-se esta a tecnologia “standard” dos sistemas CAD. Esta tecnologia proporciona grandes vantagens matemáticas, entre outras, como a gestão de condições de continuidade, a representação exacta de circunferências, elipses ou trajectos cinemáticos (Grabner, 2006).

A tecnologia CAD possibilitou a evolução do processo de desenvolvimento de produtos para o mundo digital, revolucionando-o. Além das suas vantagens inerentes, a tecnologia CAD foi impulsionada pelo avanço de diversos sectores tecnológicos, alargando o seu espectro de capacidades.

Com o desenvolvimento e avanço dos processos produtivos consegue-se fazer a ligação entre as tecnologias CAD e CAM, tornando-se possível maquinar directamente a partir dos dados 3D utilizando a tecnologia CAM. São exemplos, entre outros, os CNC's e a Prototipagem rápida.

Com os avanços no “Hardware” (melhores capacidades computacionais e gráficas, monitores de alta definição etc.), a tecnologia CAD tornou-se numa poderosa ferramenta de visualização e análise de produto. Actualmente consegue-se facilmente, entre outros, realizar cortes virtuais, simulações cinemáticas, visualizar modelos realísticos do produto ou visualizar estados possíveis do mesmo, como por exemplo um carro com porta aberta ou fechada. Situações onde, no desenho técnico tradicional, teriam de ser realizados novos modelos para cada estado. A existência de colisões, o espaço disponível entre componentes, volumes de ocupação gerados pela simulação cinemática de componentes móveis e a qualidade de superfícies, são apenas alguns exemplos de informações que assim se podem obter.

As vantagens resultantes da obtenção de informações importantes sem recorrer a protótipos, tiveram tal impacto no desenvolvimento de produtos, que esta vertente do CAD recebeu uma designação própria, o DMU, existindo actualmente especialistas na indústria automóvel puramente dedicados ao DMU, não realizando qualquer trabalho de modelação.

Outro factor impulsionador da tecnologia CAD na indústria mundial, foram os avanços no sector das redes e telecomunicações. A tecnologia de transferência de dados da actualidade, seja ela sem fios “Wireless” ou por cabo, permite o armazenamento de dados (tais como Programas, licenças, bibliotecas e os próprios dados CAD) em servidores, que assim são compartilhados por múltiplos utilizadores. Este avanço tecnológico permite o trabalho em simultâneo de diversos grupos de trabalho, dentro da própria empresa ou com parceiros externos (através da utilização de redes seguras), sempre a par de quaisquer modificações que ocorram nos dados.

Avanços na própria tecnologia CAD possibilitaram o surgimento de novas capacidades como a parametrização dos dados CAD. Actualmente os principais sistemas CAD do mercado permitem a parametrização dos seus modelos, ou seja, estes são desenvolvidos contendo parâmetros manipuláveis. Assim é possível realizar facilmente alterações no modelo pela introdução de novos parâmetros. Considerando como exemplo, a modelação de um objecto geométrico simples, um cilindro, este seria modelado definindo como parâmetros o seu raio e a sua altura, assim pela manipulação destes dois parâmetros consegue-se facilmente, a qualquer instante, alterar as dimensões do cilindro.

Sistemas CAD que incorporam esta capacidade permitem realizar modelos 3D complexos facilmente alteráveis pela manipulação dos seus parâmetros, evitando alterações estruturais nos modelos 3D ou até mesmo o redesenho destes, quando surge a necessidade actualizar os modelos. Outra grande vantagem decorrente da parametrização dos desenhos 3D, é a possibilidade de criar um modelo base que dá origem a vários produtos diferentes, pela alteração dos seus parâmetros. Claramente a parametrização de desenhos 3D requer o investimento de algum tempo no desenvolvimento de uma metodologia apropriada de modelação, mas a suas vantagens para o processo de desenvolvimento global são evidentes.

Numa economia cada vez mais rápida e competitiva a tecnologia CAD tem um papel muito importante na redução do tempo de desenvolvimento de produtos. Estando o próprio processo de como esta tecnologia é utilizada em constante evolução. Actualmente são utilizados sistemas CAD 3D para produtos com grandes volumes de produção ou com geometrias complexas. Estes são modelados em 3D, sendo depois extraídos os desenhos técnicos 2D (“Drafting”) e disponibilizados nesta forma para produção em série.

No entanto surge, na indústria automóvel, uma nova tendência de disponibilizar directamente os dados 3D, em vez dos tradicionais desenhos técnicos 2D, para produção em série. Obtendo-se uma simplificação do processo de desenvolvimento do produto e uma redução do seu número de etapas. Com a crescente abundância de recursos informáticos e a capacidade actual dos programas CAD de incluir nos modelos 3D dimensões, notas e informações referentes ao produto, é possível imaginar que num futuro próximo indústrias como a automóvel abdicuem do tradicional desenho técnico 2D.

Figura 2 - Desenvolvimento das tecnologias CAD e CAE (Meywer, 2007)

A necessidade de obtenção de tempos cada vez mais curtos desde a ideia até à sua execução, tem vindo a demonstrar-se de tal forma importante que a evolução da própria tecnologia CAD, impulsionou o desenvolvimento de outro segmento de tecnologias assistidas por

computador, a tecnologia CAE, visível no desenvolvimento histórico das tecnologias CAD e CAE representado na Figura 2.

2.2.2 TECNOLOGIA CAE

De acordo com (Meywer, 2007), as primeiras aplicações CAE surgiram para fins militares, introduzidas por John von Neumann, que pelo seu trabalho na área da arquitectura de computadores entre 1946 e 1951, no âmbito do projecto de computadores do IAS, definiu as bases de desenvolvimento dos actuais computadores de alto rendimento.

O desenvolvimento da capacidade de processamento de computadores em função do tempo foi desde então aproximadamente exponencial. Inicialmente a capacidade de processamento de computadores era medida em instruções por segundo (IPS), com os avanços tecnológicos na área da arquitectura de computadores, a capacidade processamento dos computadores passou a ser medida em milhões de instruções por segundo (MIPS), registando os super computadores da actualidade capacidades de processamento superiores a $1,0 \times 10^{15}$ MIPS. Este desenvolvimento dos computadores permitiu os grandes avanços na tecnologia CAE, que a tornaram uma tecnologia fundamental no desenvolvimento automóvel.

Actualmente a tecnologia CAE encontra-se de tal forma fundamentada na indústria, que a sua evolução dita patamares para o desenvolvimento das capacidades computacionais. Verificando-se que a evolução e desenvolvimento das capacidades computacionais em aplicações industriais são fortemente motivados por avanços na tecnologia CAE, como por exemplo a transição para algoritmos de processamento em paralelo. Assim, são utilizados na indústria automóvel, por exemplo, “clusters” (núcleos de processadores) de 500 (ou mais) processadores, para realizar complexas simulações de embate e deformação de veículos.

A utilização da tecnologia CAE e as suas áreas de abrangência está fortemente dependente da capacidade de processamento disponível, uma vez que a capacidade computacional requerida varia entre as diversas áreas onde se utiliza a análise e simulação computacional.

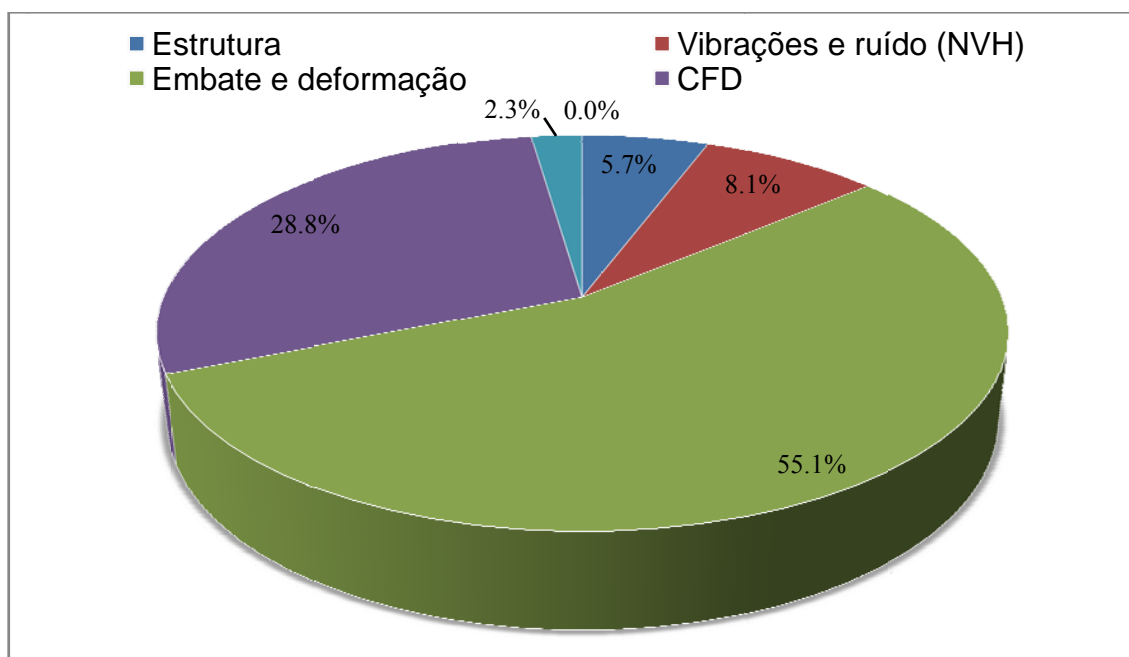


Figura 3 - Alocação dos recursos computacionais pelas diversas áreas CAE na indústria automóvel (Meywer, 2007)

A Figura 3 mostra como se dividem percentualmente os recursos computacionais pelas principais áreas de aplicação da tecnologia CAE na indústria automóvel.

Do gráfico da Figura 3 retira-se que grande parte dos recursos computacionais utilizados pertencem a áreas da simulação de embate e deformação de veículos e do CFD. Mais de metade dos recursos disponíveis são utilizados para simulações de embate e deformação de veículos e aproximadamente 30% para simulações de CFD. Isto deve-se ao facto que estes tipos de simulações necessitam para a sua análise complexos modelos virtuais, como se pode ver na Figura 4 no caso das simulações de “Crash” e na Figura 5 no caso das simulações CFD.

Outro factor que influencia a alocação de recursos é a quantidade de fenómenos físicos que têm de ser considerados numa dada análise. A simulação virtual de embate e deformação de veículos, incluindo a simulação com passageiros, requer para a sua análise a consideração de diversos fenómenos físicos, como por exemplo, fenómenos correspondentes à mecânica dos corpos rígidos, à mecânica dos corpos sólidos deformáveis, à mecânica dos fluidos e à termodinâmica (Meywer, 2007).



Figura 4 - Simulação de um embate frontal (Meywer, 2007)

No caso da simulação CFD, dependendo do tipo de análise em causa, têm de ser considerados fenómenos físicos correspondentes à mecânica dos fluidos, à termodinâmica e à transmissão de calor.

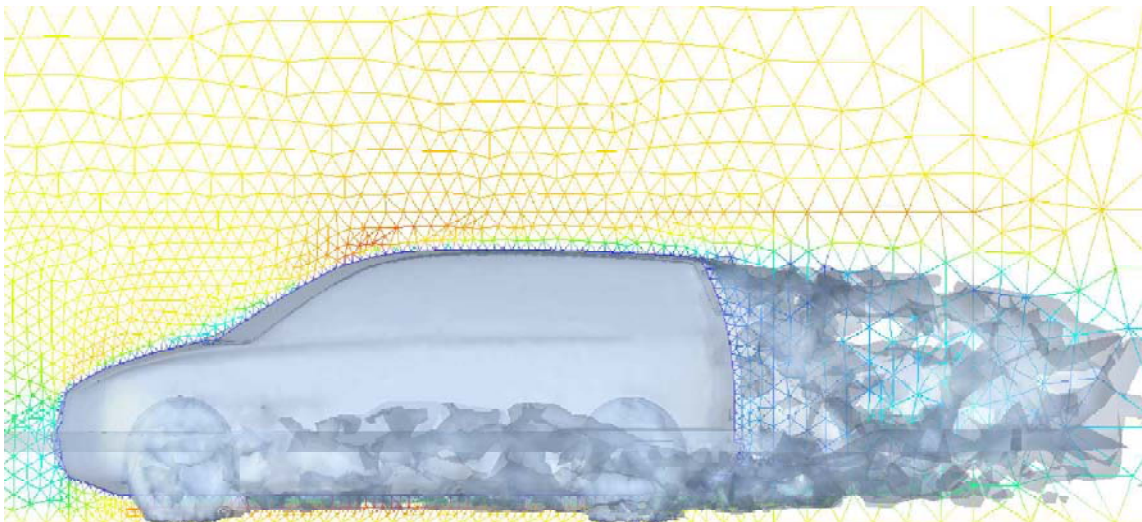


Figura 5 - escoamento turbulento em torno de uma carroçaria (Hoffman et al, 2006)

Os domínios computacionais que são definidos para a realização de uma análise também contribuem para o consumo de recursos computacionais. No caso de escoamentos exteriores, para a evitar que as condições de fronteira influenciem os resultados obtidos, estes podem assumir proporções muito superiores ao modelo virtual a analisar.

A capacidade de processamento requerida depende então, em grande parte, da complexidade dos modelos a utilizar e da quantidade de áreas transversais cujos fenómenos físicos influenciem os resultados obtidos.

Tal como para a tecnologia CAD, o desenvolvimento do “hardware” periférico (placas gráficas, monitores de alta definição, etc.) melhorou substancialmente a interactividade das aplicações CAE, tornando-as mais apelativas.

Da capacidade de visualização tridimensional surgem novas possibilidades (como a apresentação visual dos dados e a possibilidade de visualizar virtualmente acontecimentos) que seriam muito dispendiosas ou até mesmo impossíveis de reproduzir por métodos experimentais, como por exemplo visualizar o fenómeno de injeção da mistura gasosa na câmara de combustão etc.

Partindo do pressuposto que os modelos a utilizar são fiáveis e que os operadores são especialistas experientes na área, a utilização da tecnologia CAE proporciona grandes vantagens como:

- A redução de custos, pela realização de estudos virtuais evitando assim análises experimentais demoradas e dispendiosas;
- A facilidade com que se podem analisar várias abordagens diferentes;
- A facilidade com que se podem realizar alterações;
- Analisar condições muito difíceis ou mesmo impossíveis de reproduzir em ensaios experimentais;
- O volume de dados que é possível obter. Os conhecimentos obtidos através de análises computacionais podem ser bastante superiores aos obtidos através de análises experimentais, uma vez que é possível contemplar, medir e analisar simultaneamente um espectro muito superior de fenómenos interagindo entre si.

- A grande velocidade com que os dados podem ser obtidos.
- A evolução tecnológica dos computadores e periféricos permite uma constante melhoria da eficácia da tecnologia CAE e o constante alargamento do seu espectro de utilização.

Estas vantagens fizeram com que esta tecnologia tivesse tal impacto na indústria, que actualmente a sua evolução serve de “Benchmark” para o desenvolvimento das áreas tecnológicas que possibilitaram inicialmente o surgimento da tecnologia CAE.

No caso da indústria automóvel, a tecnologia CAE tornou-se parte integrante do processo de desenvolvimento automóvel. Tanto que o primeiro protótipo, com o qual são realizados ensaios, independentemente da área de estudo, é virtual. Em resumo poderia concluir-se que a tendência em reduzir ao mínimo a análise experimental, no desenvolvimento geral de qualquer automóvel, é apenas limitada pela velocidade de desenvolvimento desta tecnologia e das suas tecnologias adjacentes.

Capítulo 3

DESENVOLVIMENTO DA CARROÇARIA DO VEECO

3.1. INTRODUÇÃO AO CAPÍTULO 3

Neste capítulo é apresentado todo o processo de desenvolvimento da carroçaria do VEECO, descrevendo das diferentes fases de desenvolvimento da carroçaria, desde a fase de design até à obtenção um modelo digital CAD.

Apesar o processo de design do VEECO sair fora do âmbito deste trabalho, este será brevemente descrito neste capítulo uma vez que as decisões adoptadas nesta fase do projecto influenciaram fortemente o posterior processo de desenvolvimento da carroçaria.

O VEECO RT é um projecto de desenvolvimento destinado a uma produção de pequenas séries, no qual obviamente, a disponibilidade de recursos (sejam eles recursos humanos, de hardware ou financeiros) é algo limitada quando comparado com os projectos de desenvolvimento de automóveis em série da indústria automóvel.

É então facilmente deduzível que as abordagens e metodologias da indústria automóvel poderão em muitos casos apenas servir de linha orientadora para este projecto. Neste sentido foi elaborado o seguinte subcapítulo (“Desenvolvimento de uma carroçaria automóvel”) para objectivar as diferenças entre o processo de desenvolvimento da carroçaria do VEECO e um processo de desenvolvimento típico de carroçarias da indústria automóvel. Permitindo ao leitor estabelecer uma relação entre as diferenças nas fases do desenvolvimento da carroçaria e as respectivas diferenças em termos de disponibilidade de recursos.

3.2. DESENVOLVIMENTO DE UMA CARROÇARIA AUTOMÓVEL

A concepção de uma carroçaria automóvel é composta por várias fases, desde o início do processo de desenvolvimento até à obtenção do produto final. Este texto representa, de forma generalizada, o desenrolar típico do processo de desenvolvimento de carroçarias na indústria automóvel.

De acordo com (Grabner, 2006), na fase de design são realizados os primeiros estudos e representações do futuro veículo. Após a escolha do design para o novo produto, é criada uma modelo à escala 1:4 a partir de "Clay", uma massa desenvolvida especialmente para construção de modelos. Este modelo permite acrescentar ou remover camadas de "Clay", para realizar alterações ou primeiras correcções na forma geométrica predefinida para a carroçaria. O modelo em "Clay" é depois revestido com uma película resistente à pintura, permitindo assim a pintura do mesmo. Após pintura torna-se possível avaliar as linhas de reflexão da carroçaria e a sua forma geométrica com maior eficácia. Este modelo, se validado, é digitalizado em três dimensões utilizando uma máquina de medição de coordenadas, obtendo-se uma nuvem de pontos digital que caracteriza a geometria.

Uma nuvem de pontos é um conjunto de pontos no espaço 3D cujas coordenadas, segundo um sistema de eixos cartesianos x, y, z , definem geometricamente um objecto digitalizado.

Com os dados obtidos da digitalização, em forma de nuvem de pontos, é feito o primeiro "Strak", que serve de fronteira entre os departamentos de design e de desenvolvimento técnico da carroçaria.

Um "Strak" é uma geometria que contém todos os detalhes visíveis ao cliente respeitando as exigências técnicas em causa.

Este "Strak" é realizado à escala 1:1 e serve de base para a maquinação de um modelo à escala 1:1 da carroçaria. O modelo maquinado é construído, sobre uma estrutura base em forma de grelha, a partir da junção de várias superfícies fresadas, sobre as quais é depois aplicada uma camada de "Clay" para se obter um "Strak" pormenorizado. Aplicando o mesmo processo, que o descrito anteriormente, o "Strak" pormenorizado é pintado, permitindo avaliar ao pormenor a forma e as superfícies do modelo à escala 1:1.

Após a avaliação pormenorizada do modelo 1:1 este é novamente digitalizado fornecendo dados, ao departamento de desenvolvimento técnico da carroçaria, que possibilitam a realização de melhorias técnicas na carroçaria.

Com o desenvolvimento actual dos softwares CAD é possível realizar a análise virtual da carroçaria e das suas linhas de reflexão, permitindo uma avaliação rápida da forma e das superfícies do modelo. Actualmente na fase de design são utilizados softwares, como o módulo “Image & Shape” do CATIA, que permitem fazer a interligação entre o design e o posterior desenvolvimento técnico da carroçaria. A utilização destes softwares torna possível realizar todas as etapas virtualmente, facilitando a interface entre os departamentos.

3.3. PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DA CARROÇARIA DO VEECO

Contabilizando as necessidades do projecto, bem como a necessidade de obter um processo de desenvolvimento eficiente (que permite uma boa interacção entre as diferentes áreas transversais e uma optimização do número de etapas necessárias), o processo de desenvolvimento da carroçaria do VEECO no âmbito deste trabalho foi realizado de forma a sustentar três áreas distintas de trabalho:

- A obtenção de um modelo digital para a maquinação do primeiro protótipo;
- A obtenção de modelos digital para estudos aerodinâmicos;
- A reconstrução da carroçaria em “software” CAD.

Este processo encontra-se descrito esquematicamente na Figura 6.

Figura 6 - Processo de desenvolvimento da carroçaria do VEECO

Para o desenvolvimento deste trabalho foi necessário realizar uma selecção entre os diversos softwares CAD disponíveis no mercado. O software seleccionado foi o CATIA V5 devido às poderosas ferramentas que este contempla, nas áreas da engenharia inversa, da modelação de superfícies e do seu tratamento e análise, fundamentais para a realização deste trabalho.

A utilização deste software segue também a tendência da indústria automóvel, uma vez que este é um dos “softwares” CAD de maior utilização neste sector.

O programa CATIA (Grabner, 2006) foi desenvolvido em 1978 para a indústria aeronáutica e aeroespacial pela Dassault Systems, sendo actualmente um dos sistemas CAD/CAM mais utilizados mundialmente.

Como este programa foi originalmente construído para a modelação de superfícies, inicialmente para a construção de sólidos era necessário algum entendimento de como se definem matematicamente e geometricamente os sólidos.

Em abordagens CAD orientadas para a modelação de superfícies o volume de um corpo é definido pelas faces planares (FAC) que o compõem, se o volume não puder ser descrito por faces planares estas terão que ser primeiro definidas matematicamente pelas suas superfícies (SUR).

Devido à enorme necessidade de modelação de sólidos, actualmente o CATIA contém um módulo dedicado para a construção de sólidos, sem ter que recorrer a complexas metodologias construtivas, permitindo a modelação de modelos puramente sólidos.

Devido às suas origens, o desenvolvimento de geometrias complexas (como fuselagens de aeronaves ou carroçarias de carros) é uma das maiores qualidades deste programa.

Actualmente o CATIA é um software modular que abrange uma variedade de produtos, que permitem inúmeras vantagens num ambiente de engenharia simultânea entre construção, simulação e produção de produtos.

3.3.1 PROCESSO DE DESIGN

Estabelecidas as directrizes para o design da carroçaria, a solução de design começou a ser explorada através de esboços livres, indicados na Figura 7.

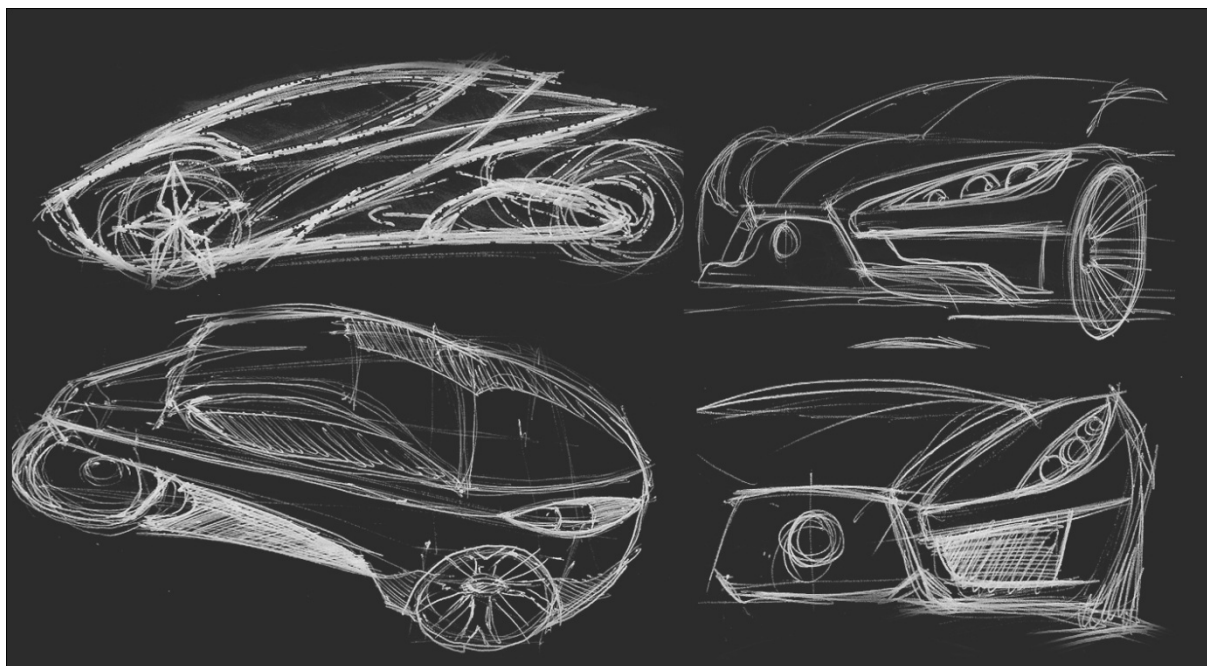


Figura 7 - Primeiros esboços da solução de design (Projecto VEECO, 2010)

Com o design definido, o próximo passo a dar é a realização de um primeiro modelo da carroçaria.

A realização de modelos “Clay” da carroçaria do VEECO RT não seria viável devido a condicionantes, como:

- Falta de recursos tecnológicos - para o processo de realização de modelos em “Clay” fornecer valor acrescentado ao projecto de desenvolvimento de uma carroçaria é, obrigatoriamente, necessário a existência de meios que permitam realizar a sua digitalização, como uma máquina de medição de coordenadas;

- Falta de recursos humanos – enquanto que na indústria automóvel um projecto, na sua fase de design, tem à sua disponibilidade um departamento de Design, este projecto contou apenas com um "designer";

O primeiro modelo do VEECO foi então realizado virtualmente no software SketchUp, que além de ser bastante intuitivo, permite uma exploração livre da forma tridimensional e a realização de “renders” fotorrealistas. Este software é também bastante económico quando comparado com outros “softwares” como o CATIA.

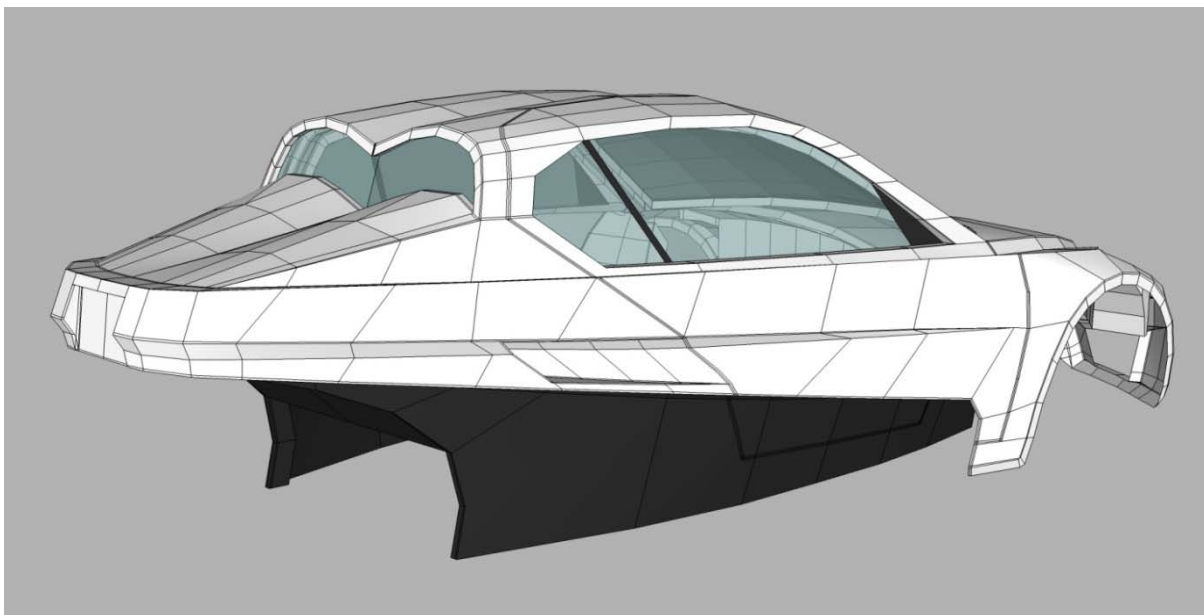


Figura 8 - Modelo final da carroçaria em malha de polígonos realizado no software SketchUp (Projecto VEECO, 2010)

O primeiro modelo foi realizado usando uma malha de polígonos de maiores dimensões (ver Figura 8), o que simplifica o processo de modelação e faculta ao modelo uma maior maneabilidade no caso de alterações.

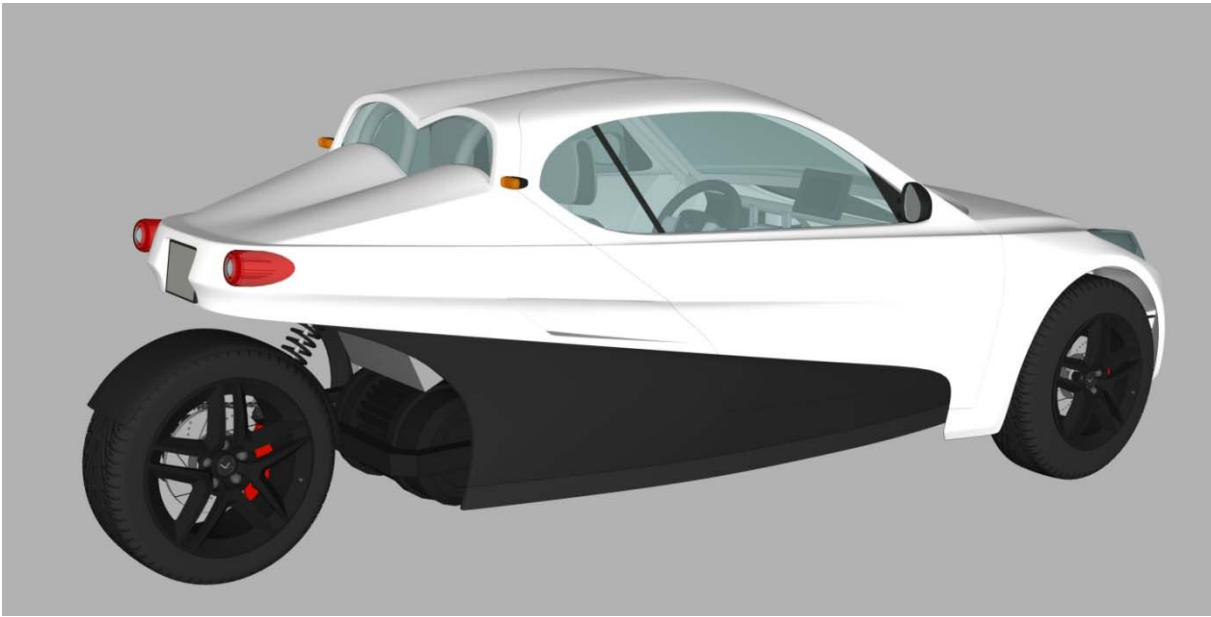


Figura 9 - Modelo da carroçaria suavizada realizado no software SketchUp (Projecto VEECO, 2010)

A posterior suavização das superfícies é obtida pela subdivisão da malha em polígonos de menores dimensões. A Figura 9 mostra a carroçaria do VEECO com uma subdivisão da malha de polígonos de factor 2 (Projecto VECCO, 2010).



Figura 10 - "Renders" fotorrealistas da proposta final de design do VEECO realizados no software SketchUp (Projecto VEECO, 2010)

Aplicando texturas conseguem-se obter as imagens fotorrealistas, visíveis na Figura 10, que permitem uma visão do veículo em ambiente realista, muito importante na fase inicial de divulgação do projecto.

3.3.2 PROCESSO DE EXPORTAÇÃO E CONVERSÃO DE DADOS

Apesar da carroçaria modelada em Sketchup apresentar uma boa capacidade de visualização da carroçaria e permitir suavizar esboços grosseiros criando assim “renders” fotorealistas, este software destina-se essencialmente a modelação e animação 3D do ponto de vista de design gráfico, não permitindo introduzir nos modelos o rigor matemático, necessário para a construção CAD e futura análise computacional.

A utilização deste software proporcionou certamente algumas vantagens como o seu baixo custo, simplicidade e facilidade de utilização, importantes principalmente na fase inicial deste projecto onde a ênfase seria a elaboração e apresentação de um modelo para divulgação. No entanto, com o início da fase de engenharia do projecto, a natureza deste software obriga ao seu abandono e à exportação dos seus modelos para um software CAD, o que envolve diversas desvantagens que serão apresentadas ao longo deste subcapítulo.

A primeira desvantagem que ocorre, logo à partida, é a necessidade de definir um processo relativamente elaborado de exportação/conversão/importação de dados, simplesmente para se conseguir obter o modelo da carroçaria num formato de dados neutro, possível de executar em qualquer “software” CAD, sem que ocorram demasiadas perdas de informação nos dados.

Foram realizadas diversas tentativas de exportação directa, ou seja exportar directamente do SketchUp para um formato de dados possível de importar para um “software” CAD, no entanto sem obter os resultados desejados. Será de seguida descrita apenas a metodologia de exportação directa com a qual se obteve os melhores resultados finais. Esta apesar de não ser a metodologia aplicada neste projecto, poderá ser uma técnica eficaz a aplicar em casos onde a complexidade geométrica não seja tão elevada.

3.3.2.1 EXPORTAÇÃO DIRECTA

A versão profissional do SketchUp permite a exportação para alguns formatos de dados diferentes, como o formato de dados DWG. O formato DWG do programa AutoCAD da Autodesk, permite o armazenamento de dados 2D e 3D e é suportado por diversos sistemas CAD.

Os dados da carroçaria no formato DWG conseguem ser importados com sucesso para o software SolidWorks, no entanto esta abordagem de exportação além de elevados tempos de processamento, leva a perdas de informação devido ao elevado volume de dados em causa. Esta metodologia de importação de dados funciona bastante melhor se não se usufruir da capacidade de suavização, utilizando em vez disso um modelo com uma malha de polígonos de maiores dimensões. No entanto esta simplificação não é viável para produtos com um elevado nível de exigência quanto à qualidade das suas superfícies.

A grande vantagem deste método é que não requer softwares intermédios para realizar a exportação/importação para softwares CAD.

3.3.2.2 EXPORTAÇÃO INDIRECTA COM CONVERSÃO DE DADOS

Para se conseguir usufruir melhor dos modelos da carroçaria na sua forma suavizada, é necessário que os componentes geométricos da malha suavizada sejam convertidos para NURBS, podendo depois a nova geometria NURBS ser importada para um sistema CAD.

NURBS são representações matemáticas que conseguem modelar com precisão qualquer forma geométrica, desde uma simples linha, círculo ou arco 2D, até superfícies complexas ou sólidos 3D. Devido à sua flexibilidade e precisão, modelos NURBS podem ser utilizados por uma variedade de processos desde a modelação, animação, até ao fabrico (Rhinoceros 4.0 User's guide, 2008).

Apesar deste processo ser a forma mais viável de exportar os dados sem grandes perdas de informação, traz consigo uma série de inconvenientes, como:

- A conversão para NURBS implica um aumento substancial no volume de dados, resultando num aumento substancial do tamanho do ficheiro. Verificando-se um volume de dados de aproximadamente 30 MB antes da conversão e de 100 MB após a conversão para NURBS.

Dados no formato de malha são ideais para efeitos de visualização, uma vez que o seu volume de dados é sempre menor do que dados baseados em representações matemáticas como NURBS, por esta razão este é um dos principais formatos de utilização em softwares de design gráfico. No entanto este formato também tem aplicação em softwares CAD, um exemplo será formato de dados CGR do CATIA que é largamente utilizado quando se necessita carregar elevados volumes de dados apenas para efeitos de visualização.

- Os softwares CAD mais habituais do mercado não incorporam esta capacidade de conversão para NURBS, sendo portanto na maioria dos casos necessário a existência de mais de um software que permita esta conversão, como por exemplo o software Rhinoceros (Rhino);

O Rhino é um software comercial de modelação 3D baseado em NURBS, no entanto este software também utiliza malhas poligonais para efeitos de visualização, permitindo por isso a conversão de NURBS em malha e vice-versa. Esta capacidade juntamente com a habilidade de importar e exportar uma grande quantidade de formatos de dados, permite a sua utilização como software intermédio de importação, conversão e exportação entre diversos programas de modelação tridimensional.

O processo de exportação, conversão e importação desenvolvido, que permite a importação de um modelo tridimensional realizado em SketchUP para qualquer software CAD, é composto pelas três etapas descritas abaixo:

1. O modelo suavizado da carroçaria é exportado utilizando o formato de dados 3DS (o formato nativo do “software” de modelação, animação e “renderings” 3D Studio MAX da Autodesk), utilizando a versão profissional SketchUp Pro.
2. É realizada a conversão da geometria na forma de malha para NURBS, utilizando o programa Rhino 4.0, que permite a importação do formato de dados 3DS. É importante salientar que o número de polígonos da malha para a conversão é limitado,

logo para se evitar limitações de suavização, deve-se utilizar o modelo dividido pelo seu eixo de simetria, se este for simétrico.

3. Os dados convertidos são exportados utilizando um formato neutro (IGES, STEP, etc.). Este é um formato neutro, utilizado tipicamente para a troca de dados entre softwares CAD com formatos nativos diferentes. Utilizando os dados 3D da carroçaria neste formato é possível a sua importação para qualquer software CAD da actualidade.

A geometria NURBS exportada para o formato neutro IGES, além da importação para um software CAD, permite também a importação para softwares CAM, uma vez que este é um formato de eleição para a maquinação CNC.

A definição deste processo de exportação e conversão de dados, possibilitou a preparação de um modelo (muito restringido) para maquinação no software SketchUp (Figura 11), com o qual foram maquinados os moldes para o primeiro protótipo ainda antes da existência de um modelo CAD viável.

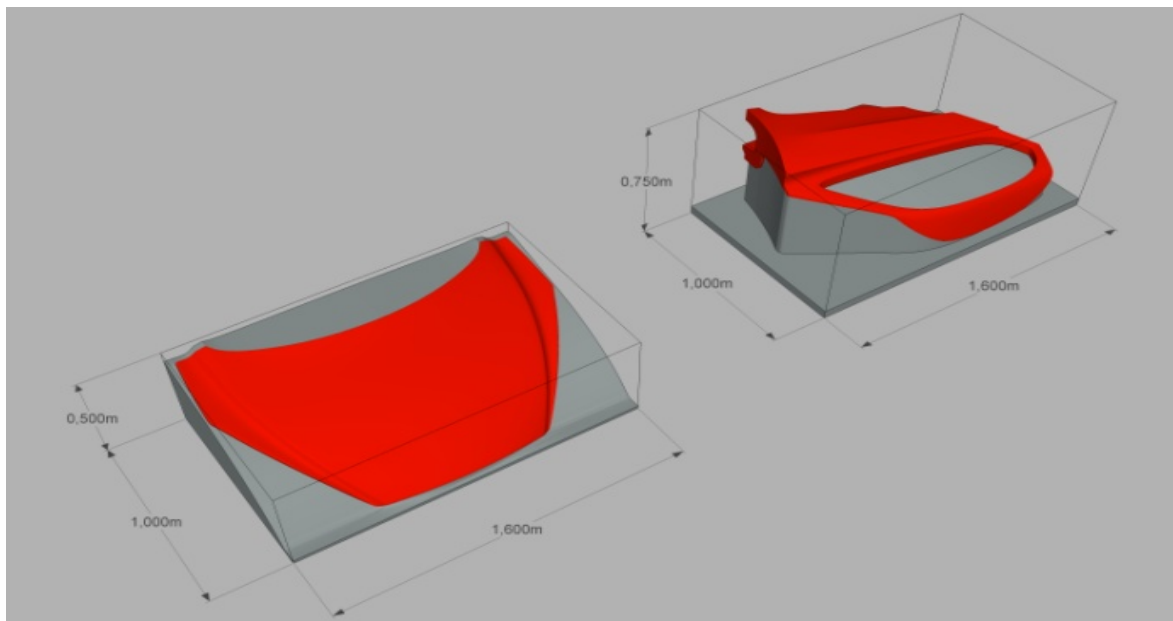


Figura 11 - Modelos de maquinação realizados no software SketchUp (Projecto VEECO, 2010)

Neste caso as restrições impostas pela utilização do modelo SketchUp não são relevantes, uma vez que a carroçaria e os seus componentes obtidos através dos moldes maquilados serão posteriormente trabalhados manualmente de forma a obter um bom resultado final.

Uma grande desvantagem é que o modelo da carroçaria obtido pelo processo acima descrito é uma geometria morta, que só servirá como base para a modelação CAD, requerendo previamente um tratamento exaustivo dos dados.

Outra grande desvantagem e talvez uma das maiores desvantagens que surge da utilização do SketchUP para a realização dos modelos de design, é que a introdução de alterações por parte do design implica a repetição de todo o processo de exportação, conversão e tratamento dos dados.

A utilização de um software como o CATIA V5, que incorpora módulos específicos para design como o Image & Shape, teria evitado o desenvolvimento de novas metodologias e processos adicionais para a importação de dados, uma vez que o modelo obtido utilizando o módulo de design já é um modelo CAD. Este modelo pode ser posteriormente aberto num módulo de CAD como o GSD (Generative Shape Design) ou Frestyle (Freestyle Shaper, Optimizer and Profiler) permitindo a realização de melhorias técnicas, podendo-se a qualquer altura retornar novamente ao módulo de design para a realização de alterações. Assim consegue-se otimizar ao máximo a interacção entre o design e o desenvolvimento técnico do produto, sem necessitar de complexos e demorados processos de exportação, conversão e tratamento de dados. No entanto, estes softwares são dispendiosos e requerem um "know how" especializado para a sua manipulação.

3.3.3 PROCESSO DE ENGENHARIA INVERSA

Depois de definido o processo de importação dos dados para o software CAD surge uma nova problemática: a carroçaria importada, visível na Figura 12, é uma geometria morta composta por milhares de pequenas superfícies.

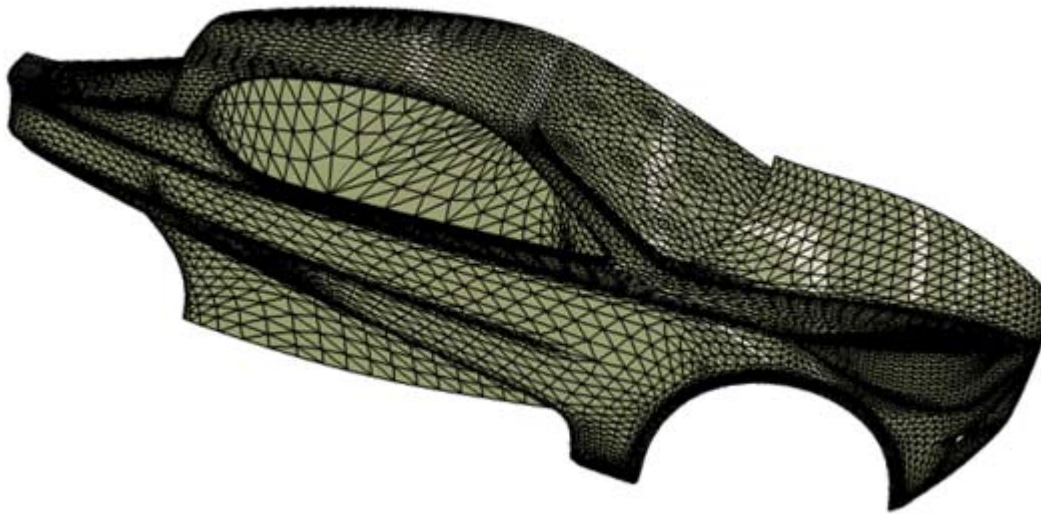


Figura 12 - Carroçaria obtida através do processo de importação

Neste estado os dados importados não podem ser utilizados, de forma eficaz, para o processo de reconstrução e análise da carroçaria. Baseando-se no processo típico de desenvolvimento de carroçarias da indústria automóvel e nos seus métodos de engenharia inversa, foi definido um método alternativo de engenharia inversa que permite converter as superfícies da geometria importada numa malha poligonal triangular (um “Tessellate”), utilizando o módulo Shape Sculptor do CATIA.

Um “Tessellate” é a repetição de um padrão que cobre uma superfície sem espaços vazios ou sobreposições. No segmento do desenho assistido por computador um “Tessellate” é geralmente composto por polígonos regulares, que podem ser triângulos, quadrados ou hexágonos ou por uma mistura destes neste caso sendo designado por “Tessellate” semi-regular.

A malha obtida por conversão é similar ao tipo de malha obtido através de um processo de engenharia inversa baseado na digitalização tridimensional com uma máquina de digitalização.

A grande diferença, entre as malhas obtidas pelos dois processos, está na base a partir da qual aquelas são geradas. No caso do processo típico de engenharia inversa por digitalização, a geometria base terá que ser em primeiro lugar digitalizada de forma a obter uma nuvem de

pontos tridimensional. A densidade e precisão da nuvem de pontos obtida dependem em primeiro lugar do "hardware" disponível ou no caso de uma digitalização manual do tempo investido no processo (apenas utilizado para objectos de pequenas dimensões). Para gerar uma malha a partir da nuvem de pontos digitalizada terá que ser primeiro realizado um tratamento dos dados da mesma. O tratamento típico de uma nuvem de pontos obtida por digitalização, segue o seguinte processo:

- 1) Os dados digitalizados são importados para um software específico para o tratamento dos dados, como o Digitized Shape Editor (DSE) do CATIA. A Figura 13 mostra uma nuvem de pontos sem tratamento de dados, proveniente da digitalização de uma porta.

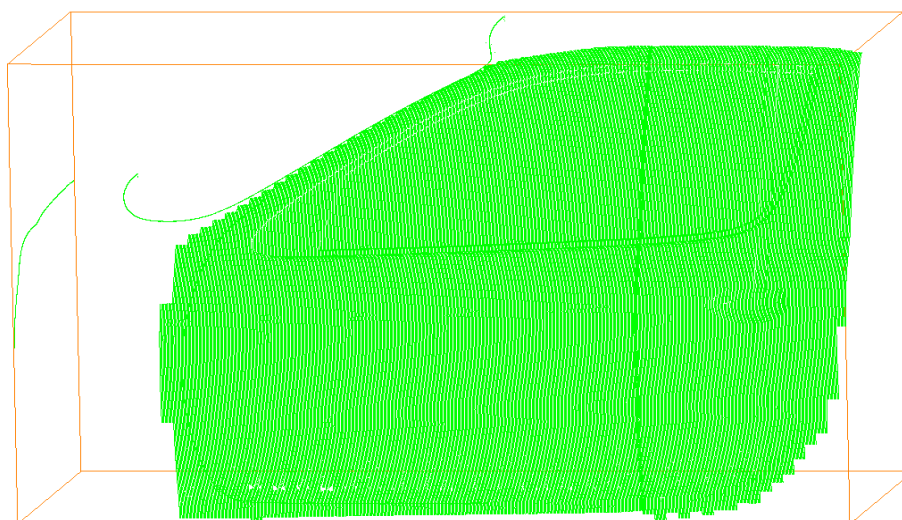


Figura 13 - Nuvem de pontos resultante da digitalização de uma porta (CATIA V5. *Digitized Shape Editor*)

- 2) De seguida é realizado o processamento de pontos, este tratamento consiste essencialmente na filtragem e remoção de pontos desnecessários. Este tratamento de dados é realizado com o objectivo de obter boas densidades de pontos junto das linhas características do objecto digitalizado. A Figura 14 mostra a nuvem de pontos após o processamento.

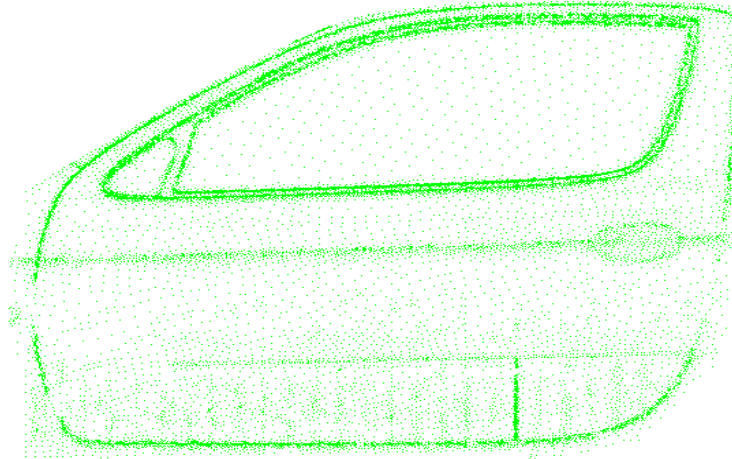


Figura 14 - Nuvem de pontos após o processamento de pontos (CATIA V5. *Digitized Shape Editor*)

- 3) Por fim é gerada uma malha a partir da nuvem de pontos tratada, que por sua vez também será tratada e otimizada de forma a obter uma boa base para o processo de reconstrução. A Figura 15 mostra a malha final obtida.



Figura 15 - Malha gerada sobre a nuvem de pontos tratada (CATIA V5. *Digitized Shape Editor*)

A qualidade da malha final depende essencialmente da qualidade dos dados digitalizados e da experiência do utilizador.

Em contrapartida a malha de polígonos (“Tessellate”) obtida por conversão apresentará uma densidade de polígonos e uma precisão definida pelo utilizador, aumentando o volume de dados com o aumento da precisão. Neste caso a qualidade da malha final depende essencialmente da qualidade da geometria base e dos recursos computacionais disponíveis.

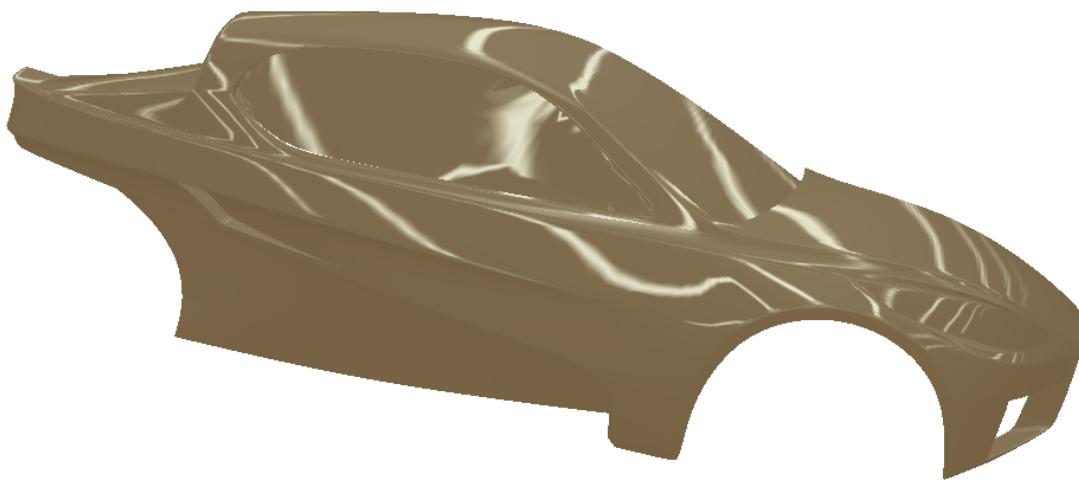


Figura 16 - Malha obtida realizando um “Tessellate” da carroçaria

A Figura 16 mostra o “Tessellate” da carroçaria do VEECO, obtido a partir das superfícies desta, aplicando um desvio máximo de 0,001 mm.

3.3.3.1 TRATAMENTO DE DADOS

Ao contrário dos dados obtidos por digitalização, como o modelo importado já se encontra suavizado, os dados obtidos do “Tessellate” não requerem obrigatoriamente um posterior tratamento para se obter uma boa base de modelação para o processo de reconstrução da carroçaria.

No entanto, como a reconstrução da carroçaria é um processo demorado, foi definido um processo automatizado de reconstrução da carroçaria que permite obter um modelo com o qual se pode iniciar algumas actividades preliminares de análise computacional. Esta temática será desenvolvida com maior pormenor no próximo subcapítulo. O tratamento de dados

realizado destina-se então à correcção e à melhoria da qualidade dos dados obtidos (do “Tessellate”) para o processo de reconstrução automática, uma vez que quanto melhor estes forem, melhor será o resultado obtido.

O tratamento dos dados, sob a forma de malha poligonal (“Tessellate”), foi realizado no módulo DSE do CATIA e está dividido em duas fases distintas.

Na primeira fase pretende-se corrigir falhas no modelo provenientes da modelação da carroçaria no SketchUp ou de perdas de informação causadas pelo processo de exportação e conversão utilizado para obter um formato de dados neutro (o qual permite a importação para um software CAD).

Em primeiro lugar é necessário limpar a malha, ou seja a malha tem que ser analisada e posteriormente eliminadas todas as inconsistências detectadas como polígonos corrompidos, duplicados, isolados, com orientações inconsistentes etc. O módulo DSE do CATIA contém uma ferramenta que permite realizar as duas acções em simultâneo o “Mesh Cleaner”.

Mesmo que não sejam facilmente visíveis, a malha contém pequenas discontinuidades, já existentes no modelo ou provenientes da sua limpeza, que deverão ser preenchidas. Utilizando o comando “Fill Holes” é possível localizar e preencher automaticamente as falhas. Esta ferramenta analisa a geometria e assinala todas as discontinuidades, podendo o utilizador definir quais as falhas a preencher. A Figura 17 apresenta as discontinuidades presentes na malha, a verde as discontinuidades que se pretende preencher (falhas na malha) e a vermelho as discontinuidades a manter.

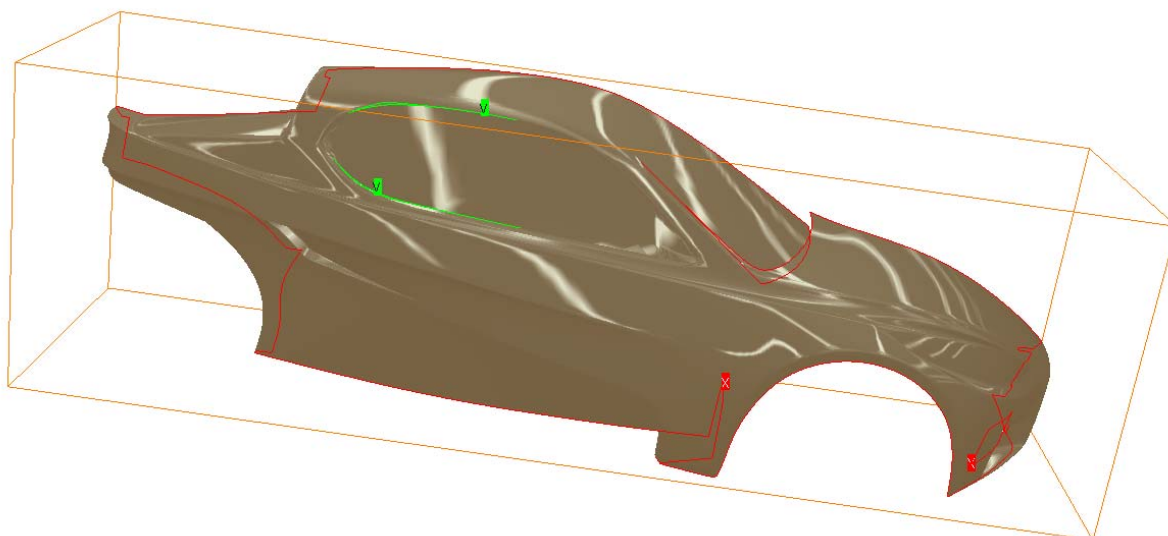


Figura 17 - Descontinuidades detectadas na malha da carroçaria

Esta ferramenta, apesar de útil, não permite sempre o preenchimento de todas as falhas, estas terão então que ser preenchidas manualmente (preenchendo-se as falhas polígono a polígono).

Como, ao realizar o preenchimento manual, é possível reintroduzir inconsistências na malha, é necessário realizar novamente uma análise da malha e caso necessário uma nova limpeza após este passo.

A segunda fase do processo de tratamento de dados destina-se à optimização e à melhoria da qualidade superficial da malha de polígonos.

Para reduzir o tempo de processamento e o volume de dados foi realizada uma redução do número de polígonos que compõem a malha, definindo para tal uma percentagem de polígonos a manter de 50% de um total de 21.342 polígonos, assumindo como aceitável um desvio máximo de 0,832 mm e um desvio médio de 0,031 mm.

No entanto a redução de polígonos altera o estado superficial da malha, sendo por isso posteriormente realizada uma suavização da mesma, assumindo como aceitável para tal um desvio máximo de 2 mm e um desvio médio de 1,771 mm.

A realização do tratamento de dados requer, no entanto, alguma experiência para saber qual o investimento de trabalho necessário para a obtenção de dados qualitativamente viáveis e a partir de que momento o posterior tratamento não fornece melhorias significativas.

Outras medidas seriam possíveis no processo de optimização, estas são normalmente aplicadas a malhas mais rudimentares como as obtidas pelo processo de digitalização. Um exemplo típico seria, entre outros, a inversão de arestas, com o objectivo de optimizar a malha em zonas que caracterizam a geometria (linhas características).

3.3.4 MODELAÇÃO DA CARROÇARIA

O processo de modelação da carroçaria do VEECO no âmbito deste trabalho divide-se em dois segmentos:

- A reconstrução automática da carroçaria;
- A modelação detalhada da carroçaria.

A vantagem desta divisão reside na possibilidade de se poder desenvolver em simultâneo duas temáticas de áreas de trabalho diferentes, melhorando a eficiência do processo global de desenvolvimento da carroçaria. Assim, através do funcionamento em paralelo de várias áreas de trabalho e o estabelecimento de mecanismos de troca de informação pretende-se, de modo semelhante aos processos definidos em muito maior escala na indústria automóvel, reduzir trabalho desnecessário e os tempos de desenvolvimento.

3.3.4.1 RECONSTRUÇÃO AUTOMÁTICA DA CARROÇARIA

O processo de reconstrução automática da carroçaria foi realizado utilizando uma funcionalidade do módulo Quick Surface Reconstruction (QSR) do CATIA V5. Como o próprio nome indica este é um processo automatizado, no qual um componente ou produto completo é automaticamente reconstruído a partir de um conjunto de dados preparados para este propósito.

O processo de reconstrução em si, utilizando este módulo, é relativamente simples, a dificuldade na obtenção de um bom resultado final reside no tratamento dos dados que servem

de base para o processo de reconstrução automática e na definição de bons parâmetros para o próprio processo de reconstrução.



Figura 18 - Carroçaria obtida através do processo de reconstrução automática em CATIA V5

A carroçaria gerada automaticamente visível na Figura 18, foi obtida utilizando a malha poligonal (“Tessellate”) da carroçaria tratada e aplicando os parâmetros visíveis na Figura 19.

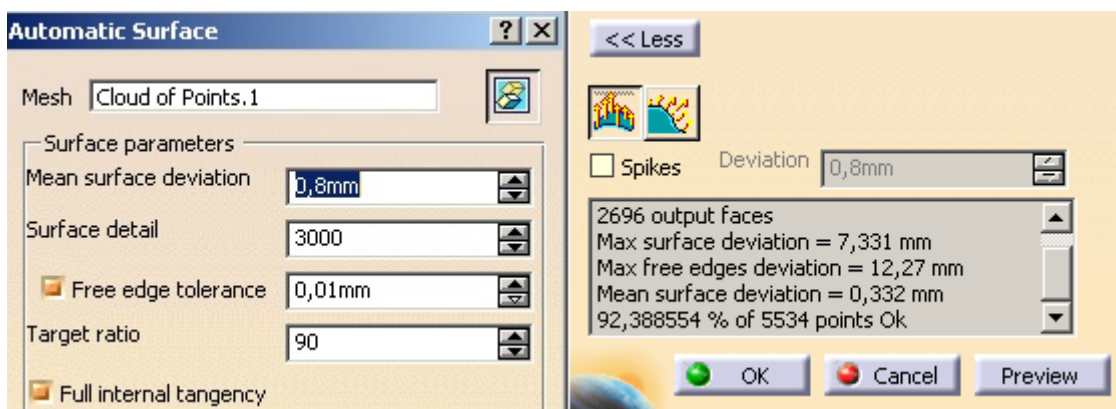


Figura 19 - Parâmetros para a definição do processo de reconstrução automática em CATIA V5

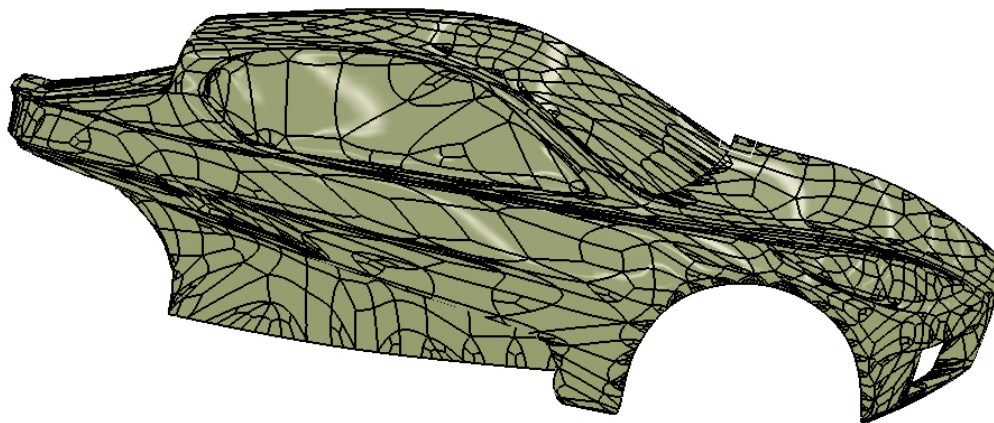


Figura 20 - Construção superficial da carroçaria obtida através do processo de reconstrução automática em CATIA V5

Os processos de reconstrução automática e de tratamento de dados encontram-se fortemente ligados. Deve-se salientar que para a obtenção do presente modelo foi necessário a acumulação de alguma experiência, realizando os processos de tratamento e de reconstrução automática de forma iterativa, até adquirir o conhecimento necessário que permite decidir até que ponto o tratamento dos dados é rentável e quais são os parâmetros ideais para o processo de reconstrução (não existe uma combinação de parâmetros ideal aplicável a todos os casos, tendo estes que ser sempre redefinidos para cada caso de aplicação).

Com este processo foi possível obter, ainda numa fase muito inicial do desenvolvimento CAD da carroçaria, um modelo CAD provisório da mesma. Apesar de ser muito limitado quanto à sua manipulação, devido à forma desorganizada como se apresenta a sua construção superficial (visível na Figura 20), este modelo após a sua conversão para sólido contempla todos os requisitos geométricos necessários para ser utilizado por outras áreas de desenvolvimento, como por exemplo o CFD.

Para obter o modelo na sua forma sólida, foi realizado um corte de intersecção entre o modelo de superfícies (com as aberturas fechadas) e um bloco sólido.

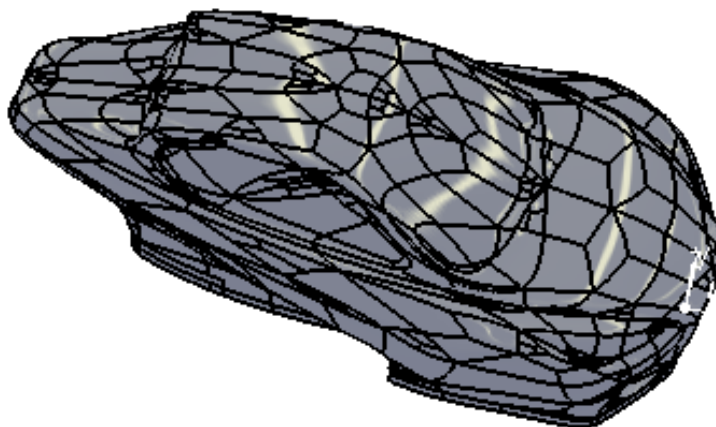


Figura 21 - Carroçaria, sem spoiler traseiro, obtida pelo processo de reconstrução automática em CATIA V5

Durante o processo de desenvolvimento da carroçaria foi realizada uma alteração de design, sendo incorporado, por motivos estéticos, um pequeno spoiler traseiro na carroçaria do VEECO. No entanto, como os ensaios experimentais em túnel de vento foram realizados utilizando um modelo baseado no design inicial (sem spoiler), foi gerado pelo mesmo processo também um modelo CAD sem spoiler (Figura 21).

3.3.4.2 MODELAÇÃO DETALHADA DA CARROÇARIA

A eficácia do processo de modelação detalhada da carroçaria também está fortemente dependente do trabalho realizado na fase de engenharia inversa: quanto melhores os dados que servem de base ao processo de reconstrução mais fácil será a definição das linhas características da geometria e menores as discrepâncias entre o modelo CAD e o modelo definido pelo design. No entanto, devido à qualidade, relativamente boa, do modelo importado da carroçaria e à especificidade do processo de engenharia inversa utilizado neste trabalho, este argumento não é inteiramente verídico para este caso de aplicação.

A qualidade mencionada (do modelo importado) refere-se unicamente ao pormenor da qualidade superficial visível (suavização); não à qualidade construtiva do modelo.

Discrepâncias serão obviamente inevitáveis, logo à partida devido a desvios introduzidos pelo processo de engenharia inversa e posteriormente pelo próprio processo de reconstrução. Como o SketchUp, apesar de permitir realizar “renders” com qualidade fotorrealista, não contém as ferramentas necessárias para a definição e avaliação de superfícies de elevada qualidade. Assim, desvios durante o processo de reconstrução (com superfícies bem estruturadas e de elevada qualidade) são inevitáveis. O processo de reconstrução foi realizado mantendo os desvios, relativamente ao modelo obtido por engenharia inversa, abaixo dos 3 mm.

Geometrias definidas por superfícies complexas, como é o caso de carroçarias automóveis, tornam-se demasiado complexas para serem modeladas com as tradicionais ferramentas de modelação de superfícies como é o caso do GSD no caso CATIA, sendo para este efeito utilizadas ferramentas específicas como *Freestyle Shaper*, *Optimizer and Profiler* (ou resumidamente designado por Freestyle) do CATIA, que poderá ser utilizado individualmente ou em conjunto com outros módulos, como o GSD.

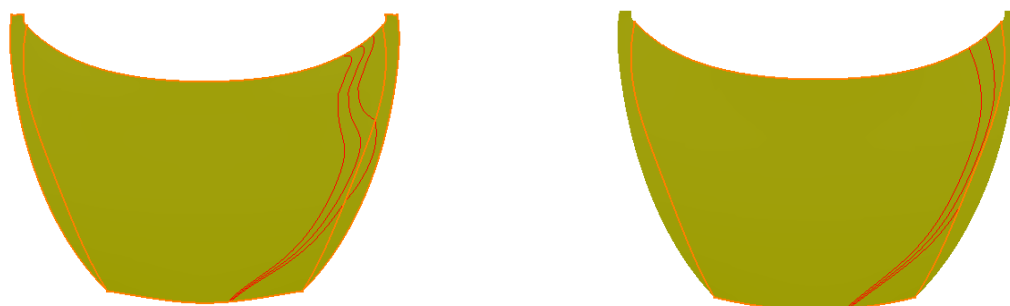
O Freestyle é utilizado para criar de raiz curvas tridimensionais (3D) e superfícies, permitindo deformar dinamicamente e analisar todos os elementos produzidos. O utilizador tem o controlo completo, sobre as curvas e superfícies criadas, em todos os níveis de continuidade até ao nível de grau dois (G2), que equivale à continuidade em curvatura. Esta ferramenta permite uma liberdade de modelação única no espaço tridimensional, abdicando da necessidade de definir esboços bidimensionais, que no módulo de GSD só é possível dentro de limites. Com ela é possível definir curvas 3D directamente no espaço tridimensional sobre a malha (obtida pelo processo de engenharia inversa). Contém também ferramentas de análise que permitem avaliar as curvas 3D geometricamente e espacialmente.

Os princípios de modelação são semelhantes aos de modelação de superfícies com ferramentas tradicionais, facultando ferramentas típicas para a definição de superfícies já conhecidas do GSD (como o “Sweep”) adaptadas de modo a proporcionarem a liberdade necessária para a definição de superfícies complexas no espaço tridimensional.

Um factor muito importante para a definição de geometrias, como por exemplo carroçarias, é a qualidade final das superfícies, que para efeitos do presente trabalho será dividida em duas áreas distintas:

- Qualidade geométrica (ou construtiva): esta abrange a qualidade das superfícies de um ponto de vista construtivo e será analisada no final deste capítulo.
- Qualidade visual: qualquer geometria composta por um conjunto de superfícies terá um certo nível de exigência quanto à aparência (superficial) final do produto, é neste contexto que são estipulados os tipos de continuidades a respeitar pelas superfícies.

Qualquer conjunto de componentes geométricos interligados no espaço bidimensional ou tridimensional, sejam eles segmentos de recta, arcos, curvas, superfícies etc., está definido por um tipo de continuidade. Este define as regras segundo as quais se processa a união destes últimos em termos geométricos. Existem três tipos de continuidade que podem ser definidos no Freestyle, a continuidade pontual (que equivale ao grau zero G_0), continuidade em tangência (que equivale ao grau um G_1) e continuidade em curvatura (G_2). A aparência final de um objecto (a nível estético) dependerá do tipo de constrangimentos de continuidade aplicados entre as suas superfícies adjacentes.



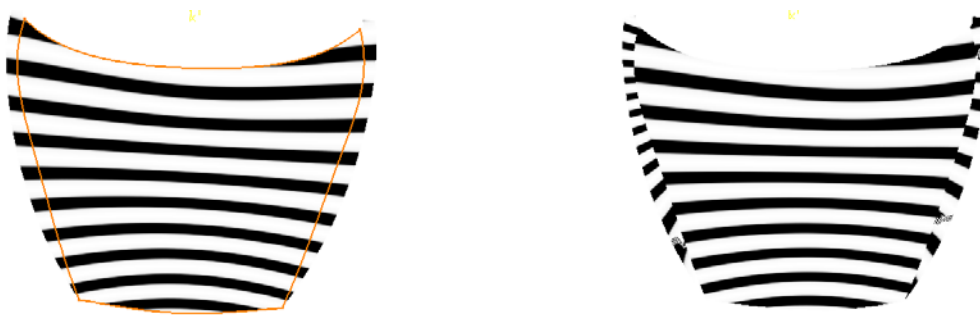


Figura 22 - Comparação entre uma superfície definida com continuidade G2 e G0

Na Figura 22 temos representada uma comparação de qualidade superficial respeitando diferentes níveis de continuidade. Para este efeito foram realizadas uma análise de linhas de reflexão e depois uma análise de mapeamento de isótopos (vulgarmente denominada por análise de zebra), utilizando o capô da carroçaria definido com continuidade em curvatura (esquerda) e com continuidade pontual (direita).

As descontinuidades nas linhas de reflexão e nas linhas de “zebra” visíveis nas análises da variante definida com continuidade pontual, serão posteriormente visíveis no modelo real sob a forma de defeitos estéticos.

Quanto ao processo de modelação de superfícies existem dois tipos de abordagens que podem ser tomadas:

- Baseada em curvas: esta abordagem consiste na criação de curvas que servem de base para a posterior modelação das superfícies.
- Baseada em superfícies: esta abordagem consiste na criação directa de superfícies sem primeiro definir curvas base, estas superfícies podem depois ser manipuladas através dos seus pontos de controlo até se obter a forma desejada. Este processo também permite a manipulação de superfícies existentes.

A abordagem baseada em superfícies apresenta vantagens para fase de optimização da carroçaria (resultante do processo de análise numérica), uma vez que a sua capacidade de

manipular superfícies existentes torna esta abordagem ideal para implementar rapidamente alterações no modelo CAD da carroçaria.

Para o processo de modelação da carroçaria foi utilizada a abordagem baseada em curvas, podendo o processo de modelação da carroçaria pode ser dividido em três fases distintas:

1. Planeamento e definição da estratégia de modelação;
2. Definição, análise e correcção das curvas características;
3. Definição, análise e correcção das superfícies.

Embora o processo de definição de curvas e superfícies em separado seja relativamente simples, a sua definição para toda uma geometria, atendendo à precisão e aos níveis de continuidade pretendidos, é extremamente complexa e demorada. É por isso importante a realização de uma fase de planeamento, antes do início do processo de construção CAD propriamente dito, na qual será estabelecida uma estratégia de modelação, que atenda às exigências do modelo e do projecto.

Um factor muito importante para o sucesso de uma estratégia de modelação, assenta no desenvolvimento de uma boa estrutura de modelação, ou seja uma estrutura organizada, que permita manter uma visão transparente sobre o trabalho realizado. Neste sentido foi definida uma estrutura de grupos geométricos em forma de árvore, cujas ramificações apresentam a estrutura visível na Figura 23.

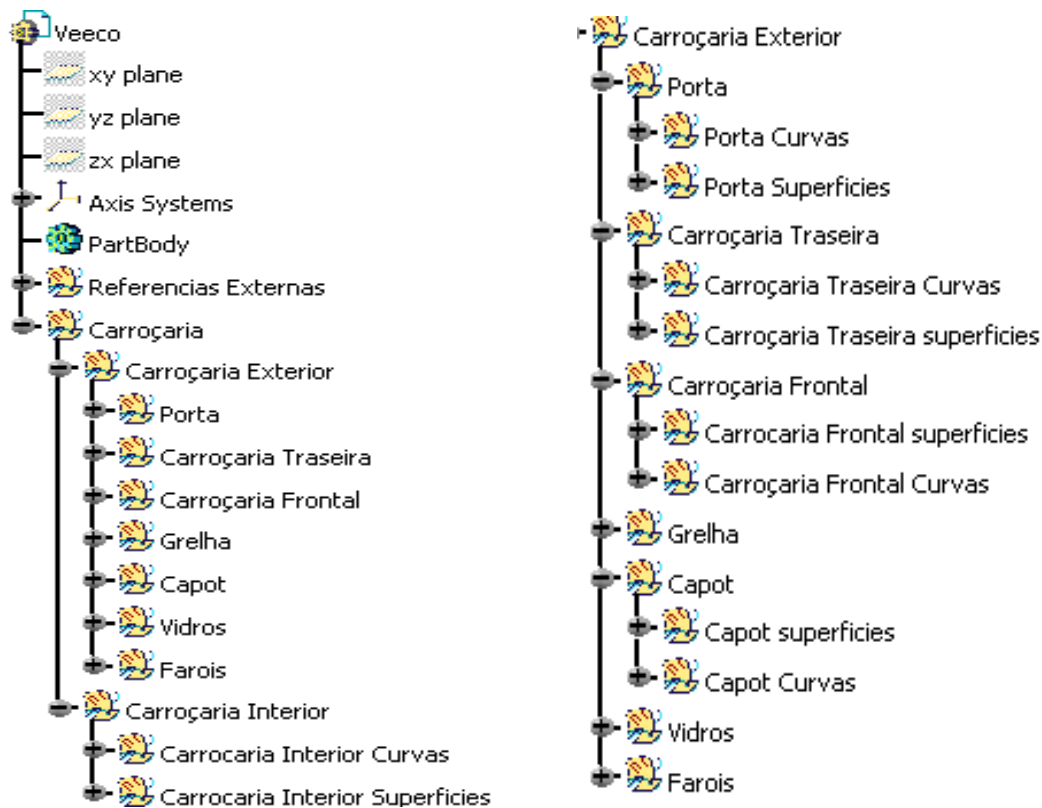


Figura 23 - Organização dos grupos geométricos para o processo de modelação da carroçaria em CATIA V5

Foram definidos dois grupos geométricos principais: um para as referências externas que servem de base para a reconstrução da carroçaria, como os dados de importação e planos de apoio (por exemplo planos de simetria) etc.; o outro grupo geométrico principal foi definido para conter toda a estrutura construtiva da carroçaria, ramificando-se em subgrupos detalhados que dividem a carroçaria em zonas e componentes. Cada componente e zona da carroçaria contém dois grupos geométricos, um dedicado ao processo de definição das curvas e outro dedicado ao processo de definição das superfícies.

Esta estrutura de modelação apresenta grandes vantagens para o processo construtivo e para as posteriores fases de desenvolvimento da carroçaria. A forma organizada como é realizado o processo construtivo torna-o menos complexo, permitindo trabalhar ou analisar apenas as curvas ou superfícies da zona ou zonas em causa, sendo que as restantes zonas de trabalho ou referências externas podem ser facilmente ocultadas da área de trabalho com o premir de um botão. Esta organização também beneficia as fases posteriores de desenvolvimento: alterações

tornam-se mais fáceis de realizar uma vez que curvas ou superfícies e as suas respectivas dependências são mais fáceis de gerir. Utilizadores externos terão mais facilidade em compreender e trabalhar sobre o modelo.

Outra grande vantagem é que, apesar da carroçaria nesta fase de desenvolvimento ainda ser um conjunto único, todos os seus elementos (como portas, capô etc.) já se encontram definidos. Tal torna possível, nesta fase, inspeccionar e analisar facilmente zonas da carroçaria individualmente (como por exemplo a sua estrutura interior, capô, portas etc.) ou mesmo a carroçaria completa ocultando zonas específicas. Esta característica poderá também facilitar o posterior desenvolvimento dos elementos individuais, uma vez que estes geralmente não se encontram definidos e têm que ser primeiro extraídos a partir do modelo (elementos como portas etc. são, para este propósito, recortados a partir do modelo único de uma carroçaria). No anexo A encontram-se representadas imagens da carroçaria segundo diferentes vistas e exemplos das características acima mencionadas.

Após a fase de planeamento inicia-se a fase de definição das curvas, estas são definidas directamente no espaço tridimensional com auxílio das referências externas. Cada curva é definida e posteriormente analisada quanto à sua curvatura e ao seu afastamento do modelo de referência (ver Figura 24 e 25).

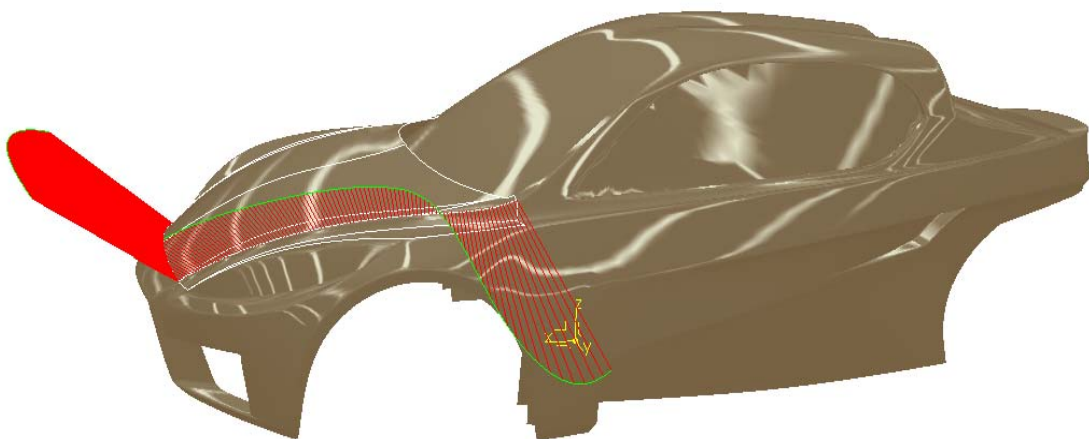


Figura 24 - Exemplo curvas do capô analisadas quanto à sua curvatura (Porcupine Curvature Analysis) em CATIA V5

A análise de curvatura permite verificar as transições de curvatura ao longo de uma curva, se existem transições bruscas (para bons resultados finais estas devem ser suaves e lineares) ou até mesmo transições indesejadas que terão implicações qualitativas no resultado final. Esta ferramenta de análise funciona em tempo real, ou seja, o utilizador pode manipular a curva em análise verificando os resultados da manipulação em simultâneo. Esta é uma característica muito útil e economizadora de tempo no processo de análise e correcção de curvas.

Para evitar que os desvios entre o modelo em construção e o modelo de referência sejam extremos, são realizadas análises de afastamento ou distância que permitem verificar o afastamento entre uma curva ou superfície e uma determinada referência. Este tipo de análise também funciona em tempo real permitindo analisar e manipular as curvas em simultâneo.

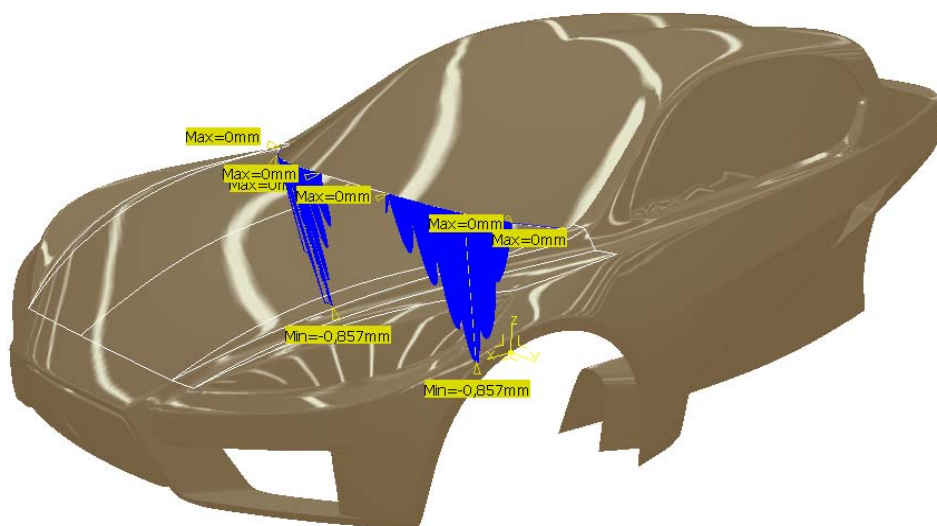


Figura 25 - Exemplo curvas do capô analisadas quanto ao seu afastamento do modelo de referência (Distance Analysis) em CATIA V5

Estas duas análises podem e devem ser realizadas em simultâneo para que a manipulação correctiva de curvas garanta uma boa qualidade final juntamente com os desvios dentro de gamas de valores aceitáveis (o que seria muito difícil garantir realizando as análises em separado).

Todas as curvas definidas sobre o modelo de referência são analisadas individualmente deste modo, adicionalmente são definidos graus de continuidade em todos os pontos de contacto entre curvas. Os graus de continuidade são definidos de acordo com as exigências estéticas e qualitativas requeridas para cada contacto.

Deste modo, são definidas todas as curvas para todos os componentes e zonas de modelação da carroçaria. A definição dos graus de continuidade nos pontos de contacto, cria uma ligação entre diferentes zonas e componentes, garantindo deste modo o seguimento das regras de continuidade entre as zonas. A dependência que se gera entre curvas nas suas zonas de contacto, possibilita a manipulação de várias curvas em simultâneo através dos seus pontos de contacto. No entanto, a manipulação de uma curva individualmente respeitando as exigências de curvatura e de tolerância já é por si complicada e demorada, tornando-se o mesmo processo muito mais complexo para o controlo simultâneo de várias curvas. Neste sentido esta capacidade não se revela tão vantajosa como se poderá inicialmente entender e a sua utilização deve resumir-se apenas ao estritamente necessário, devendo o utilizador recorrer à manipulação de curvas individualmente sempre que possível.

O resultado é a obtenção de uma rede de curvas características que serve de base para a definição de superfícies (ver Figura 26).

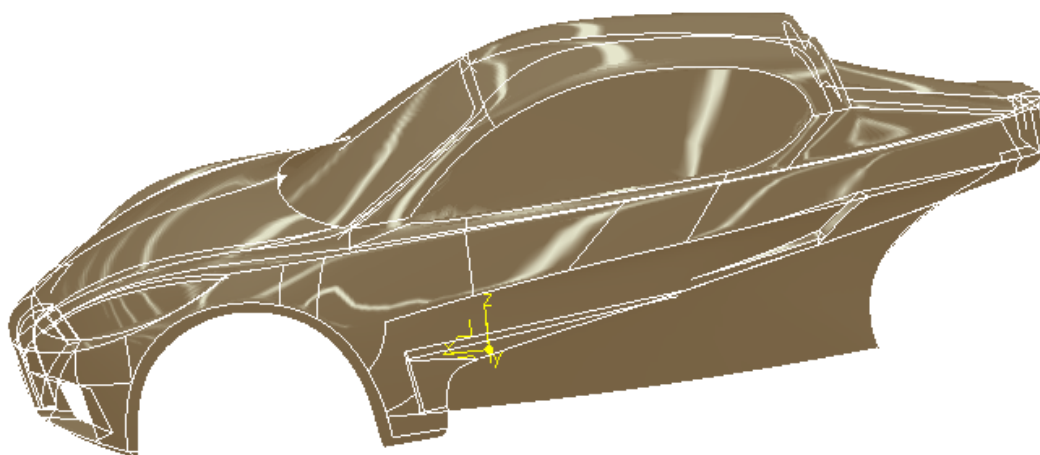


Figura 26 - Rede de curvas características definidas e CATIA V5

Definida a rede de curvas características sobre o modelo de referência (o “tessellate”) é possível avançar para a terceira e última fase, a modelação das superfícies. Semelhante à fase anterior as superfícies são definidas, analisadas e corrigidas, no entanto as superfícies além de analisadas individualmente também têm que ser analisadas em conjunto. Num primeiro passo as superfícies são definidas sobre a rede de curvas características utilizando essencialmente as ferramentas de modelação livre no espaço 3D, proporcionadas pelo módulo Freestyle. Para certos casos onde as ferramentas de modelação tradicional de superfícies se demonstraram mais viáveis, recorre-se ao módulo GSD (como por exemplo no preenchimento de espaço vazios utilizando o comando “Fill”).

Após a definição de cada superfície esta é primeiramente analisada quanto à sua curvatura máxima e mínima, com o objectivo de identificar alguma discrepância inaceitável que possa conter (como por exemplo protuberâncias) (ver Figura 27). No caso que a superfície contenha alguma discrepância esta será corrigida manipulando as curvas características que serviram de base para a sua criação.

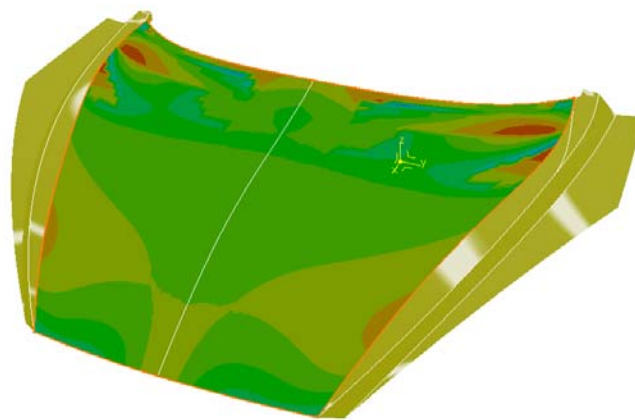


Figura 27 - Superfície do capô analisado quanto a sua curvatura em CATIA V5

A correcção de superfícies é então bastante complexa e demorada devido ao elevado número de factores a contemplar para a sua realização. Neste sentido o minucioso trabalho de definição da rede de curvas da fase anterior traz grandes vantagens quanto à redução de possíveis discrepâncias e assim influi fortemente na duração desta última fase.

De modo semelhante ao realizado na definição de curvas, os graus de continuidade também são definidos para cada contacto entre superfícies. O resultado final da conexão de superfícies é verificado utilizando as análises de linhas de reflexão e de “zebra”, anteriormente exemplificados na Figura 22. No anexo A encontram-se representadas imagens da análise de isótopos.

Se forem verificados resultados indesejados nestas análises, as superfícies envolvidas devem ser corrigidas ajustando os seus parâmetros de definição. Só em último caso deve ser realizada uma manipulação da rede de curvas. A manipulação da rede de curvas numa fase tão avançada de modelação terá implicações sobre todas as superfícies relacionadas, sendo muito difícil manipular zonas específicas sem afectar as restantes superfícies existentes.

A Figura 28 apresenta o modelo final da carroçaria obtido aplicando a estratégia de modelação anteriormente descrita, encontrando-se as suas medidas características no anexo B.

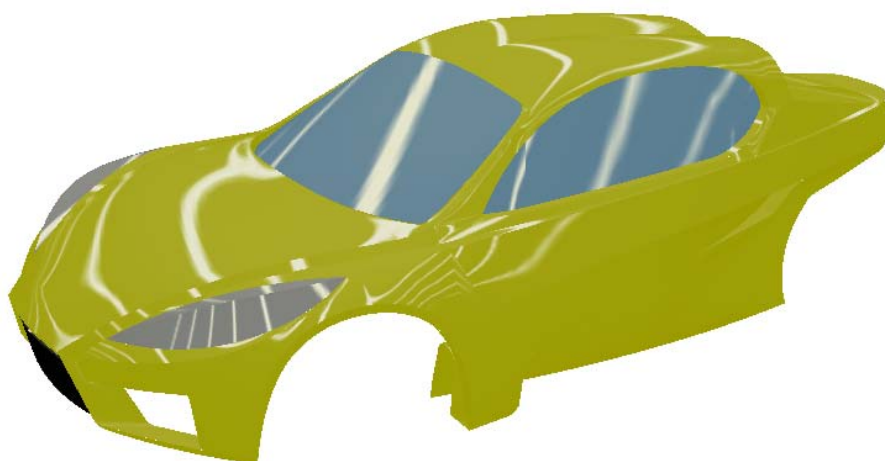


Figura 28 - Modelo final da carroçaria do VEECO RT

3.4. PREPARAÇÃO PARA A ANÁLISE NUMÉRICA

Apesar das seguintes temáticas se relacionarem com a análise numérica, foram inseridas neste subcapítulo porque os procedimentos descritos nelas são elaborados em CATIA e são um resultado directo do desenvolvimento CAD da carroçaria.

3.4.1 DETERMINAÇÃO DA ÁREA PROJECTADA

A estipulação da área projectada para uma geometria complexa como a carroçaria de um automóvel é sempre algo complicada.

Existem inúmeras formas de obter boas aproximações para a área projectada de uma geometria complexa. No âmbito deste trabalho foi explorada uma potencialidade do módulo de DSE (Digital Shape Editor) do CATIA, que permite projectar qualquer nuvem de pontos ou malha sobre um plano, obtendo-se a área projectada de qualquer geometria de forma muito simples e intuitiva.

Para a obtenção da área projectada do VEECO, foi realizado o seguinte procedimento:

- Primeiro foram fechadas as entradas de ar da malha aplicando a mesma técnica utilizada no tratamento da malha, uma vez que estas serão consideradas estanques para efeitos das análises numéricas;
- Em segundo lugar foi aplicada simetria à malha poligonal (“Tessellate”) da carroçaria, obtida durante a fase de engenharia inversa, de forma a obter o contorno completo da carroçaria;
- Num terceiro passo foi definido um plano perpendicular ao eixo horizontal da carroçaria;
- Num último passo foi aplicado o comando “Projection On Plane” que permite projectar a malha da carroçaria sobre o plano criado.

Por fim basta medir a área da projecção, visível na Figura 29, utilizando as ferramentas de medição do CATIA, para obter o valor da área projectada.

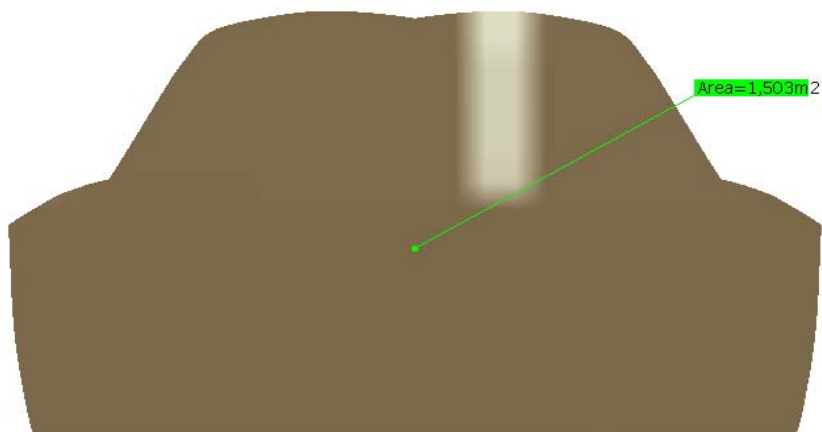


Figura 29 - Área projectada da carroçaria obtida no software CATIA V5

Os valores para área projectada (A_p) do VEECO óbitos por este método foram respectivamente:

- $A_p = 1,503 \text{ m}^2$ não contabilizando as rodas;
- $A_p = 1,572 \text{ m}^2$ contabilizando as rodas.

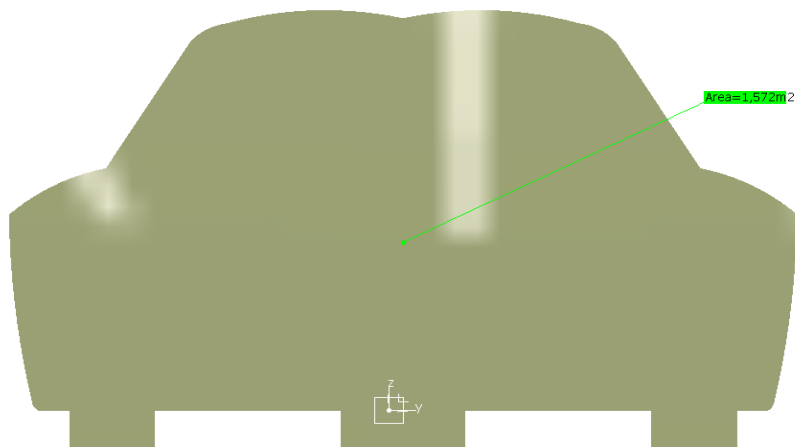


Figura 30 - Área projectada da carroçaria com rodas obtida no software CATIA V5

Para obtenção da área projectada contabilizando as rodas, Figura 30, foi criada uma superfície a partir da projecção da malha adicionando-se depois manualmente o contorno das rodas,

segundo a distância da carroçaria ao chão (medida no modelo completo da carroçaria em SketchUp) e as medidas 195/55 R15 para os pneus dianteiros e 285/30 R18 para o pneu traseiro (Fonte *et al*, 2012).

3.4.2 CORRECÇÃO DO MODELO CAD

A correcção dos dados CAD é necessária essencialmente devido a perdas nos dados que podem ocorrer durante o processo de importação (por exemplo utilizando formatos neutros como STEP, IGES, etc.) ou devido a erros introduzidos por parte do utilizador ou utilizadores durante a modelação (em grandes projectos as tarefas são normalmente distribuídas por várias equipas de trabalho diferentes, podendo até ser subcontratadas partes completas de projectos, o que aumenta o risco de ocorrência de pequenos erros).

Existem três motivos principais que tornam necessária a correcção dos dados CAD, antes de estarem conformes para a utilização CAE (Meywer, 2007):

- Geometrias duplicadas ou parcialmente duplicadas (superfícies que se sobrepõem);
- Geometrias em falta, buracos ou falhas de conexão entre geometrias (espaçamentos fora de tolerância);
- Geometrias com detalhe excessivo (por exemplo raios demasiado pequenos).

Apesar do processo de construção ter sido realizado tentando garantir a maior qualidade e rigor construtivo possível, em trabalhos demorados e complexos de modelação, erros involuntários são facilmente introduzidos nos modelos. Por exemplo geometrias duplicadas ou sobrepostas que são criadas ao longo do processo de modelação e depois esquecidas.

Os erros introduzidos no modelo CAD da carroçaria durante o processo de modelação podem ser corrigidos utilizando o módulo Healing Assistant do CATIA V5. Este módulo permite analisar as superfícies de uma geometria, detectar as suas falhas dentro de parâmetros estabelecidos pelo utilizador, isolar as respectivas falhas e posteriormente tratá-las de forma isolada. A possibilidade de isolar falhas uma a uma representa uma grande vantagem para o utilizador, sem a qual, para geometrias complexas (com centenas ou milhares de superfícies e com um número equivalente de erros), o processo de correcção do modelo (que em si já é um processo relativamente complexo e demorado) seria extremamente confuso e difícil, ou

mesmo impossível. Outra grande vantagem é a possibilidade que o utilizador tem de definir os parâmetros de análise. Assim é possível analisar e corrigir apenas as falhas que se encontram acima do nível de tolerância exigido para o respectivo projecto.

A realização de estudos CFD no software CosmosFloworks não permite a utilização de modelos geométricos compostos por superfícies, o que significa que o modelo CAD da carroçaria terá que ser convertido num sólido. Para ser possível tal conversão o modelo terá que ser estanque e sem sobreposições ou intersecções de superfícies, tendo primeiro que ser corrigido o modelo CAD.

Para a realização do processo de correcção do modelo CAD, a carroçaria foi analisada quanto às conexões entre as suas superfícies, superfícies com fronteiras inválidas, superfícies com buracos nas suas fronteiras, faces duplicadas, sobreposições e orientação das superfícies. Desta análise resultou que o modelo contém buracos (1), sobreposições (2), fronteiras inválidas (3) e superfícies com orientações incorrectas (4), visíveis na Figura 31.

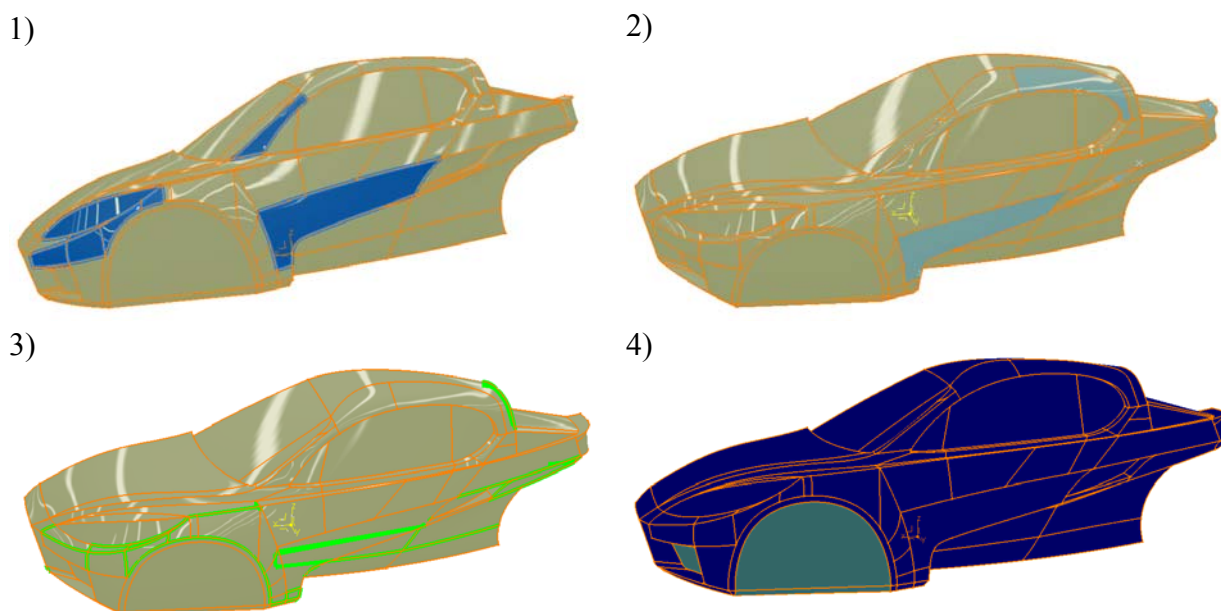


Figura 31 - Erros contidos na carroçaria modelada (análise realizada no módulo Healing Assistent do CATIA V5)

As ferramentas de análise permitem seleccionar as falhas, individualmente ou em grupos definidos pelo utilizador, e transferi-las para grupos geométricos isolados onde serão posteriormente tratadas. A ferramenta que permite a análise da orientação das superfícies possibilita também a inversão da orientação das superfícies, possibilitando logo a sua correcção.

O Healing Assistent disponibiliza várias ferramentas para a correcção de falhas, desde ferramentas de modelação tradicionais que permitem criar e manipular superfícies, a ferramentas específicas a este modulo como:

- “*Local Join*” que permite fechar espaços vazios numa superfície ou entre superfícies manipulando localmente a tolerância das arestas;
- “*Local Healing*” que permite unir faces quando a sua distância não se encontra dentro da tolerância definida, modificando geometricamente (segundo parâmetros definidos pelo utilizador) as superfícies para fechar os espaços vazios nas arestas partilhadas.

Usufruindo destas ferramentas, a correcção do modelo foi realizada manipulando localmente as superfícies existentes e em certos casos, onde a correcção local não foi possível definiram-se novas superfícies. É necessário ter em conta que a correcção de uma falha poderá corrigir simultaneamente outras falhas relacionadas com a mesma superfície. É portanto aconselhável, para evitar redundâncias, uma análise detalhada das falhas existentes no modelo e definir uma estratégia para o processo de correcção. Para obter um modelo final válido com uma tolerância de 0,001 mm, foi definida a seguinte estratégia para o processo de correcção realizado no âmbito deste trabalho:

1. Realizar as análises aplicando uma tolerância de 0,01 mm para minimizar o número de falhas detectadas;
2. Verificar se vários tipos de falha incidem sobre a mesma superfície, apenas isolar e tratar um tipo de falhas para cada superfície;
3. Voltar a analisar o modelo aplicando a mesma tolerância;
4. Repetir os passos 2 e 3 até não existirem mais falhas;
5. Realizar as análises aplicando a tolerância de 0,001 mm;

6. Repetir os passos 2 e 3 até não existirem mais falhas;

O modelo CAD da carroçaria corrigido e sem falhas é facilmente convertido para sólido aplicando o comando “Close Surface” do módulo de GSD do CATIA (ver Figura 32).

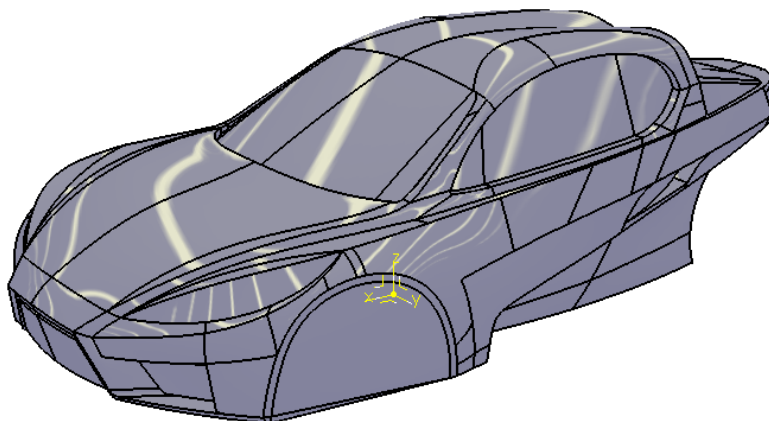


Figura 32 - Modelo sólido da carroçaria obtido após a correcção do modelo em CATIA V5

3.5. CONCLUSÃO PRELIMINAR DO CAPÍTULO 3

O trabalho de construção CAD é muitas vezes desvalorizado, maioritariamente devido à falta de conhecimento sobre a temática por parte de quem não constrói, desconhecendo as implicações que um mau modelo poderá ter num processo de desenvolvimento industrial.

Os programas de CAD da actualidade são bastante intuitivos e um utilizador iniciante na matéria rapidamente consegue obter resultados de uma elevada qualidade aparente. Existe no entanto uma grande diferença entre modelar algo e construir um modelo. Um modelo acabado não significa obrigatoriamente que este seja um bom modelo, apresentando valor acrescentado para o processo de desenvolvimento do produto. Se o construtor não traz consigo a experiência de modelação necessária, o modelo desenvolvido terá certamente uma série de deficiências. Estas, na posterior utilização do modelo, causam perdas desnecessárias de tempo ou poderão inclusivamente levar ao abandono do modelo e à necessidade construção de um novo modelo.

O processo de construção CAD requer uma fase de planeamento exaustiva, que reflectirá a experiência do construtor no modelo final. Nesta fase o construtor define a estratégia de

modelação atendendo aos requisitos individuais do produto, bem como os requisitos gerais de qualquer processo de desenvolvimento industrial. Neste sentido, além de cumprir os requisitos individuais do produto, um modelo CAD deve incluir uma série de considerações das quais as mais importantes serão:

- Estar estruturado de forma organizada e intuitiva para que outro utilizador possa trabalhar rapidamente com e sobre o modelo;
- Ser flexível de modo a possibilitar alterações rápidas. Modelos CAD complexos construídos de forma descuidada tendem a ser muito difíceis e demorados de alterar (até pelo próprio construtor), podendo inclusivamente ocorrer colapsos do modelo devido à definição desorganizada e descontrolada de interdependências.

O construtor inexperiente tende a saltar a fase de planeamento, iniciando directamente o processo de modelação, tentando resolver problemas imprevistos à medida que estes surgem. Para o construtor experiente, a fase de planeamento é uma fase integrante do processo de modelação, dedicando este uma grande parte dos seus recursos de tempo a esta fase. O resultado é um processo de modelação mais estruturado e controlado, com a ocorrência de menos imprevistos. Quanto maior a experiência do construtor mais serão as considerações introduzidas na fase de planeamento, que por sua vez se reflectirá na qualidade final do modelo.

Grandes empresas têm muitas vezes estabelecidas diversas normas internas para o processo construtivo, com o objectivo de uniformizar o trabalho realizado pelos seus construtores CAD, como por exemplo: estruturas pré-definidas em forma de árvore que devem ser utilizadas e preenchidas de forma estandardizada ao longo do processo construtivo; normas quanto à forma como as construções devem ser posicionadas quanto ao seu sistema de coordenadas absoluto ou se deverão ser utilizados sistemas de coordenadas relativos etc. Estas normas internas provêm da experiência acumulada das empresas e têm o objectivo de tornar todo o processo de desenvolvimento mais competitivo e intuitivo.

Mesmo já tendo uma vasta experiência em modelação (em sólidos e superfícies) e uma formação específica em metodologia de superfícies livres no programa CATIA V5, foi necessário acumular ainda mais experiência (sob a forma de três tentativas de reconstrução

fracassadas devido a más estratégias de modelação) antes de obter o modelo CAD da carroçaria descrito anteriormente.

Capítulo 4_E

STUDO AERODINÂMICO DA CARROÇARIA DO VEECO

4.1. INTRODUÇÃO AO CAPÍTULO 4

O método dos elementos finitos é uma ferramenta, com uma vasta gama de aplicações e de extrema eficiência no auxílio ao projecto, utilizada sobretudo para a solução de problemas complexos para os quais não se consegue obter soluções de forma analítica. Neste capítulo será descrito o método de elementos finitos, utilizado para o estudo da aerodinâmica exterior do veículo VEECO e realizada a análise dos resultados obtidos aplicando este método.

É de extrema importância lembrar que os métodos numéricos, como o método dos elementos finitos, são métodos aproximados e as soluções obtidas por estes métodos são sempre soluções aproximadas, podendo estas estarem mais ou menos próximas da realidade. Os resultados obtidos por análise numérica são fortemente influenciados pelo domínio do utilizador, ou utilizadores, das diversas etapas que compõem todo o processo de preparação e resolução numérica e a qualidade e o rigor com que estas são definidas.

Figura 33 - Representação esquemática da metodologia de análise típica para problemas de simulação numérica (Dias et al, 2010).

A Figura 33 mostra a metodologia de análise típica para problemas de simulação numérica, esta é composta por três fases: o pré-processamento, a análise e o pós-processamento (Dias *et al*, 2010). A fase de pré-processamento refere-se à construção do modelo geométrico a estudar e à definição das condições a que este será submetido. A qualidade global da análise depende, fortemente, das definições impostas nesta fase, como por exemplo o tamanho ou refinamento da malha utilizada, simplificações adoptadas, condições de fronteira, etc.

Durante a fase de Análise é realizada a análise numérica propriamente dita e são criados ficheiros de saída que contêm os resultados e toda a informação da análise.

No pós-processamento a informação contida nos ficheiros de saída é tratada para possibilitar a sua apresentação de forma mais legível e amigável, através da sua apresentação gráfica ou tabular.

4.2. ANÁLISE NUMÉRICA EM COSMOSFLOWWORKS – FLOW SIMULATION

O Flow Simulation encontra-se incorporado no SolidWorks sendo um programa exclusivamente dedicado à mecânica de fluidos, caracterizado pela sua simplicidade. Este programa é essencialmente utilizado como uma ferramenta de apoio ao projecto facultando aos engenheiros, sem ter que recorrer a especialistas, métodos numéricos para analisar as soluções existentes e explorar novas soluções construtivas durante a fase de desenvolvimento. Ao contrário de outros programas de CFD, as simplificações deste programa baseiam-se na variedade de opções que o utilizador tem disponíveis para a resolução do problema, por exemplo disponibiliza apenas um tipo de malha, um modelo numérico para cálculo, etc. No entanto as soluções propostas pelo programa, para a resolução de problemas da área da mecânica dos fluidos, estão de tal forma optimizadas que permitem a obtenção de bons resultados mesmo para temáticas complexas de simulação de fluidos computacional (SolidWorks Flow Simulation, 2010). Outra grande vantagem que surge da estratégia empregada no CosmosFlowworks, é que este torna possível a resolução de problemas utilizando apenas computadores pessoais, quando não se tem disponíveis grandes recursos computacionais.

4.2.1 ANÁLISES PRELIMINARES

De acordo com (Dias *et al*, 2010), na presença de problemas de elevada complexidade é comum, quando se recorre ao método dos elementos finitos, começar por analisar uma versão simplificada do problema, avançando gradualmente para soluções mais complexas e realistas.

Como a análise CFD de automóveis implica uma elevada complexidade, com elevados tempos de processamento, os estudos iniciais assumem diversas simplificações. Assim, os estudos realizados permitem algumas estimativas iniciais com tempos de processamento aceitáveis. Introduzindo-se cada vez mais detalhe e complexidade ao modelo e estudo em si, com o desenvolvimento do projecto.

A realização de estudos preliminares permite obter informações importantes sobre o tamanho da malha, nível de refinamento da mesma, tempos de convergência dos resultados, etc. Estas informações permitem afinar os parâmetros de estudo relativamente ao estudo em causa e aos recursos disponíveis, evitando tempos de processamento excessivos ou até mesmo impraticáveis.

É importante definir para a análise apenas os resultados que realmente interessam, para evitar o consumo de recursos e tempos de cálculo desnecessários.

No âmbito do estudo aerodinâmico da carroçaria do VEECO foram realizados uma série de estudos preliminares. Os primeiros estudos foram realizados utilizando o modelo da carroçaria obtido por reconstrução automática, definições de malha propostas pelo programa Flow Simulation e um domínio computacional recomendado segundo a Figura 34 (ANSYS, 2009). Após a análise dos resultados obtidos, foram feitos ajustes ao domínio computacional e realizados novos estudos. Este processo foi realizado de forma repetitiva ajustando numa fase inicial os parâmetros domínio computacional e numa fase mais avançada também os parâmetros da malha computacional, até se obter uma estabilização de resultados.

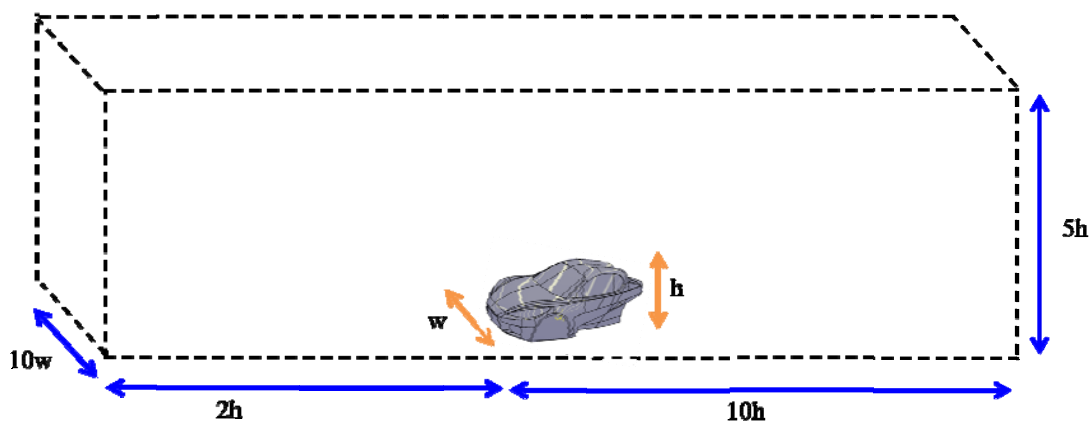


Figura 34 - Domínio computacional utilizado para iniciar os estudos computacionais preliminares
(w - Largura; h - altura)

Através da realização dos estudos preliminares foi possível, ainda durante a fase de modelação da carroçaria, obter muita informação importante para as futuras análises da mesma.

4.2.2 PRÉ-PROCESSAMENTO

Um dos primeiros passos a realizar durante a fase de pré-processamento será certamente a análise e correcção do modelo a simular. O processo de análise e correcção aplicado foi realizado no módulo Healing Assistant do CATIA V5 (inteiramente dedicado à análise e correcção de modelos CAD em geral) e encontra-se descrito no capítulo 3, que cobre todo o processo de desenvolvimento da carroçaria do VEECO auxiliado pelo programa CATIA V5.

Após a obtenção de um modelo válido para a análise numérica, o próximo passo será a definição dos parâmetros necessários para a análise em si. Para problemas de escoamentos externos como é o caso do escoamento de ar em torno de um automóvel, têm que ser definidas as *condições ambiente* ou seja os parâmetros do escoamento externo, a velocidade, pressão, temperatura, o tipo de fluido e os parâmetros de turbulência (SolidWorks Flow Simulation, 2010) (ver Tabela 2).

Tabela 2 - Condições ambiente utilizadas para a análise numérica no software CosmosFloworks

Parâmetros termodinâmicos	Pressão estática: 101325 Pa Temperatura: 293,2 K
Parâmetros de Velocidade	Velocidade em X: -44,4 m/s Velocidade em Y: 0 m/s Velocidade em Z: 0 m/s
Parâmetros de turbulência	Comprimento e intensidade de turbulência Intensidade: 0,1 % Comprimento: 0,01 m

De acordo com (SolidWorks Flow Simulation, 2010), em Flow Simulation as condições de fronteira são definidas como sendo de não escorregamento por defeito, mas também é possível definir condições de *parede ideal* que corresponde a uma condição de escorregamento. Esta capacidade foi utilizada para definir o plano de simetria que divide a carroçaria do VECCO, permitindo a realização dos estudos definindo um domínio computacional que utiliza apenas metade da carroçaria (ver Tabela 3 e Figura 35).

A utilização de apenas metade do modelo para a análise (possível em modelos que podem ser divididos por um eixo de simetria) e por consequência metade do domínio computacional, proporciona grandes vantagens em termos dos recursos computacionais consumidos pela análise e do nível de refinamento e resolução da malha possíveis.

O nível de refinamento da malha pode-se definir como sendo o tamanho da malha ou seja a subdivisão do volume de estudo (domínio computacional) por um determinado número de células. Enquanto a resolução da malha refere-se a tamanho das células que discretizam o domínio computacional. Embora ambos os termos estejam relacionados, um não é obrigatoriamente consequência directa do outro. A título de exemplo se for considerado um domínio computacional, este pode:

- Ser discretizado aplicando um nível de refinamento elevado, onde o domínio é dividido em células de forma uniforme, sem que a resolução seja muito elevada;
- Ser discretizado aplicando um nível de refinamento geral menor, onde o domínio é dividido de forma irregular surgindo zonas localizadas muito refinadas, com uma elevada resolução.

Tabela 3 - Condições de fronteira utilizadas para a análise numérica no software CosmosFloworks

X	Y	Z
Secção posterior 2 vezes a altura da carroçaria	Espaçamento de 8 vezes a altura da carroçaria	Espaçamento de 15 cm entre o solo e a carroçaria
Secção anterior 22,4 vezes a altura da carroçaria	Eixo de simetria	Espaçamento de 5 vezes a altura da carroçaria

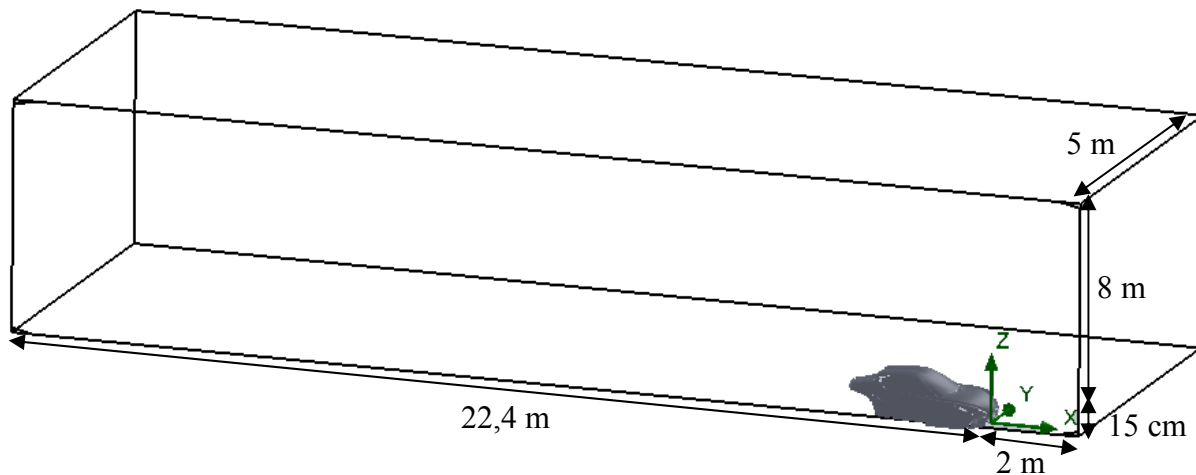


Figura 35 - Domínio computacional utilizado para as simulações em Flow Simulation

As técnicas de solução numérica empregadas neste programa são robustas e fiáveis não requerendo, em muitos casos, conhecimento específico de malhas computacionais e métodos numéricos. No entanto para problemas complexos, como é o caso, a técnica de solução numérica standard do Flow Simulation pode consumir imensos recursos computacionais, geralmente não disponíveis em projectos desta natureza. Facto que torna necessário recorrer ao ajustamento manual dos parâmetros que governam a solução numérica.

O Flow Simulation recorre ao método dos volumes finitos (FVM), utilizando uma malha computacional rectangular de planos ortogonais aos eixos de coordenadas num sistema de coordenadas cartesianas. A malha permanece sempre rectangular em todo o domínio computacional não se ajustando à interface sólido – fluido, significando que esta corta as células da malha. No entanto, pela introdução de medidas especiais de cálculo, os fluxos de massa são devidamente calculados. As células interceptadas pela interface sólido – fluido são designadas por células parciais (ver Figura 36).

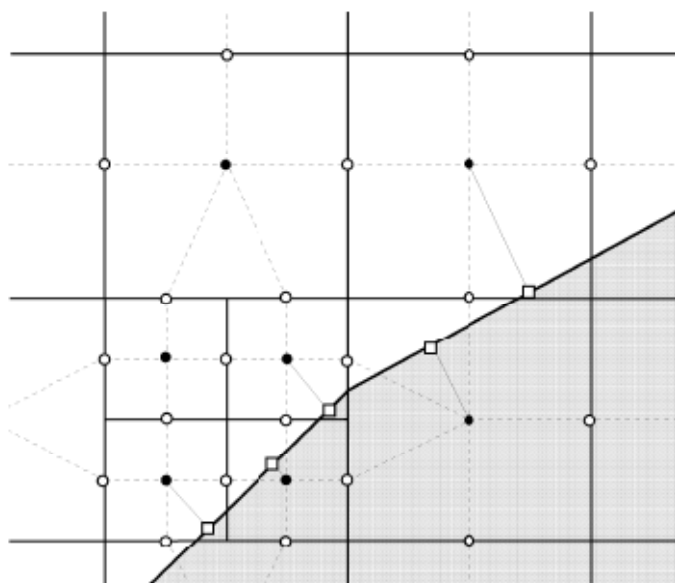


Figura 36 - Células da malha computacional nas zonas de interface sólido – fluido (SolidWorks Flow Simulation, 2010)

De acordo com (SolidWorks Flow Simulation, 2010), a discretização do domínio computacional pode ser realizada automaticamente ou manualmente e é realizada em várias fases.

Em primeiro lugar define-se uma malha inicial grosseira a “*basic mesh*”, dividindo o domínio computacional em secções através da definição de planos e posteriormente definindo um número de células para cada secção. No caso da definição manual é possível definir a quantidade de planos e o espaçamento entre eles, bem como o número de células pretendido para cada secção e o seu rácio de distribuição, ou seja se estas se encontram uniformemente distribuídas ao longo da secção (neste caso terão todas as mesmas dimensões) ou se apresentam maior densidade junto de um dos planos (neste caso teremos mais células e de menores dimensões junto de um plano e respectivamente menos células e de maiores dimensões junto do plano oposto).

A malha inicial é definida unicamente sobre o domínio computacional não tendo em consideração a interface sólido – fluido.

Numa segunda fase é discretizada a interface sólido – fluido dividindo uniformemente as células que intersectam a interface. Cada célula é dividida uniformemente em 8 células menores, sendo cada célula resultante que continua a interceptar a interface sólido – fluido novamente dividida em 8 células de menores dimensões. Este processo é repetido até que o tamanho de célula especificado seja atingido. No caso da definição manual da malha, o utilizador pode seleccionar o nível de refinamento desejado para as células parciais, definindo assim o tamanho final das células.

Na fase seguinte, a malha é refinada segundo critérios de curvatura da interface sólido – fluido. As células são divididas (em 8 células menores) quando se encontram acima de um certo valor, ou unidas caso contrário, de forma a satisfazer o critério de curvatura. O critério de curvatura é um valor em radianos que define o valor mínimo de curvatura abaixo do qual não são realizados mais refinamentos. Sendo este definido pelo utilizador no caso da discretização manual.

Por fim, a malha obtida é novamente refinada no domínio computacional para satisfazer o critério de “*narrow channel*” - o número de células da malha na região de fluido, ao longo de uma linha normal à interface sólido - fluido, que começa no centro de cada célula sobre a interface sólido – fluido, não deverá ser menor que um certo valor definido (no caso da discretização manual este valor será definido pelo utilizador no intervalo de 1 a 7), caso contrário cada célula da malha sobre esta linha será dividida uniformemente e 8 células menores.

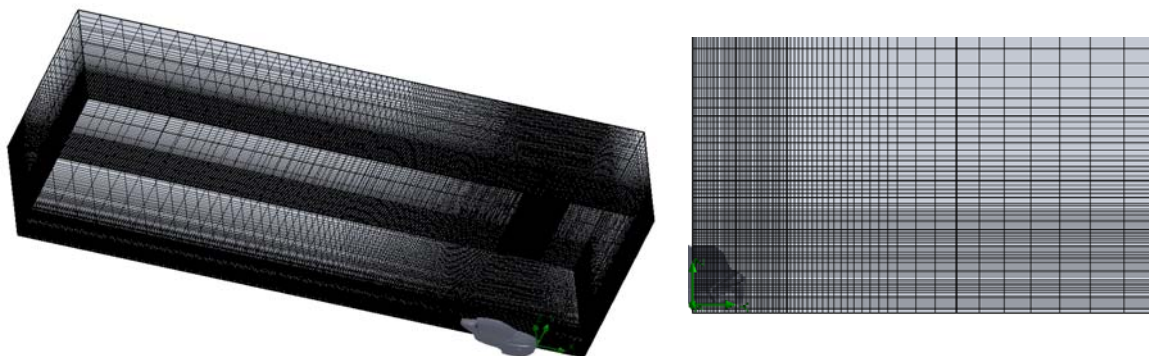
Uma vez que o processo de discretização anteriormente descrito é realizado antes da análise em si, existe alguma possibilidade da malha obtida não conseguir resolver apropriadamente todas as situações características do problema. Para contornar esta desvantagem o programa possibilita a realização de refinamentos durante a análise, possibilitando dividir e unir células de acordo com as características da análise em causa, segundo critérios e intervalos definidos. Podendo os intervalos ser definidos automaticamente ou pelo utilizador.

O número de células utilizado para a realização de simulações computacionais é fortemente dependente dos recursos disponíveis. Com base nas informações recolhidas durante as análises preliminares determinou-se que mediante os recursos informáticos disponíveis (um

computador pessoal com oito núcleos de processamento com frequência de 1,6 GHz e quatro GB de RAM) o tamanho máximo da malha, viável para a realização das análises, ronda os dois milhões de células aproximadamente (dependendo do nível de resolução das respectivas malhas).

É vulgarmente assumido que quanto mais refinada for uma malha e maior a sua resolução melhor será a qualidade dos resultados obtidos. Mas testes realizados durante a fase de análises preliminares revelaram que para malhas excessivamente refinadas e/ou com resoluções muito elevadas, além da problemática da falta de recursos computacionais, podem surgir problemas quanto à resolução numérica em si. Análises realizadas utilizando estas malhas revelaram problemas como a não convergência de dados e a ocorrência de erros numéricos durante o cálculo.

Para a análise numérica da carroçaria do VEECO foram utilizadas três malhas diferentes, uma gerada automaticamente e duas definidas manualmente (malha 1 e malha 2), que resultaram de um processo de otimização contínua na fase de análises preliminares, contabilizando os factores anteriormente descritos. As malhas manuais diferem uma da outra quanto aos seus critérios de refinamento da malha inicial, de curvatura e da malha parcial, resultando em refinamentos e resoluções da malha final diferentes. As diferentes definições construtivas de cada malha encontram-se descritas em maior pormenor nos anexos C, D e E.



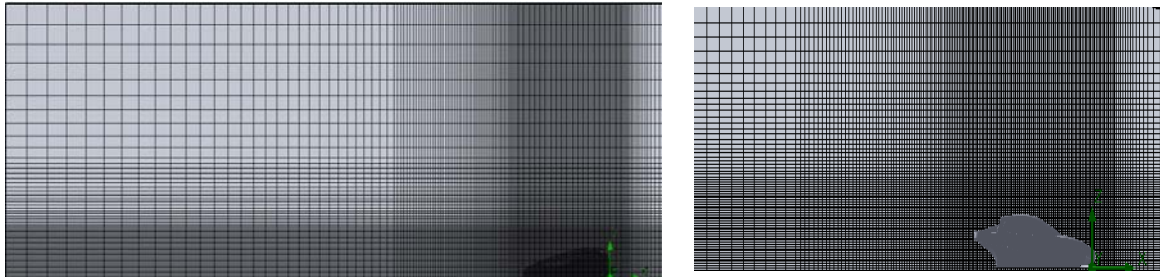


Figura 37 - Malha inicial da malha 1 definida manualmente em Flow Simulation

O método construtivo das malhas iniciais, definidas manualmente, foi realizado de forma idêntica e são por essa razão muito similares em aparência, independentemente da malha 1 ser inicialmente mais refinada (visível na Figura 37) que a malha 2.

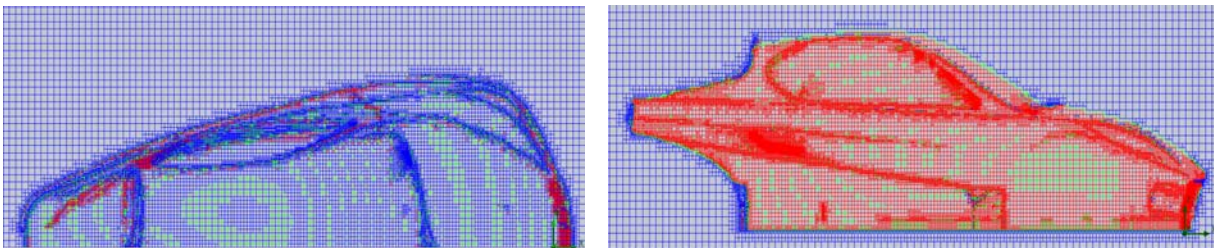


Figura 38 - Vista de topo e lateral da malha 1 obtida em Flow Simulation

As diferenças de refinamento e resolução entre as duas malhas após a definição dos restantes critérios de discretização, são visíveis na Figura 38 para a malha 1 e na Figura 39 para a malha 2, com as células de fluido coloridas de azul, as células parciais de verde e as células de sólido de vermelho.

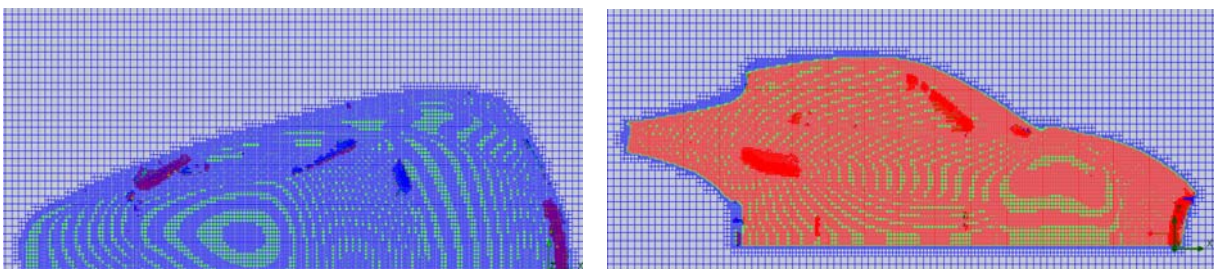


Figura 39 - Vista de topo e lateral da malha 2 obtida em Flow Simulation

Apesar das malhas de todos o modelos terem o mesmo método de discretização, o número de células dos vários modelos varia, uma vez que os critérios definidos para a discretização são fortemente dependentes da geometria do modelo sólido. Esta dependência significa que qualquer alteração geométrica no modelo afecta fortemente a discretização do domínio computacional. Os dados da discretização do domínio computacional dos diferentes modelos, bem como imagens adicionais das respectivas malhas obtidas encontram-se no anexo C.

Todas a análises foram realizadas utilizando as malhas, uma vez sem refinamentos progressivos e uma vez com refinamentos progressivos ao longo da simulação. A utilização de diferentes métodos de discretização para as análises, tem o objectivo de obter um maior espectro de resultados, com o objectivo de potenciar probabilidade de obter dados que descrevam adequadamente o comportamento aerodinâmico da carroçaria.

4.2.3 PÓS-PROCESSAMENTO

O módulo de pós-processamento de resultados do Flow Simulation permite visualizar a informação obtida nos estudos aerodinâmicos, de forma a analisar os resultados adequadamente.

Após a obtenção dos dados das análises computacionais, uma forma eficiente de analisar o atrito aerodinâmico é através da utilização do coeficiente de atrito aerodinâmico, geralmente denominado C_d ou C_x (ver equação 4.1).

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_p} \quad (4.1)$$

Onde, D é a força de arrasto aerodinâmico, ρ é a massa volúmica do ar, V é velocidade do escoamento e A_p é a área projectada do modelo digital.

O coeficiente de atrito aerodinâmico depende de uma série de factores como a forma geométrica do objecto de estudo, propriedades de turbulência do escoamento, número de Reynolds etc. No entanto, para as gamas de velocidades de deslocamento típicas de veículos

automóveis, os factores dependentes da velocidade podem ser desprezados, podendo o C_d ser considerado constante para variações de velocidade (Barnard, 2009).

No estudo aerodinâmico de veículos automóveis este factor depende então essencialmente da forma geométrica do veículo, permitindo comparar o efeito do atrito aerodinâmico para diferentes formas de veículos, independentemente do seu tamanho e velocidade de deslocamento. Este facto comprova-se realizando uma análise aerodinâmica para dois veículos com a mesma área frontal e a mesma velocidade de deslocamento, da qual resultará um valor de C_d maior para o veículo com o maior atrito aerodinâmico (Barnard, 2009). Assunção que deixa de ser válida para ensaios à escala ou a velocidades de ordens de grandeza muito superiores ao que é habitual para automóveis.

De forma análoga o coeficiente de sustentação aerodinâmica (geralmente denominado C_l ou C_z) é uma forma eficiente de analisar os efeitos da força de sustentação (ver equação 4.2).

$$C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_p} \quad (4.2)$$

Onde, F_l é a força de sustentação aerodinâmica.

A tabela 4 apresenta os dados utilizados para o cálculo dos coeficientes de atrito aerodinâmico e de sustentação.

Tabela 4 - Dados para os cálculos dos coeficientes de arrasto e sustentação

Velocidade de deslocamento		Área Projectada	Densidade do ar
160 Km/h	44,4 m/s	1,503 m ²	1,22 Kg/m ³

4.2.3.1 MODELO COM SPOILER TRASEIRO

O modelo actual da carroçaria do VEECO sofreu uma alteração de design ao longo do seu processo de desenvolvimento, com o objectivo de melhorar a sua estética desportiva foi-lhe implementado um pequeno spoiler traseiro ainda durante a fase de desenvolvimento.

Os resultados das forças de arrasto e sustentação obtidas das análises numéricas, aplicando os diferentes métodos de discretização, bem como os respectivos coeficientes de atrito e sustentação encontram-se descritos na Tabela 5. Os resultados detalhados obtidos das análises numéricas encontram-se no anexo C.

Tabela 5 - Resultados obtidos da simulação do modelo com spoiler traseiro em Flow Simulation

	Força de arrasto [N]	Cd	Força de Sustentação [N]	Cl
Malha 1	564,25	0,312	313,27	0,173
Malha 1 com refinamentos ao longo da simulação	565,37	0,313	312,74	0,173
Malha 2	556,22	0,308	399,94	0,221
Malha 2 com refinamentos ao longo da simulação	568,88	0,315	461,08	0,255
Malha automática com refinamento ao longo da simulação	573,92	0,318	412,42	0,228

As Figuras 40 e 41 mostram as linhas de escoamento sobre a carroçaria, apresentando estas diversas cores que correspondem a uma determinada gama de pressões cujo valor pode ser lido na legenda de cores.

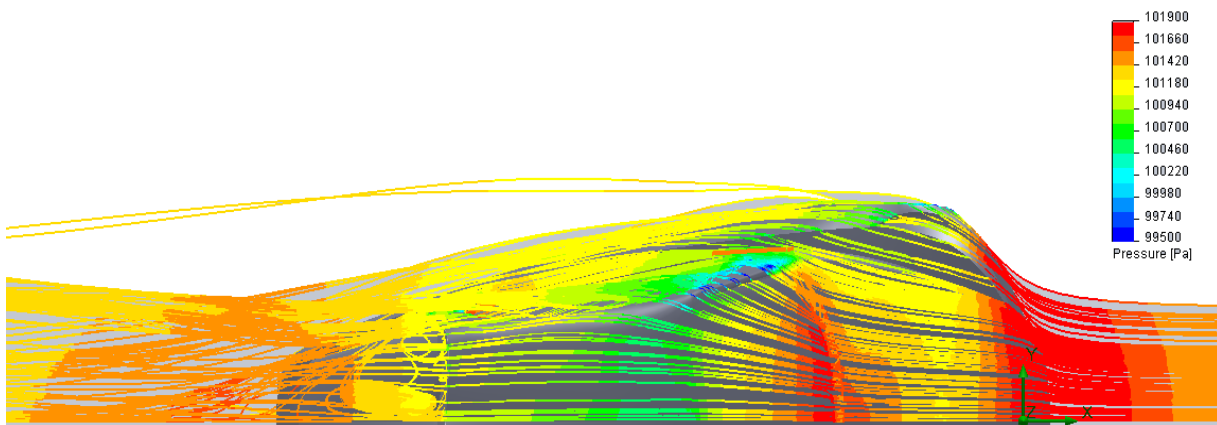


Figura 40 - Vista superior das linhas de escoamento sobre a carroçaria obtidas utilizando as ferramentas de pós-processamento do Flow Simulation

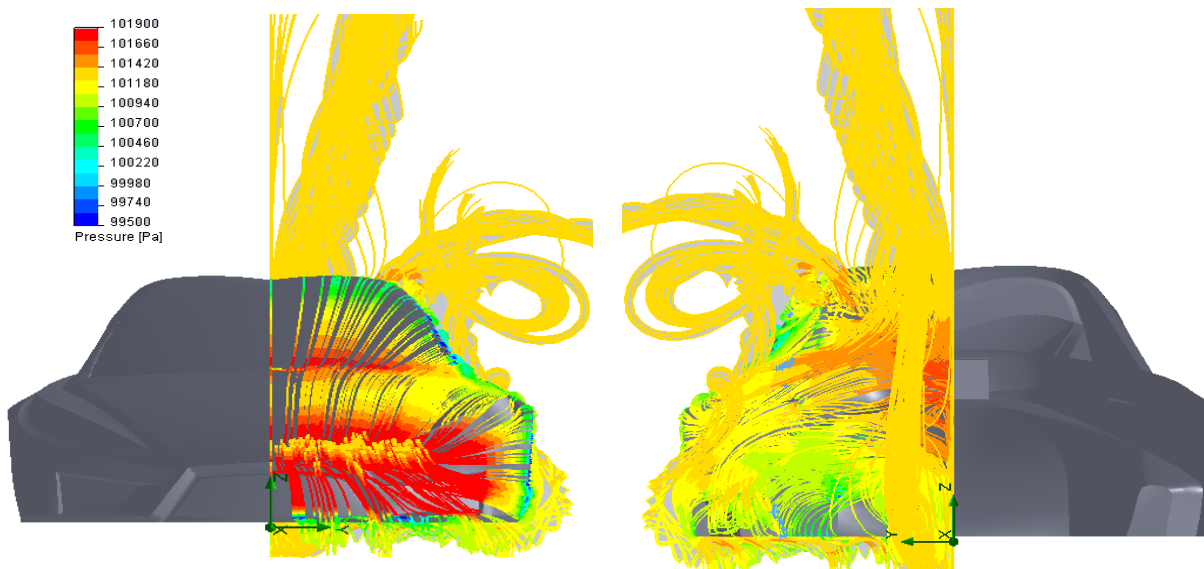


Figura 41 - Vista frontal e traseira das linhas de escoamento sobre a carroçaria obtidas utilizando as ferramentas de pós-processamento do Flow Simulation

A apresentação gráfica dos resultados de pós-processamento é uma ferramenta muito útil na análise e comparação de resultados. Devido à sua utilidade como ferramenta de análise as restantes imagens, resultantes do pós-processamento gráfico, relativas às análises numéricas dos diversos modelos, encontram-se no subcapítulo da análise de resultados (ponto 4.3).

4.2.3.2 MODELO SEM SPOILER TRASEIRO

Além do modelo actual da carroçaria foram realizados estudos o modelo de design da carroçaria sem spoiler traseiro, uma vez que este serviu de base para a obtenção do modelo à escala (para a realização dos ensaios experimentais) e com objectivo de estudar quais as implicações aerodinâmicas desta alteração de design.

Os resultados das forças de arrasto e sustentação obtidas das análises numéricas, aplicando os diferentes métodos de discretização, bem como os respectivos coeficientes de atrito e sustentação encontram-se descritos na Tabela 6. Os resultados detalhados obtidos das análises numéricas encontram-se em anexo D.

Tabela 6 - Resultados obtidos do modelo sem spoiler traseiro em Flow Simulation

	Força de arrasto [N]	Cd	Força de Sustentação [N]	Cl
Malha 1	614,87	0,340	567,93	0,314
Malha 1 com refinamentos ao longo da simulação	614,73	0,340	570,83	0,316
Malha 2	620,89	0,344	574,04	0,318
Malha 2 com refinamentos ao longo da simulação	620,90	0,344	572,00	0,316
Malha automática	589,50	0,326	556,72	0,308
Malha automática com refinamento ao longo da simulação	572,74	0,329	560,33	0,310

4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

A análise seguidamente descrita foca essencialmente a parte superior da carroçaria, a análise aerodinâmica detalhada da parte inferior do VEECO não envolve apenas a sua carroçaria e será por isso objecto de estudo em trabalhos futuros.

O escoamento em torno de um veículo é altamente tridimensional, resultando de uma complexa interacção entre os vários elementos que constituem a carroçaria. Um dos pontos

mais importantes na análise aerodinâmica de um automóvel consiste na análise da distribuição de pressão ou da variação de velocidade associada.



Figura 42 - Distribuição da pressão do modelo com spoiler resultante da simulação em Flow Simulation.

Pelo princípio de Bernoulli, nas zonas onde temos uma diminuição de velocidade do escoamento obtemos aumento de pressão. Nestas zonas de alta pressão temos um gradiente de pressão desfavorável, visto que a transição de escoamento laminar para escoamento turbulento (ou até mesmo a descolagem do escoamento) é mais propícia de ocorrer nestas zonas.

Pelo mesmo princípio, onde temos um aumento de velocidade do escoamento, obtemos por consequência um decréscimo da pressão. Nestas zonas de baixa pressão consideramos que temos um gradiente de pressão favorável, uma vez que é menos propício ocorrer a descolagem do escoamento e as taxas de crescimento da camada limite são menores. Menores taxas de crescimento da camada limite atrasam a transição do escoamento de laminar para turbulento, resultando num escoamento laminar durante mais tempo ao longo da superfície, o que leva menos atrito de fricção e de forma (Barnard, 2009)

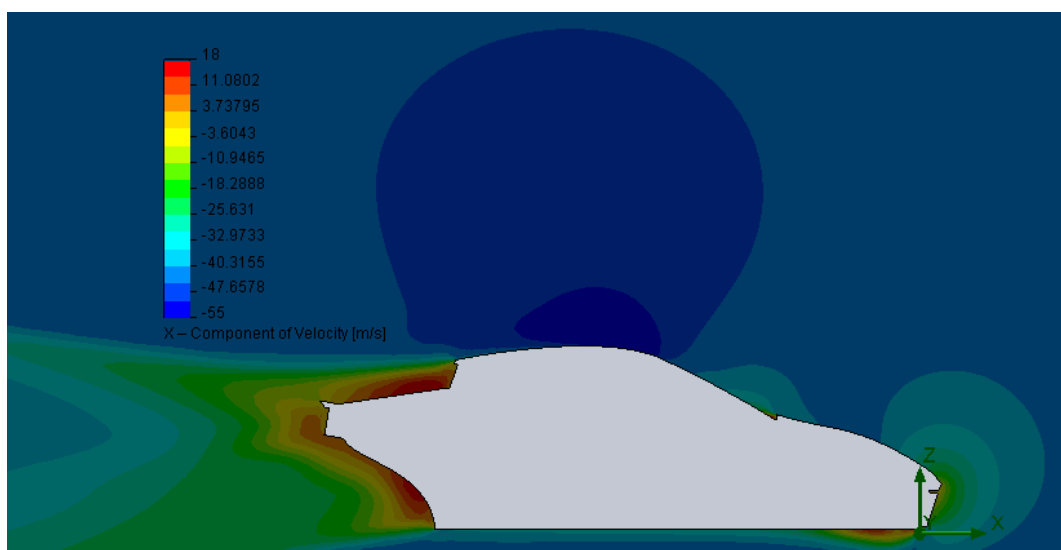


Figura 43 - Variação da velocidade do modelo com spoiler resultante da simulação em Flow Simulation.

As zonas afectadas por gradientes de pressão favoráveis e desfavoráveis são bem visíveis na Figura 42 e Figura 43. Destacando-se os gradientes de pressão desfavoráveis na zona frontal e a zona traseira da carroçaria e os favoráveis na sua zona central.

O gradiente de pressões desfavorável na zona frontal provém do efeito de blocagem que ocorre nesta zona. A redução da área frontal também reduzirá o efeito de blocagem, no entanto alterações desta natureza têm implicações no design e na praticabilidade da carroçaria.

O gradiente de pressão favorável na zona central da carroçaria resulta do aumento de velocidade do escoamento que ocorre sobre as zonas do capô, pára-brisas e tejadilho. Este aumento de velocidade do escoamento não é gradual, ocorrendo inclusivamente uma redução local de velocidade na junção entre o pára-brisas e o capô, que resulta na descolagem do escoamento nesta zona. À recirculação que ocorre entre os pontos de descolagem e colagem do escoamento chama-se bolha de separação. Os vórtices estacionários que resultam da separação do escoamento são bem visíveis na Figura 44.

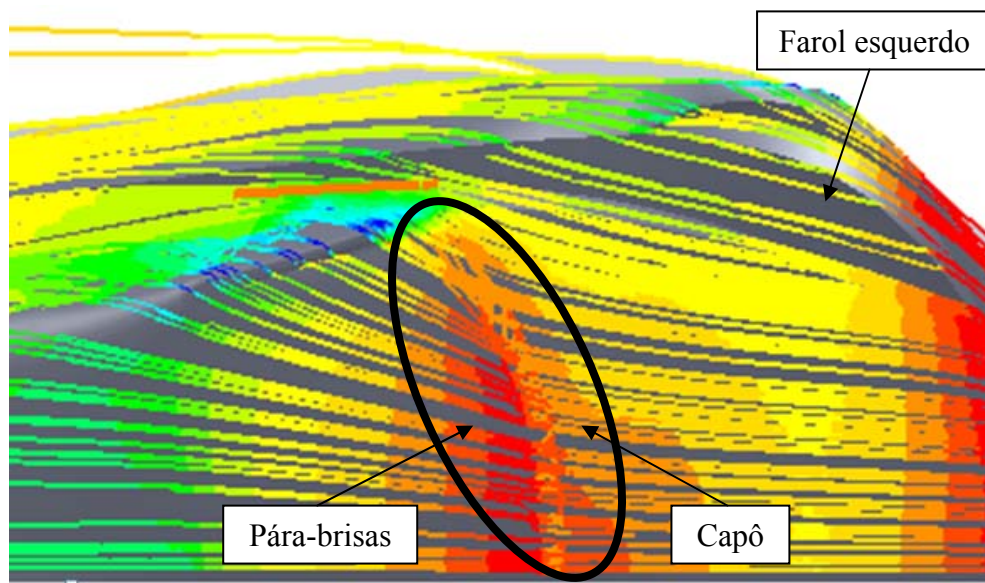


Figura 44 - Vórtices estacionários que ocorrem na junção entre o para brisas e o capô (obtido em Flow Simulation)

Optimizando a zona frontal do veículo, pelo aumento do ângulo entre o pára-brisas e o capô, é possível obter um decréscimo de pressão constante até à zona do pára-brisas. Assim é possível reduzir os efeitos de separação que ocorrem nesta zona, bem como obter uma baixa taxa de crescimento da camada limite, favorecendo a obtenção de uma camada laminar de baixo atrito.

O gradiente de pressão desfavorável na zona traseira da carroçaria resulta da redução de velocidade que ocorre nesta zona. Quanto mais gradual for a diminuição da área transversal na zona traseira de um veículo, mais gradual será o aumento de pressão nesta zona permitindo um equilíbrio energético, entre escoamento livre para a camada limite, o suficientemente rápido para reduzir ou até impedir a separação do escoamento.

A carroçaria do VEECO é caracterizada por uma variação brusca da sua área transversal, na zona do vidro traseiro, que leva a uma redução brusca na velocidade do escoamento e consequentemente à separação do escoamento nesta zona (visível na Figura 40). Esta é uma característica bastante penalizadora em termos aerodinâmicos da carroçaria do VEECO e possivelmente um dos principais factores devido ao qual o seu valor de C_d não é inferior,

apesar do seu design aerodinâmico. No entanto é necessário referir que um $C_d = 0,31$ é um valor bastante aceitável para um veículo deste tipo.



Figura 45 - Smart Roadster e Smart Coupé

A título de exemplo seguirá uma breve análise dos veículos automóveis Smart Roadster e Smart Coupé que são idênticos com a exceção da sua zona traseira. Analisando a Figura 45, ao contrário do Smart Coupé o Smart Roadster tem uma variação geométrica brusca na zona do vidro traseiro (muito semelhante ao VEECO), o que resulta num C_d de 0,41 para o Roadster e de 0,38 para o Coupé.

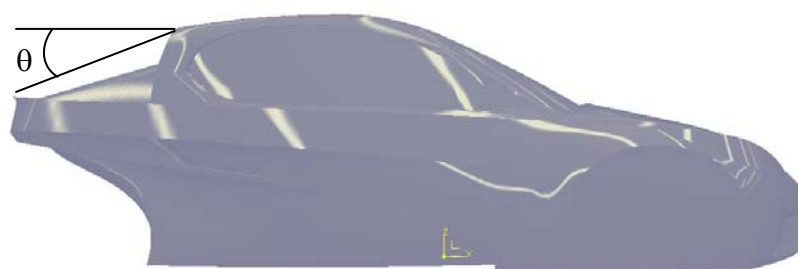


Figura 46 - Ângulo de inclinação da traseira do veículo

Neste sentido o desenvolvimento de um design do VEECO que permita uma diminuição gradual da área transversal na zona traseira, e assim um ângulo de inclinação da traseira do

veículo (θ) otimizado, teria grandes vantagens a nível de aerodinâmica exterior (ver Figura 46). De acordo com (Barnard, 2009) os melhores resultados são conseguidos para valores de θ compreendidos entre 10° e 20° .

Na análise comparativa dos modelos com e sem spoiler traseiro é preciso ter em conta que os modelos não são inteiramente idênticos, visto que o modelo com spoiler foi obtido pelo processo de reconstrução manual da carroçaria e o sem spoiler foi obtido pelo processo de reconstrução automática. As divergências entre os modelos afectam a discretização dos domínios computacionais além da existência ou não de um spoiler e consequentemente também a análise numérica. O objectivo desta análise é neste sentido mais qualitativo que propriamente quantitativo.

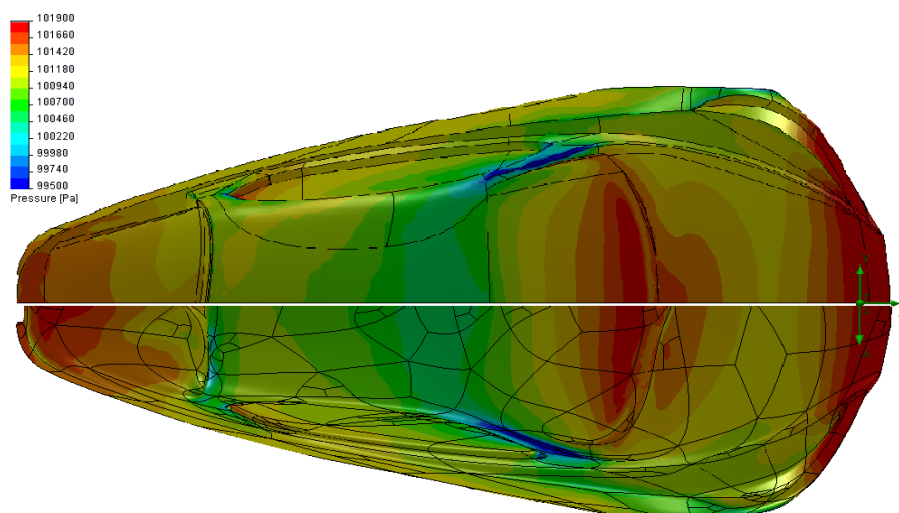


Figura 47 - Distribuição de pressão sobre a superfície da carroçaria com spoiler traseiro (vista superior) e sem spoiler traseiro (vista inferior), obtida utilizando as ferramentas de pós processamento do Flow Simulation

Analisando as distribuições de pressão de ambos os modelos (representadas na Figura 47) verifica-se que esta, de modo geral, se processa de forma similar para ambos os modelos (considerando que existem ligeiras diferenças entre os modelos) com a excepção das suas zonas traseiras. Nesta zona é bem visível que a transição do gradiente de pressão favorável para o desfavorável é muito mais gradual no modelo da carroçaria com spoiler.

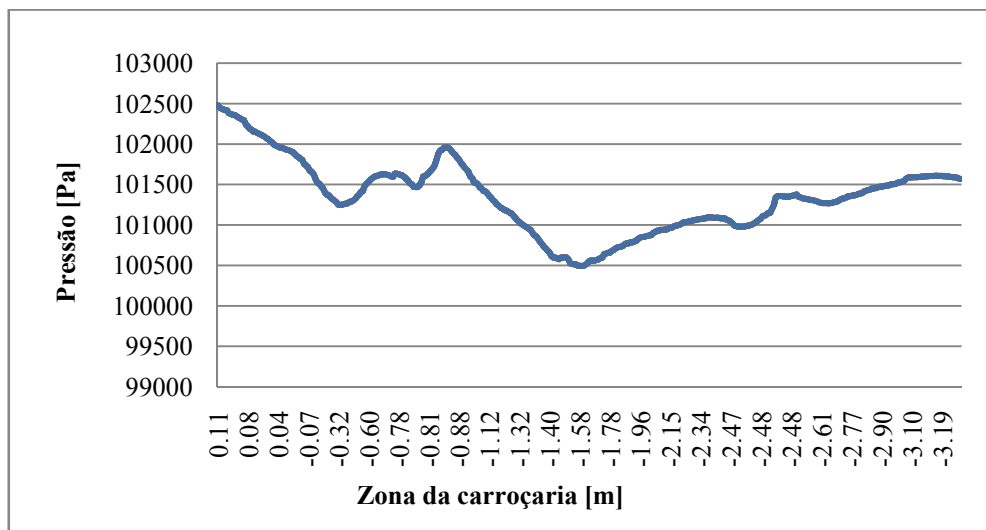


Figura 48 - Variação de pressão superficial ao longo da carroçaria com spoiler

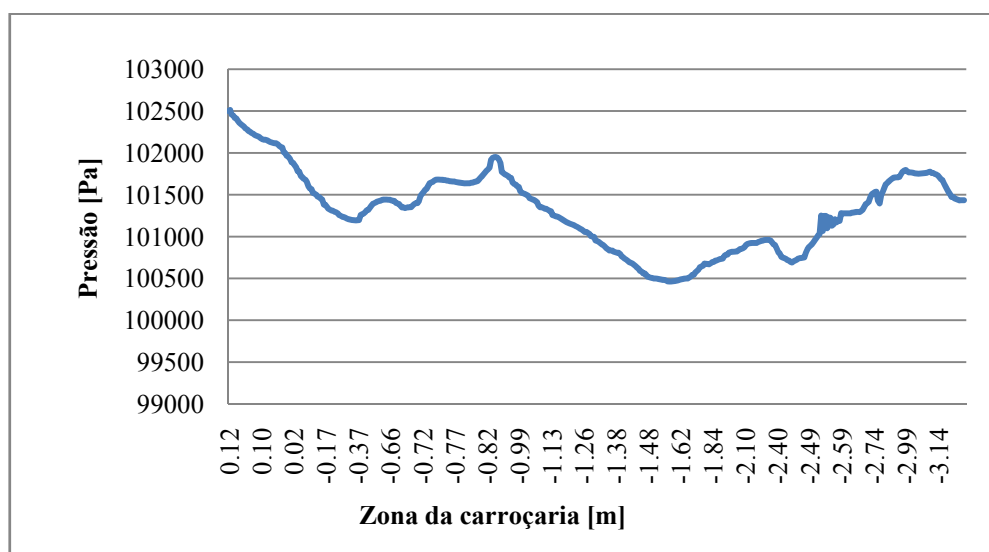


Figura 49 - Variação de pressão superficial ao longo da carroçaria sem spoiler

Da análise dos respectivos gráficos (ver Figura 48 e 49) de distribuição de pressão dos modelos, torna-se aparente que aproximadamente a partir da zona dos 2,4 m o aumento de pressão é muito mais linear e com um menor declive no modelo com spoiler, o que leva inclusivamente a uma redução da pressão máxima nesta zona. Este valor equivale a uma distância real de 2,51 m (zona final do vidro traseiro) a partir do início da carroçaria, visto que

a medição da carroçaria nos gráficos se inicia nos 0,11 m devido ao posicionamento do modelo CAD no sistema de coordenadas absolutas do Solidworks.

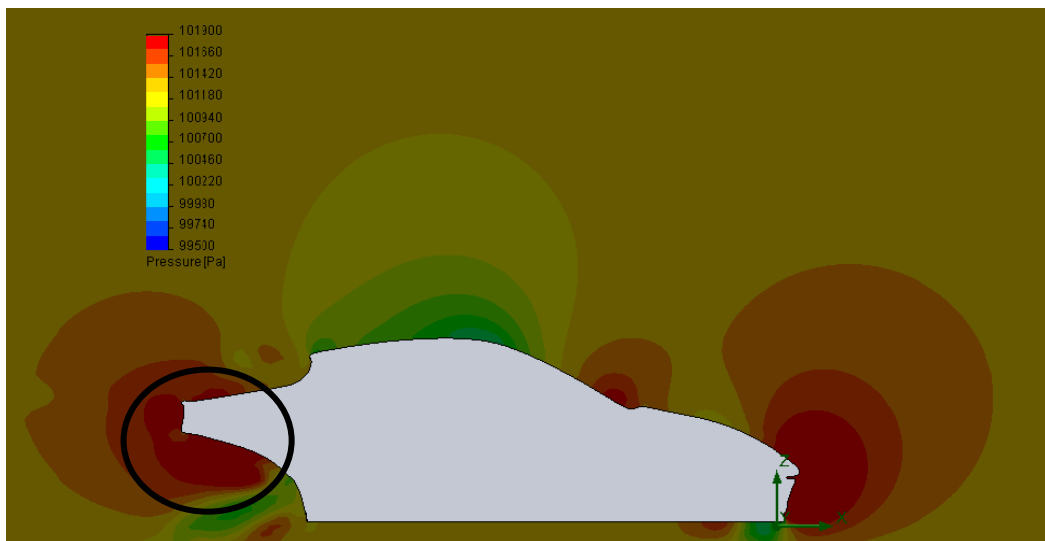


Figura 50 - Distribuição da pressão do modelo sem spoiler resultante da simulação em Flow Simulation

Analisando a Figura 42 e a Figura 50 é possível constatar que a implementação deste spoiler não afecta apenas a forma como o escoamento se processa na parte superior da zona traseira da carroçaria. Como seria de esperar, também afecta a forma como o escoamento se comporta na rectaguarda da mesma e consequentemente na sua zona inferior traseira. Nas imagens é bem visível que, no modelo com spoiler, a zona de alta pressão é alongada para a retaguarda da carroçaria afastando-a da mesma. Enquanto que no modelo sem spoiler a zona de alta pressão está muito mais próxima da carroçaria, encontrando-se uma grande parte da componente de mais alta pressão na parte inferior desta, o que sugere uma forte recirculação do escoamento nesta zona. Este modelo de distribuição de pressão é certamente muito mais penalizador em termos de C_d e C_l que o verificado com spoiler.

De acordo com (Barnard, 2009), dados experimentais sugerem que qualquer redução do ângulo θ abaixo do ângulo crítico (na ordem de 30° para veículos automóveis) leva tendencialmente a uma redução do arrasto e que a presença do spoiler traseiro afecta o ângulo de inclinação da traseira do veículo (θ). Poderá então assumir-se que a implementação do

spoiler, que reduz efectivamente o ângulo θ de aproximadamente $17,2^\circ$ para $12,5^\circ$, afecta toda a estrutura de vórtices na zona traseira da carroçaria. O que explicaria a variação na distribuição de pressão verificada nesta zona da carroçaria do VEECO. Sendo bastante plausível que este seja um factor condicionante para a redução de C_d e C_l obtida entre os dois modelos.

4.4. CONCLUSÃO PRELIMINAR DO CAPÍTULO 4

Dos vários métodos de discretização utilizados verifica-se que existem diferenças notáveis entre os resultados obtidos com as malhas definidas manualmente e as malhas geradas automaticamente. Este facto deve-se às diferenças entre os níveis de resolução e refinamento que estas apresentam. Utilizando malhas definidas automaticamente, mesmo com definições que geram os níveis de resolução e refinamento máximos, nunca se consegue obter níveis de discretização tão elevados e optimizados ao objecto de estudo como através da definição manual da malha.

Os níveis mais baixos de refinamento e a impossibilidade de manipular a resolução da malha definida automaticamente pode levar à não captação de pequenos pormenores do modelo de estudo, que assim são excluídos da análise numérica, o que poderá explicar a obtenção de forças de estudo inferiores.

Este facto foi verificado durante a fase de análises preliminares onde as forças de estudo obtidas aumentaram progressivamente com o aumento de refinamento. Poderá explicar também o aumento das forças para o modelo de estudo com refinamentos progressivos ao logo da simulação, uma vez que estes aumentam o refinamento e a resolução a nível local, como se pode ver na Figura 51.

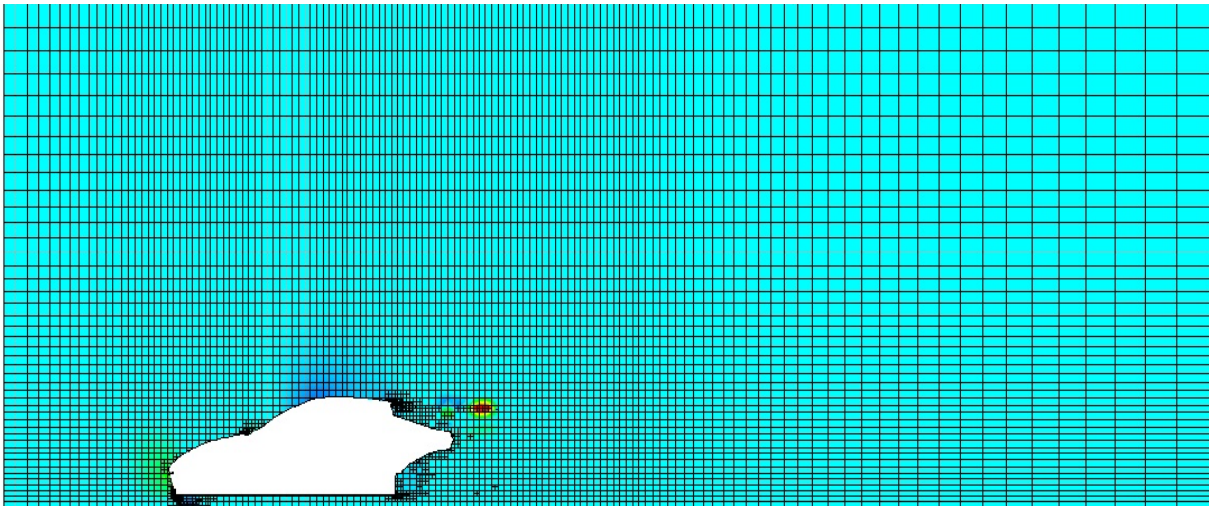


Figura 51 - Malha gerada automaticamente com refinamentos progressivos ao longo do refinamento em Flow Simulation

Nas malhas definidas manualmente, os refinamentos progressivos ao longo da simulação não terão grande expressão devido aos elevados níveis de refinamento e resolução que estas já apresentam. No caso da malha 1 o nível de refinamento inicial já é tão elevado que, devido aos factores que limitam a discretização do domínio computacional, os refinamentos ao longo da simulação produzem alterações irrelevantes (facilmente constatável analisando os dados das análises ou mesmo visualizando a Figura 61 e 62 no anexo C, onde não são perceptíveis as diferenças em relação à malha 1 sem refinamentos ao longo da simulação).

O método de definir malhas automaticamente mostrou-se apropriado para a realização de estudos preliminares e como base para a definição das malhas manuais. No entanto para objectos de estudo de elevada complexidade é aconselhável a definição manual das malhas computacionais. Na análise de objectos de estudo complexos com malhas geradas de forma automática os tempos de processamento aumentam substancialmente, uma vez que a resolução necessária só é conseguida através de refinamentos ao longo da simulação (realizados em zonas com elevados gradientes de parâmetros físicos).

Apesar dos resultados obtidos com os estudos de CFD apresentarem características de escoamento plausíveis que coincidem com a teoria da aerodinâmica automóveis, estes factores por si só não são o suficiente para validar os modelos computacionais utilizados.

A elevada complexidade do escoamento em torno de automóveis, devido em grande parte aos efeitos de separação que ocorrem ao longo do escoamento e à sua elevada

tridimensionalidade, torna muito difícil realizar previsões fiáveis do seu comportamento. Motivo pelo qual, apesar da análise puramente computacional ser muito interessante no sector industrial (redução de custos tanto monetários como de tempo), a validade dos modelos numéricos utilizados tem que ser sempre assegurada, por exemplo pela comparação com dados que resultam de ensaios experimentais.

A comparação com dados experimentais também facilita definir qual o método de discretização mais apropriado para o objecto de estudo.

Capítulo 5

PREPARAÇÃO PARA O ESTUDO EM TÚNEL AERODINÂMICO

5.1. INTRODUÇÃO AO CAPÍTULO 5

Com a evolução dos meios computacionais e dos métodos numéricos, o CFD tem-se tornado uma ferramenta cada vez mais atractiva para a análise de escoamentos. No entanto, como descrito anteriormente, devido essencialmente a limitações na modelação da turbulência que resultam da elevada tridimensionalidade dos escoamentos em torno de automóveis, a análise experimental em túnel de vento continua a assumir um papel importante no estudo do comportamento aerodinâmico automóvel e na respectiva validação de resultados numéricos.

De acordo com (Oliveira et al, 2010), devido aos elevados custos de construção e operação directamente associados às dimensões do túnel de vento, existem no mundo pouco mais de duas dezenas de túneis aerodinâmicos capazes de realizar ensaios de automóveis à escala 1:1.

Sem a existência de recursos que permitam a realização de ensaios à escala 1:1, são realizados ensaios utilizando modelos a uma escala inferior à uma unidade. Os resultados obtidos em ensaios à escala poderão depois ser extrapolados para a escala real, se forem satisfeitas as leis de semelhança aplicáveis ao estudo em causa.

Os ensaios da carroçaria do VEECO em túnel aerodinâmico foram realizados no Laboratório de Aeronáutica da Academia da Força Aérea Portuguesa, na base aérea nº 1, Sintra.

5.2. DESCRIÇÃO DO TÚNEL AERODINÂMICO

De acordo com (Félix, 2007) este laboratório tem à sua disposição um túnel de vento subsónico do tipo Gottingen (ver Figura 52) em circuito fechado, constituído por uma secção de trabalho, uma câmara de estabilização, uma zona de contracção, um colector, 2 difusores e 4 conjuntos de pás guiadoras.



Figura 52 - Túnel Aerodinâmico do Laboratório de Aeronáutica da AFA (Félix, 2007)

A gama de velocidades de escoamento assumíveis na secção de trabalho situa-se entre os 50 m/s e os 70 m/s.

O túnel está equipado com quinze tomadas de pressão estática, um termómetro resistivo e um barómetro para medir a pressão estática ambiente.

A densidade do ar é obtida através da Equação de estado para gases perfeitos (Eq. 5.1), utilizando a temperatura medida durante o ensaio.

$$P = \rho RT \Leftrightarrow \quad (5.1)$$

Onde, P é a pressão, R é a constante de um gás perfeito e T é a temperatura.

As forças são medidas com uma balança aerodinâmica de seis componentes (três forças e três momentos) que mede as forças e momentos nos eixos de estabilidade. A leitura dos valores medidos é realizada utilizando um computador.

5.3. CÁLCULOS DE APLICAÇÃO AO TÚNEL

Os ensaios em túnel aerodinâmico da carroçaria serão realizados utilizando um modelo à escala 1:5.

Para que os resultados obtidos nestes ensaios possam ser convertidos para a escala real, é necessário satisfazer as leis de semelhança aplicáveis ao estudo em causa.

5.3.1 REVISÃO TEÓRICA DE ANÁLISE DIMENSIONAL E SEMELHANÇA

De acordo com (White, 2002) os tipos de semelhança mais comuns são a semelhança geométrica, a cinemática, a dinâmica e a térmica, não sendo a última considerada para o estudo em causa.

5.3.1.1 SEMELHANÇA GEOMÉTRICA

A semelhança geométrica (Oliveira et al, 2010) envolve comprimentos (L), áreas (L²) e volumes (L³) e é respeitada se houver a mesma relação entre comprimentos no protótipo e no modelo, é então uma semelhança de forma. A sua existência garante que pontos com coordenadas geometricamente semelhantes serão **pontos homólogos**.

Definindo-se a **relação de escala** (L_r) como sendo:

$$L_r = \frac{L_p}{L_m} \quad (5.2)$$

Onde, L_p e L_m são o comprimento do protótipo e do modelo.

De acordo com (White, 2002) uma definição formal para semelhança geométrica é a seguinte:

Um modelo e um protótipo são geometricamente semelhantes se e somente se todas as dimensões do corpo nas três coordenadas têm a mesma razão de escala linear.

Enquanto existir uma relação de comprimentos entre o modelo e o protótipo, os ângulos permanecem iguais. A título de exemplo, se o protótipo for uma asa com comprimento 5m e um ângulo de ataque de 15°, o seu modelo à escala 1:10 terá respectivamente um comprimento de 0,5m e um ângulo de ataque de 15°.

5.3.1.2 SEMELHANÇA CINEMÁTICA

A semelhança cinemática (Oliveira et al, 2010) apenas é verificada, se em primeiro lugar estiver assegurada a semelhança geométrica. Esta é a condição necessária mas não suficiente para garantir a semelhança cinemática. Semelhança cinemática envolve a semelhança de comprimentos (L) e de tempos (T), relacionando-se assim com grandezas como velocidades (LT^{-1}) e acelerações (LT^{-2}), é uma semelhança de movimento. A semelhança cinemática é respeitada se as configurações das linhas de corrente, nos escoamentos do protótipo e do modelo, forem geometricamente semelhantes, ou seja se a relação entre velocidades em todos os pontos homólogos for constante, em instantes correspondentes.

Definindo-se a **escala de velocidades** (V_r) como sendo:

$$V_r = \frac{V_p}{V_m} \quad (5.3)$$

Onde, V_p e V_m são a velocidade do protótipo e do modelo.

A **escala de tempos** (T_r) como sendo:

$$T_r = \frac{T_p}{T_m} = \frac{L_p/V_p}{L_m/V_m} = \frac{L_r}{V_r} \quad (5.4)$$

Onde, T_p e T_m são o tempo do protótipo e do modelo.

E analogamente a **escala de acelerações** (a_r) como sendo:

$$a_r = \frac{a_p}{a_m} = \frac{V_p/T_p}{V_m/T_m} = \frac{V_r}{T_r} = \frac{V_r^2}{L_r} \quad (5.5)$$

Onde, a_p e a_m são a aceleração do protótipo e do modelo.

5.3.1.3 SEMELHANÇA DINÂMICA

A semelhança dinâmica (White, 2002) é a semelhança de forças e apenas é verificada se, em primeiro lugar, estiver assegurada a semelhança geométrica, mais uma vez esta é condição necessária mas não suficiente para garantir a semelhança cinemática.

A semelhança dinâmica está presente quando as mesmas razões de escala de comprimento (L), de escala de tempo (T) e de escala de massa (M) estão presentes no protótipo e no modelo.

5.3.1.4 PARÂMETROS ADIMENSIONAIS

O deslocamento de um corpo no seio de um fluido pode gerar forças de natureza diversa, que com maior ou menor importância relativa serão as seguintes (Oliveira et al, 2010):

- Pressão

As forças de pressão (F_p) que poderão ser escritas da seguinte forma:

$$F_p \approx \Delta p L^2 \quad (5.6)$$

Onde, Δp é a variação de pressão.

- Gravidade

As força da gravidade (F_g) que se escreve:

$$F_g \approx mg \approx \rho L^3 g \quad (5.7)$$

Onde, m é a massa e g a força da gravidade.

- Viscosidade

As forças de viscosidade (F_v) que actuam num fluido poderão ser definidas como:

$$F_v \approx \mu \frac{V}{L} L^2 = \mu VL \quad (5.8)$$

Onde, μ é a viscosidade dinâmica.

- Compressibilidade

A forças de compressibilidade (F_c) que se escrevem:

$$F_c \approx \rho a^2 L^2 \quad (5.9)$$

Onde, a é a aceleração.

- Tensão superficial

As forças de tensão superficial (F_t) que poderão ser escritas da seguinte forma:

$$F_t \approx \gamma L \quad (5.10)$$

Onde, γ é a relação dos calores específicos.

- Inércia

For fim as forças de inércia (F_i) escritas:

$$F_i \approx \rho L^3 \frac{L}{t^2} = \rho L^2 V^2 \quad (5.11)$$

Onde, t é o tempo.

As equações anteriormente descritas permitem estabelecer as relações necessárias para identificar os parâmetros adimensionais (Oliveira et al, 2010) mais importantes para a resolução de problemas de escoamentos isotérmicos, seguidamente enunciados:

Número de Reynolds (Re)

$$\frac{F_i}{F_v} \Rightarrow Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (5.12)$$

O número de Reynolds apenas poderá ser desprezado em zonas do escoamento que se situam longe dos altos gradientes de velocidade (White, 2002).

Número de Froude (Fr)

$$\frac{F_i}{F_g} \Rightarrow Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (5.13)$$

O número de Froude só revela importância em escoamentos com superfície livre (White, 2002).

Número de Euler (Eu)

$$\frac{F_p}{F_i} \Rightarrow Eu = \frac{\Delta p}{\rho V^2} \quad (5.14)$$

O número de Euler representa um coeficiente de pressão (Oliveira et al, 2010), utilizado na resolução de problemas onde é susceptível de ocorrerem pressões suficientemente baixas ao ponto de causar cavitação.

Número de Mach (Ma)

$$\frac{F_i}{F_c} \Rightarrow Ma = \frac{V}{a} \quad (5.15)$$

O efeito compressibilidade do fluido deverá ser considerado significativo para um escoamento (Oliveira et al, 2010) quando o número de Mach $\geq 0,3$.

Número de Weber (We)

$$\frac{F_i}{F_t} \Rightarrow We = \frac{\rho V^2 L}{\gamma} \quad (5.16)$$

O número de Weber (Oliveira et al, 2010) apenas se torna importante quando a influência da tensão superficial é relevante (ou seja quando o seu número é da ordem da unidade ou inferior).

5.3.2 CÁLCULOS PARA O MODELO À ESCALA 1:5

Atendendo às especificações do problema em causa, onde não há escoamento com superfície livre e a ocorrência de cavitação é bastante improvável, poderão ser desprezados, logo à partida, os números de Euler, Froude e Weber para a resolução deste problema.

Para a realização dos ensaios será utilizado um modelo à escala 1:5 do protótipo, considerando a velocidade máxima do protótipo de 160 Km/h.

A relação de escala será:

$$L_r = \frac{L_p}{L_m} = 5 \quad (5.17)$$

Considerando as baixas velocidades do escoamento, os efeitos da compressibilidade podem ser ignorados desprezando-se o número de Mach para os cálculos. A progressão do veículo poderá então ser caracterizada pela dependência do coeficiente de atrito aerodinâmico em função do número de Reynolds (Oliveira et al, 2010).

$$C_d = F(\text{Re}) \Leftrightarrow \frac{D}{\rho V^2 L^2} = F\left(\frac{\rho V L}{\mu}\right) \quad (5.18)$$

Logo se,

$$\begin{aligned} (\text{Re})_m &= (\text{Re})_p \Rightarrow (C_d)_m = (C_d)_p \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \left(\frac{\rho V L}{\mu}\right)_m &= \left(\frac{\rho V L}{\mu}\right)_p \Rightarrow \left(\frac{D}{\rho V^2 L^2}\right)_m = \left(\frac{D}{\rho V^2 L^2}\right)_p \end{aligned} \quad (5.19)$$

Considerando que o fluido de escoamento em torno, de ambos (modelo e protótipo) tem as mesmas especificações, as suas massas volúmicas e viscosidades são iguais.

Assim para garantir a igualdade dos coeficientes de arrasto do modelo e do protótipo, o ensaio à escala será válido se for realizado a uma velocidade:

$$V_m L_m = V_p L_p \Leftrightarrow V_m = \frac{V_p L_p}{L_m} \Leftrightarrow V_m = 5V_p \quad (5.20)$$

A validade do resultado acima descrito foi verificada por meio de uma simulação computacional do modelo, encontrando-se os seus resultados no anexo E.

Significando que para uma velocidade do protótipo de 160 Km/h, equivalente a 44,4 m/s, o ensaio teria de ser realizado com uma velocidade de escoamento de 800 Km/h, ou seja 222 m/s, o que segundo as especificações técnicas do túnel não é possível.

Como a gama de velocidades de escoamento admissíveis no túnel se situa entre os 5 e os 70 m/s, terá que ser estipulado um valor para a velocidade do escoamento de ar no túnel que se situe dentro desta gama. Assumindo-se o valor de $V_m = 44,4$ m/s para a velocidade do modelo para reproduzir uma velocidade equivalente de $V_p = 44,4$ m/s no protótipo.

Considerando que $T_m \approx T_p$ podemos considerar $\mu_m = \mu_p$, uma vez que a viscosidade dinâmica é função quase exclusivamente da temperatura (Oliveira et al, 2010). Aplicando estes dados à equação da igualdade dos números de Reynolds entre o modelo e o protótipo (descrita na Eq. 5.18) obtemos,

$$\begin{aligned} (\rho VL)_m &= (\rho VL)_p \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \rho_m &= \frac{\rho_p V_p L_p}{V_m L_m} \Leftrightarrow \rho_m = 5\rho_p \end{aligned} \quad (5.21)$$

Significando que para as condições dadas a massa volúmica do ar no túnel de vento tem que ser 5 vezes superior à massa volúmica do ar no protótipo, para tal bastaria pressurizar o túnel de vento. Considerando o comportamento do ar como sendo um gás perfeito, podemos calcular o diferencial de pressão que terá que existir entre o modelo e o protótipo para garantir a semelha física do ensaio.

$$\begin{aligned} \frac{P_m}{P_p} &= \frac{(\rho RT)_m}{(\rho RT)_p} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow P_m &= P_p \frac{\rho_m}{\rho_p} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow P_m &= 5P_p \end{aligned} \quad (5.22)$$

O túnel terá que ser pressurizado, aplicando uma pressão 5 vezes superior à existente no protótipo, ou seja a pressão teria que ser 5 vezes superior à pressão atmosférica. Assim estaria garantida a semelhança física no ensaio e podemos aplicar a equação da igualdade de coeficientes de atrito aerodinâmico entre o modelo e o protótipo (descrita na Eq. 5.18).

$$\begin{aligned} \left(\frac{D}{\rho V^2 L^2}\right)_m &= \left(\frac{D}{\rho V^2 L^2}\right)_p \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow D_m &= D_p \frac{\rho_m V_m^2 L_m^2}{\rho_p V_p^2 L_p^2} \Leftrightarrow \quad (5.23) \\ \Leftrightarrow D_m &= 0.2 D_p \Leftrightarrow \Leftrightarrow D_p = 5 D_m \end{aligned}$$

Resultando que a força de arrasto aerodinâmico do protótipo será 5 vezes superior à força de arrasto aerodinâmico medida no modelo.

Para verificar a veracidade dos resultados obtidos foi realizada uma análise CFD do modelo à escala 1:5, submetido a um escoamento com uma velocidade de 44.4 m/s e uma pressão 5 vezes superior à do protótipo, utilizando uma malha gerada automaticamente sem plano de simetria, com refinamentos ao longo da simulação (em anexo E). Desta análise resultou uma força de arrasto do modelo de 111.32 N que segundo os cálculos anteriores representa uma força de arrasto do protótipo de 556.6 N, o que é um valor muito próximo do arrasto no protótipo de 572.74 N descrito na Tabela 6 (com discretização similar mas com plano de simetria).

5.4. CONCLUSÃO PRELIMINAR DO CAPÍTULO 5

A metodologia de cálculo anteriormente apresentada apesar de correcta baseia-se na possibilidade de realizar ensaios pressurizados, o que nem sempre é possível. Sem a possibilidade de pressurizar o túnel de vento (como é o caso) terão que ser assumidas algumas simplificações para a realização e validação dos ensaios.

Para números de Reynolds, do protótipo e do modelo durante as respectivas análises, de:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\rho V A_p}{\mu}\right)_p &\approx 2,5 \times 10^6 \\ \left(\frac{\rho V A_p}{\mu}\right)_m &\approx 2,5 \times 10^5 \end{aligned} \tag{5.24}$$

Considerando para uma temperatura de ensaio medida $T = 29,8 \text{ }^\circ\text{C}$:

- A massa volúmica do ar $\rho = 1,165 \text{ kg/m}^3$;
- A viscosidade dinâmica $\mu = 1,789 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ (White, 2002);
- A velocidade do escoamento para o protótipo de $V = 25 \text{ m/s}$;
- A velocidade do escoamento para o modelo de $V = 59,9 \text{ m/s}$;
- A área projectada do protótipo $A_p = 1,503 \text{ m}^2$
- A área projectada do modelo $A_p = 0,06 \text{ m}^2$

Segundo (Felix, 2007), cujo trabalho foi realizado no mesmo túnel com considerações semelhantes e como o número de Reynolds é um quociente de ordens de grandeza, a diferença entre 10^6 e 10^5 é desprezável quanto ao número de Reynolds. Assim, os ensaios poderão ser realizados garantindo uma equivalência entre o protótipo e o modelo.

Capítulo 6

ENSAIOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1. INTRODUÇÃO AO CAPÍTULO 6

Foram realizados, no âmbito do projecto VEECO, ensaios experimentais em pista e em túnel de vento. Embora a sua realização se encontre fora do âmbito deste trabalho, os resultados obtidos por estes meios de análise, têm um valor acrescentado para a validação das análises numéricas realizadas.

6.2. ENSAIOS EXPERIMENTAIS EM PISTA

Os ensaios experimentais em pista foram realizados com o objectivo de determinar o coeficiente de atrito de rolamento e coeficiente de atrito aerodinâmico do protótipo do VEECO, as considerações tomadas, o procedimento e os resultados encontram-se de brevemente descritos abaixo.

6.2.1 CONSIDERAÇÕES E REALIZAÇÃO

De acordo com (Fonte *et al*, 2012) foram tidas em causa as seguintes considerações, para a realização dos ensaios:

- Densidade do ar = $1,269 \text{ kg.m}^{-3}$;
- Aceleração gravítica = $9,8014 \text{ m.s}^{-2}$;
- Área projectada do veículo = $1,737 \text{ m}^2$.

De acordo com (Fonte *et al*, 2012), os ensaios tiveram início com o protótipo animado e estabilizado a uma velocidade suficientemente elevada, de forma a garantir a presença, não

desprezável, do atrito aerodinâmico, sendo este depois desacelerado por amortecimento natural até à sua imobilização. A velocidade de 80 km/h foi considerada como referência a partir da qual se fará sentir o atrito aerodinâmico.

6.2.2 RESULTADOS

Foram realizados sete ensaios a partir dos quais foram calculados os valores de C_d apresentados na Tabela 8.

Tabela 7 - Valores calculados dos coeficientes de arrasto C_d (Fonte et al, 2012)

	C_d
Ensaio 1	0,3156
Ensaio 2	0,4073
Ensaio 3	0,2452
Ensaio 4	0,4403
Ensaio 5	0,2477
Ensaio 6	0,3986
Ensaio 7	0,2223

Resultando um valor médio para o C_d de 0,3253 (Fonte et al, 2012). Mas como não foi realizado o registo da velocidade do vento presente durante os ensaios, bem como o número de ensaios não foi o suficiente para minimizar o efeito do vento e verificar uma tendência média realista para o coeficiente de arrasto, considera-se que a determinação do coeficiente de atrito aerodinâmico foi condicionada e os resultados obtidos não são válidos para a estipulação do coeficiente de arrasto do protótipo. Serão no entanto utilizados no presente trabalho com o objectivo de comparação de resultados obtidos, entre os diferentes tipos de análises realizadas no âmbito deste projecto.

6.3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS EM TÚNEL DE VENTO

Foram realizados ensaios em túnel de vento, do modelo à escala 1:5, para velocidades desde os 50 até aos 215,64 Km/h.

Como os coeficientes de arrasto e sustentação, neste caso, são independentes da velocidade, foi seleccionado para o cálculo dos coeficientes o ensaio com a velocidade mais próxima da utilizada nas análises CFD.

Tabela 8 - Dados para os cálculos dos coeficientes de arrasto e sustentação

Velocidade de deslocamento	Area Projectada	Temperatura	Densidade do ar
45,3 m/s	0,063 m ²	302,95 K	1,16 Kg/m ³

Tabela 9 - Resultados obtidos da simulação do ensaio de túnel de vento

Força de arrasto (Fx) [N]	Cd	Força de Sustentação (Fz) [N]	Ci
14,18	0,189	0,805	0,011

Os valores das forças apresentadas na Tabela 9 são as médias calculadas para os valores obtidos no respectivo ensaio. No entanto o C_d e C_i foram verificados para todos os ensaios para excluir a eventualidade de ter sido seleccionado um ensaio defeituoso.

6.4. CONCLUSÃO PRELIMINAR DO CAPÍTULO 6

Os resultados experimentais obtidos em túnel de vento apresentam valores suspeitos, uma vez que o C_d e o C_i são demasiado baixos em relação ao que seria de esperar num veículo deste género.



Figura 53 - Modelo utilizado para a realização da simulação do ensaio em túnel de vento

Como o ensaio de túnel de vento foi realizado em canal aberto com o modelo apoiado sobre uma placa cilíndrica com uma raio de 390mm e uma altura de 20mm (visível na Figura 53), foi realizada uma simulação no Flow Simulation (reproduzindo virtualmente o ensaio em túnel de vento) com o objectivo de esclarecer se os valores obtidos são resultado de influências físicas e geométricas causadas pela placa cilíndrica utilizada no ensaio.

Os resultados da simulação CFD (em anexo E) comprovam a equivalência, referida na conclusão do capítulo anterior, entre o protótipo e o modelo para os números de Reynolds em causa, no entanto não sugerem influências negativas críticas resultantes do método como foi realizado o ensaio experimental (ver Tabela 10).

Tabela 10 - Resultados obtidos da simulação do ensaio de túnel de vento em Flow Simulation

Força de arrasto [N]	Cd	Força de Sustentação [N]	Cl
22,99	0,319	23,05	0,320

Embora a análise da componente de força lateral não tenha sido foco de estudo neste trabalho, a sua análise no caso dos ensaios experimentais realizados fornece informações importantes quanto aos resultados obtidos nesses ensaios. Analisando os resultados experimentais dos diversos ensaios (em anexo F) verifica-se que a componente de força lateral (F_y) é sempre bastante superior (mais que o dobro) à componente de arrasto aerodinâmico (F_x) e que a componente de sustentação (F_z) é praticamente inexistente quando comparada com as restantes componentes. Estes factos sugerem a ocorrência de uma falha durante o ensaio,

podendo esta possivelmente ser motivada por uma deficiência no sistema de medição de forças.

Os resultados obtidos pelo ensaio em túnel de vento não podem por este motivo ser considerados válidos e assim utilizados para a comparação com os resultados numéricos.

Quanto aos resultados experimentais em pista, apesar da ordem de valores do resultado médio ser muito próxima dos valores obtidos com as análises CFD, nada poderá ser concluído quanto à forma como estes se relacionam, devido aos factores acima descritos que condicionaram o ensaio (reduzido numero de ensaios realizados e a não contabilização do efeito do vento).

Capítulo 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1. CONCLUSÃO

Com este trabalho foram estabelecidas as bases que permitem a continuação do desenvolvimento da carroçaria do VEECO, a nível computacional, segundo os diversos sectores da engenharia.

Adicionalmente além de se ter conseguido desenvolver com sucesso um modelo CAD inteiramente funcional da carroçaria do VEECO, a partir de um modelo meramente gráfico da mesma, as técnicas e metodologias desenvolvidas neste trabalho (a nível de desenvolvimento computacional de produtos) podem ser aplicadas com sucesso ao desenvolvimento de outros produtos. Estas permitem superar as fronteiras impostas a muitas pequenas e médias empresas, para as quais as tecnologias assistidas por computador ainda não fazem parte do seu processo de desenvolvimento.

A possibilidade de utilizar tecnologias assistidas por computar traz grandes vantagens para o desenvolvimento de produtos a nível geral, seja este:

- O desenvolvimento de produtos inteiramente novos;
- O desenvolvimento de produtos novos a partir de produtos existentes;
- O desenvolvimento alterações e melhorias em produtos existentes.

As metodologias de conversão de dados, técnicas de engenharia inversa e construção CAD aplicadas permitem a importação e a reconstrução de dados de design num sistema CAD, independentemente se estes dados são virtuais ou físicos. Possibilitando a transição para um desenvolvimento de produto utilizando as tecnologias assistidas por computador.

Durante o processo de desenvolvimento do VEECO o próprio processo foi otimizado, incluindo novas técnicas (como a reconstrução automática) que possibilitam o decorrer simultâneo de diversas fases de desenvolvimento, tornando todo o processo ainda mais eficiente.

A possibilidade de diversas fases decorrem em simultâneo demonstrou-se muito útil para o desenvolvimento do segundo objectivo proposto deste trabalho, o estudo aerodinâmico da carroçaria, permitindo o seu início ainda numa fase muito prematura do projecto. As definições para análise numérica começaram a ser estudadas, sob a forma de análises preliminares, ainda muito antes de ter sido obtido o modelo CAD final ou até mesmo definidas as alterações finais de design.

Os resultados obtidos com as análises computacionais apresentam-se plausíveis, no entanto devido à invalidade dos dados obtidos experimentalmente nada pode ser concluído quanto à validade dos modelos numéricos. No âmbito de validar os modelos numéricos utilizados (ou caso necessário proceder a definição de novos modelos), terão que ser realizados novos ensaios experimentais que forneçam dados válidos.

Tratando-se o VEECO de uma proposta para um protótipo mas que no entanto já se encontra numa fase inicial de produção em série, os desenvolvimentos conseguidos neste trabalho dificilmente terão aplicação nos modelos actualmente em construção. No entanto tendo em conta que a série actualmente em produção, para garantir o seu lugar no mercado, terá inevitavelmente que evoluir e amadurecer, sobre a forma de novas versões melhoradas e optimizadas, o trabalho de desenvolvimento realizado e uma continuação futura deste trará certamente grandes vantagens para a optimização de todo o processo industrial do VEECO, ajudando a garantir assim a sua competitividade perante um mercado cada vez mais exigente.

7.2. TRABALHOS FUTUROS

Apesar de existir um grande potencial de optimização no que toca a veículos automóveis de utilização corrente, estes nunca poderão ser concebidos com base numa optimização puramente aerodinâmica, devido a uma diversidade de factores como a praticabilidade de utilização, custo, design apelativo para vendas etc.

Em resultado do trabalho realizado serão seguidamente enunciados os estudos e optimizações a nível aerodinâmico considerados mais importantes para futuras versões do VEECO:

- Análise e optimização da parte inferior do veículo. A parte inferior de automóveis comerciais é bastante irregular contribuindo aproximadamente em 20% (Barnard, 2009) para o coeficiente de atrito o que torna esta zona particularmente interessante para o processo de optimização aerodinâmica. É neste sentido importante numa fase mais avançada do projecto (após a modelação CAD do VEECO na sua totalidade) realizar estudos aerodinâmicos utilizando um modelo da carroçaria com a parte inferior detalhadamente definida;
- Análise e optimização das entradas de ar do veículo. Tendo em conta que a localização das entradas de ar do habitáculo e de arrefecimento foram implementadas sem estudo aerodinâmico prévio, a análise da eficácia das existentes entradas ar e de possíveis optimizações será sem dúvida pertinente para o desenvolvimento de futuras versões do VEECO;
- Análise da estabilidade lateral do veículo. A estabilidade lateral de um veículo quando sujeito a ventos laterais é um factor importante para segurança do mesmo, devendo portanto ser analisada e optimizada caso necessário;
- Optimização da zona frontal da carroçaria para a redução dos vórtices estacionários gerados na junção entre o capô e o pára-brisas;
- Análise detalhada do escoamento em torno do spoiler e da sua influência na zona de recirculação traseira do veículo, bem como a definição e análise de possíveis optimizações geométricas do mesmo.

Estas propostas de optimização não resultam de alterações significativas de design, não afectando assim os restantes factores que fundamentam o design de um veículo, mas representam melhorias significativas para o desempenho deste.

No entanto, antes da continuação de qualquer estudo aerodinâmico a nível computacional é imperativo realizar novos ensaios experimentais, cujos resultados forneçam dados sólidos que permitam a validação dos modelos numéricos utilizados. Desta forma, estes modelos poderão ser utilizados no estudo de optimizações que poderão ser incorporadas em futuras versões do VEECO.

No seguimento deste trabalho será também importante finalizar a modelação CAD do veículo a fim de obter um modelo digital completo e detalhado do VEECO. Assim, no âmbito do processo de optimização aerodinâmica, torna-se possível introduzir cada vez mais detalhe no modelo utilizado para as simulações aerodinâmicas.

No âmbito do desenvolvimento da carroçaria do VEECO será também importante definir os materiais para os diversos componentes e zonas da carroçaria, a fim de realizar análises estruturais que permitam descrever e optimizar o comportamento estrutural desta. Tendo em conta o estado actual do desenvolvimento da carroçaria, esta fase poderá decorrer sem grandes problemáticas em simultâneo com a continuação do processo de modelação CAD e de optimização aerodinâmica.

BIBLIOGRAFIA

ANSYS. (2009). *Introduction to CFX - Domains and Boundary Conditions* . ANSYS

Barnard, R. H. (2009). *Road Vehicle Aerodynamic Design*. Third Edition, MechAero Publishing. Hertfordshire.

CATIA V5. *Digitized Shape Editor*. Version 5 Release 17, Dassult Systemes.

CATIA V5. *Freestyle Shaper, Optimizer and Profiler*. Version 5 Release 17, Dassult Systemes.

CATIA V5. *Fundamentals*. Version 5 Release 17, Dassult Systemes.

CATIA V5. *Generative Shape Design*. Version 5 Release 17, Dassult Systemes.

CATIA V5. *Healing Assistant*. Version 5 Release 17, Dassult Systemes.

CATIA V5. *Quick Surface Reconstruction*. Version 5 Release 17, Dassult Systemes.

Chandra, S. & Lee, A. & Gorrel, S. & Jensen, G. (2011). *CFD Analysis of PACE Formula-1 Car*. Computer-Aided Design & Applications

Coz, Dominique. (2007). *Reverse Engineering with CATIA V5*. Dassult Systemes.

Dias, F. T. & Pinto-da-Cruz, J. & Valente, R. A. F. & Sousa, R. J. (2010). *Método dos Elementos Finitos – Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia*. ETEP. Porto

Félix, Luís (2007). *Determinação das Derivadas de Estabilidade e Momentos de Inércia do UAV Antex-M X03*. Academia da força aérea e Instituto Superior Técnico. Lisboa.

Fonte, P. & Pereira, R. (2012). *Relatório do ensaio para a determinação do atrito de rolamento e coeficiente aerodinâmico do protótipo*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa.

- Genta, G. (1999). *Motor Vehicle Dynamics Modeling and Simulation*. Volume 43, World Scientific Publishing. London.
- Grabner, J. & Nothhaft, R. (2006). *Konstruieren von PKW-Karosserien*. Springer. Munique.
- Hoffman J. & Johnson C. (2006). *Computational Turbulent Incompressible Flow*. Volume 4, Applied Mathematics: Body & Soul.
- Houghton, E. L. & Carpenter, P. V. (2003). *Aerodynamics for Engineering Students*. Fifth Edition, Butterworth Heinemann.
- Katz, J. (1995). *Race Car Aerodynamics Designing for Speed*. Bentley Publishers. Cambridge
- Koike, M & Nagayoshi, T & Hamamoto, T. (2004). *Research on Aerodynamic Drag Reduction by Vortex Generators*. MITSUBISHI MOTORS Technical Review N°16.
- Meywer, Martin. (2007). *CAE-Methoden in der Fharzeugtechnik*. Springer. Hamburgo.
- Milliken, W. F. & Milliken, D. L. (1996). *Race Car Vehicle Dynamics*. SAE International. Warrendale.
- Oliveira, L. A. & Lopes, A. G. (2010). *Mecânica dos Fluidos*. 3ª Edição, ETEP. Lisboa.
- Peddiraju, P. & Papadopoulous, A. & Singh, R. (2009). *CAE frame work for aerodynamic design development of automotive vehicles*. 3rd ANSA & µETA International Conference. Halkidiki.
- Perzon, S. & Davidson, L. (2000). *On CFD and transient flow in vehicle aerodynamics*. SAE Technical paper 2000-01-0873.
- Projecto VECCO. (2010). *Relatório Consolidado da Aquisição de Novos Conhecimentos e do Desenvolvimento da Plataforma, Carroçaria e Aerodinâmica Automóvel*. Série 1, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa.
- Projecto VECCO. (2011). *Desenvolvimento da Carroçaria*. Série 1, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa.

Projecto VECCO. (2011). *Desenvolvimento da Carroçaria*. Série 2, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa.

SolidWorks Flow Simulation. (2010). *Solving Engineering Problems*. Dassult Systemes SolidWorks.

SolidWorks Flow Simulation. (2010). *Technical Reference*. Dassult Systemes SolidWorks.

SolidWorks Flow Simulation. (2010). *Tutorial*. Dassult Systemes SolidWorks.

Tu, J. & Yeoh, G. H. & Liu, C. (2008). *Computational Fluid Dynamics A Practical Approach*. First edition, Elsevier. Burlington.

White, F. M. (2002). *Mecânica dos Fluidos*. 4ª edição, McGraw-Hill. Rio de Janeiro.

Dados do Smart Roadster. (19.09.2012). http://de.wikipedia.org/wiki/Smart_Roadster

ANEXO A – VECCO RT CARACTERISTICAS DE MODELAÇÃO

Nas figuras seguintes pode observar-se o modelo CAD final carroçaria do VEECO, alguns exemplos de aplicações possíveis que resultam da estratégia de modelação utilizada e várias vistas da análise de "zebra" realizada para a carroçaria completa.

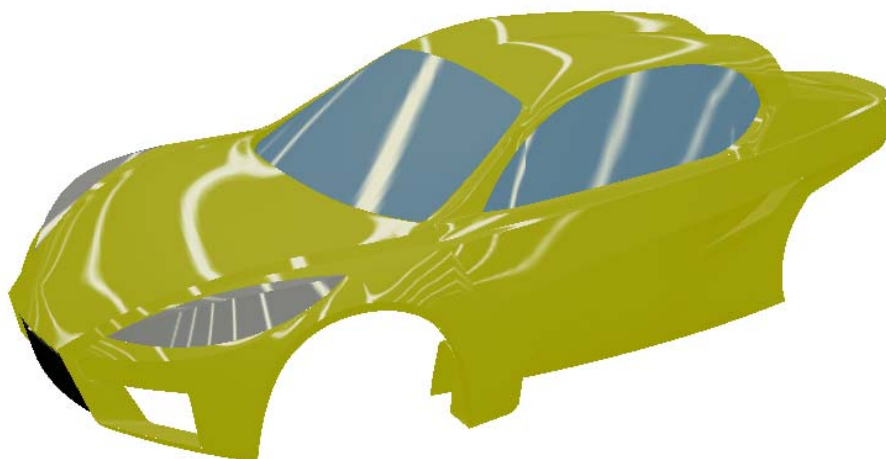


Figura 54 – Modelo final da carroçaria do VEECO RT

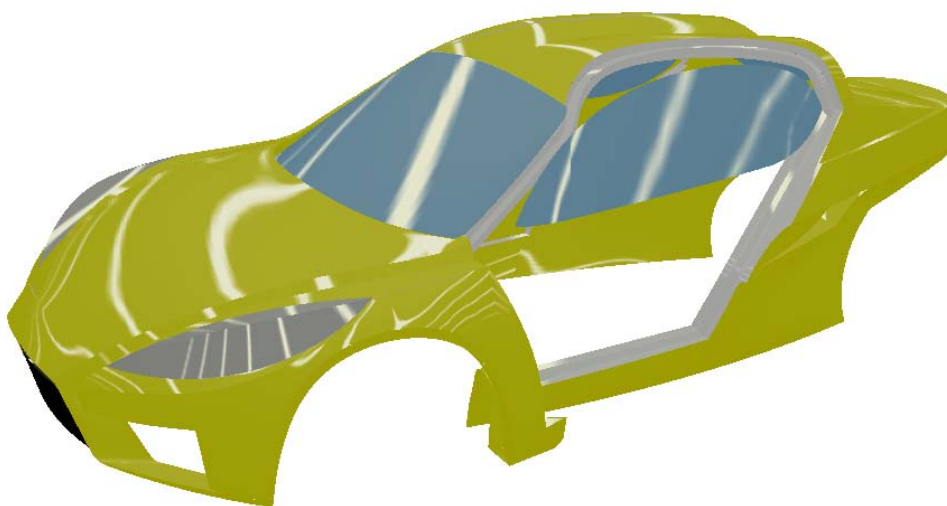


Figura 55 – Carroçaria do VEECO RT sem porta

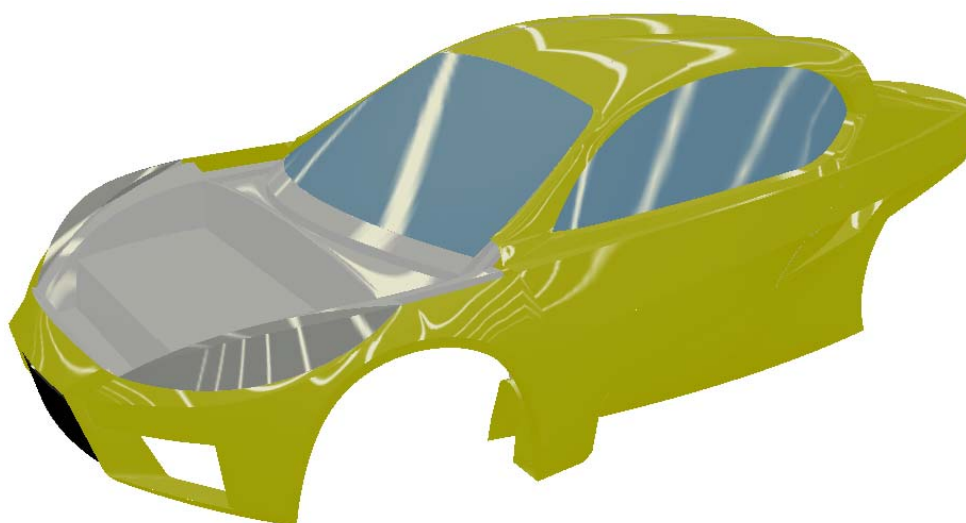


Figura 56 – Carroçaria do VEECO RT sem capô

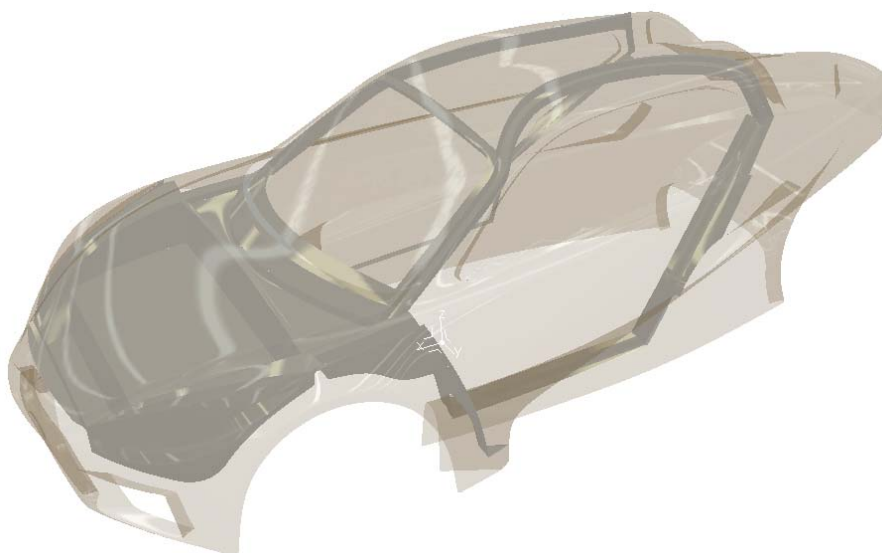


Figura 57 – Estrutura interior da carroçaria do VEECO RT

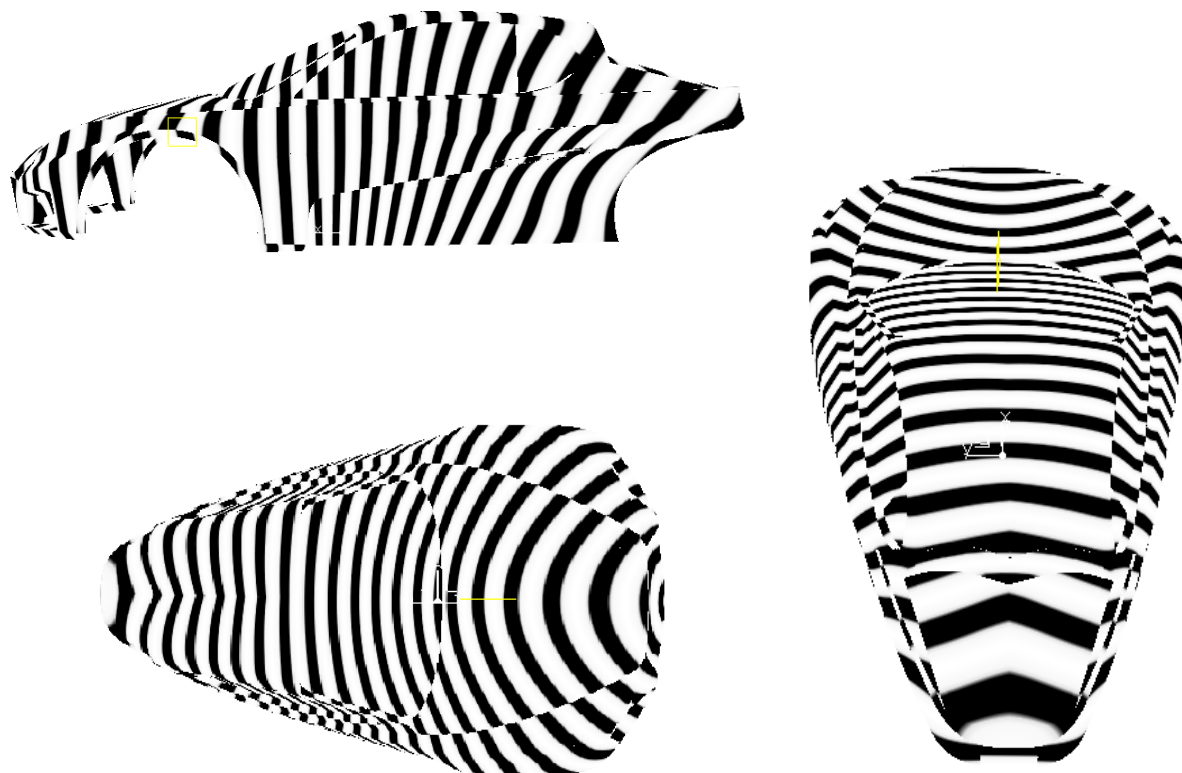


Figura 58 – Vistas diferenciadas da análise de “zebra” da carroçaria do VEECO RT

ANEXO B – VECCO RT CARACTERÍSTICAS DO MODELO

Nas figuras seguintes pode observar-se o modelo sólido da carroçaria do VEECO utilizado para as análises computacionais, juntamente com as suas medidas principais.

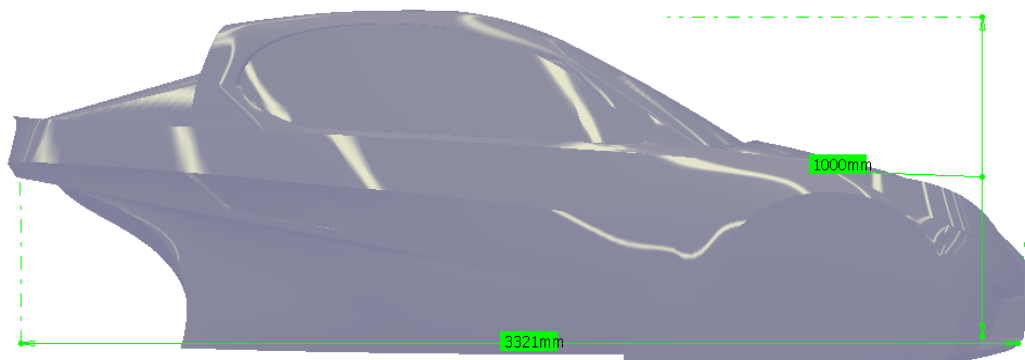


Figura 59 – Vista lateral e medidas principais da carroçaria do VEECO

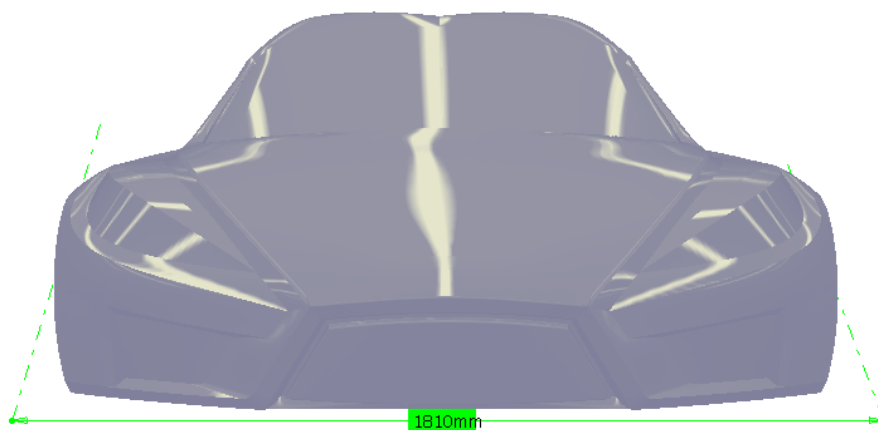


Figura 60 – Vista frontal e medidas principais da carroçaria do VEECO

ANEXO C – DADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA DO MODELO COM SPOILER

Dados gerais das análises numéricas

System Info

Product	Flow Simulation 2010 0.0. Build: 1063
Computer name	INGO-PC
User name	ingo
Processors	Intel(R) Core(TM) i7 CPU Q 720 @ 1.60GHz
Memory	4020 MB / 8388607 MB
Operating system	(Build 7600)
CAD version	SolidWorks 2010 SP0
CPU speed	1600 MHz

General Info

Units system	SI (m-kg-s)
Analysis type	External (exclude internal spaces)
Exclude cavities without flow conditions	On
Coordinate system	Global coordinate system
Reference axis	X

Computational Domain

X min	-22.4 m
X max	2 m
Y min	0 m
Y max	8 m
Z min	-0.12 m
Z max	5 m

Boundary Conditions

2D plane flow	None
At X min	Default
At X max	Default
At Y min	Symmetry
At Y max	Default
At Z min	Default
At Z max	Default

Physical Features

Heat conduction in solids: Off

Time dependent: Off

Gravitational effects: Off

Flow type: Laminar and turbulent

High Mach number flow: Off

Humidity: Off

Default roughness: 0 micrometer

Default wall conditions: Adiabatic wall

Material Settings

Fluids: Air

Ambient Conditions

Thermodynamic parameters	Static Pressure: 101325 Pa Temperature: 293.2 K
Velocity parameters	Velocity vector Velocity in X direction: -44.44 m/s Velocity in Y direction: 0 m/s Velocity in Z direction: 0 m/s
Turbulence parameters	Turbulence intensity and length Intensity: 0.1 % Length: 0.01 m

Dados gerais das análises numéricas aplicando a malha 1

Initial Mesh Settings

Automatic initial mesh: Off

Basic Mesh Dimensions

Number of cells in X	213
Number of cells in Y	70
Number of cells in Z	70

Control Planes

Control planes in X direction

Name	Minimum	Maximum	Number of cells	Ratio
X1	-22.4	-8	30	3
X2	-8	-3.5	60	3
X3	-3.5	0.5	105	1
X4	0.5	1.5	15	0.333333
X5	1.5	2	3	1

Control planes in Y direction

Name	Minimum	Maximum	Number of cells	Ratio
Y1	0	1.5	40	1
Y2	1.5	3.5	20	0.333333
Y3	3.5	8	10	0.5

Control planes in Z direction

Name	Minimum	Maximum	Number of cells	Ratio
Z1	-0.12	1.5	40	1
Z2	1.5	3	20	0.333333
Z3	3	5	10	0.333333

Solid/Fluid Interface

Small solid features refinement level	2
Curvature refinement level	3
Curvature refinement criterion	0.0893270217
Tolerance refinement level	2
Tolerance refinement criterion	0.01 m

Refining cells

Refine fluid cells	Off
Refine partial cells	On
Level of refining partial cells	1
Refine solid cells	Off

Narrow Channels

Advanced narrow channel refinement	On
Characteristic number of cells across a narrow channel	10
Narrow channels refinement level	5
The minimum height of narrow channels	Off
The maximum height of narrow channels	Off

Análise sem refinamentos ao longo da simulação

General Info

Iterations: 261

CPU time: 24763 s

Number Of Cells

Total cells	2198203
Fluid cells	1529335
Solid cells	343067
Partial cells	325801
Irregular cells	0
Trimmed cells	900

Goals

Name	Unit	Value	Progress	Use in convergence	Delta	Criteria
GG Av Static Pressure 1	Pa	101326	0	Off	0.0203195 975	0.0523705 332
GG Av Total Pressure 1	Pa	102522	100	On	0.0598873 372	0.1538659 2
GG Av Dynamic	Pa	1191.13	100	On	0.0492819 018	0.1059691 56

Pressure 1						
GG Av Velocity 1	m/s	44.4808	0	Off	0.0010254 9372	0.0018418 5449
GG Av X - Component of Velocity 1	m/s	-44.4672	0	Off	0.0011991 1735	0.0016635 983
GG Av Y - Component of Velocity 1	m/s	0.117282	0	Off	0.0032067 4828	0.0034418 4307
GG Av Z - Component of Velocity 1	m/s	0.161495	0	Off	0.0031974 2865	0.0046893 5889
GG Av Turbulent Length 1	m	0.0112557	0	Off	0.0002225 82499	3.7475431 8e-005
GG X - Component of Force 1	N	-282.833	100	On	3.3880166 6	25.295555 2
GG Y - Component of Force 1	N	465.678	0	Off	4.1535051 3	21.537810 7
GG Z - Component of Force 1	N	156.009	100	On	5.6565059 2	13.499731 6

Force 1						
GG Min Static Pressure 1	Pa	96797.4	0	Off	54.243718 2	599.58381 9
GG Max Static Pressure 1	Pa	103365	0	Off	83.971875 4	532.64152 4
GG Min Total Pressure 1	Pa	96797.4	100	On	54.243718 2	599.58381 9
GG Max Total Pressure 1	Pa	108283	100	On	134.32829 3	418.51210 3
GG Min Dynamic Pressure 1	Pa	0	100	On	0	0
GG Max Dynamic Pressure 1	Pa	4836.22	100	On	50.407616	74.717990 5
GG Min Velocity 1	m/s	0	0	Off	0	0
GG Max Velocity 1	m/s	88.3126	0	Off	0.4181040 43	0.6801955 44

GG Min X - Component of Velocity 1	m/s	-79.1898	100	On	0.1313907 78	0.9305815 43
GG Max X - Component of Velocity 1	m/s	63.6839	100	On	0.1786784 48	1.3883649 3

Min/Max Table

Name	Minimum	Maximum
Pressure [Pa]	96797.4	103365
Temperature [K]	290.288	294.249
Velocity [m/s]	0	86.653
X – Component of Velocity [m/s]	-75.2548	58.6255
Y – Component of Velocity [m/s]	-40.4792	60.1231
Z – Component of Velocity [m/s]	-82.0619	46.5631
Fluid Temperature [K]	290.288	294.249
Mach Number []	0	0.253766
Shear Stress [Pa]	0	112.361
Heat Transfer Coefficient [W/m ² /K]	0	0
Surface Heat Flux [W/m ²]	0	0
Density [kg/m ³]	1.1525	1.2402

Análise com refinamentos ao longo da simulação

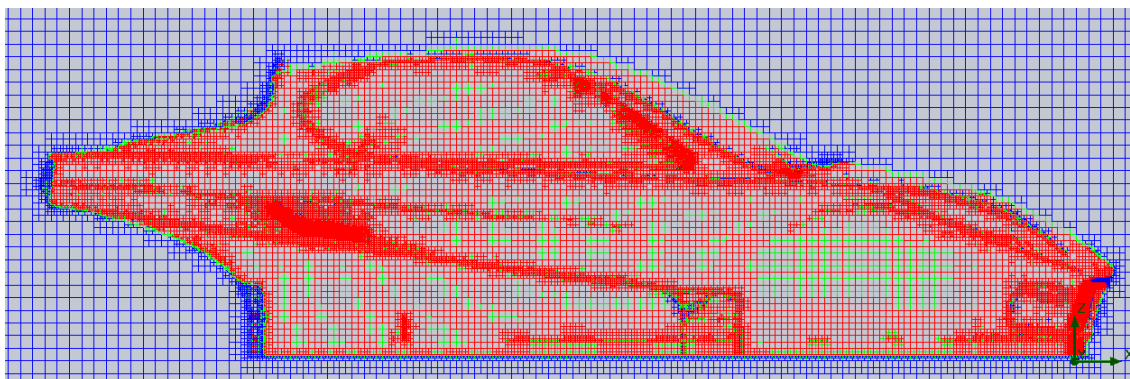


Figura 61 - Vista de topo da malha 1 com refinamentos ao longo da simulação obtida em Flow Simulation

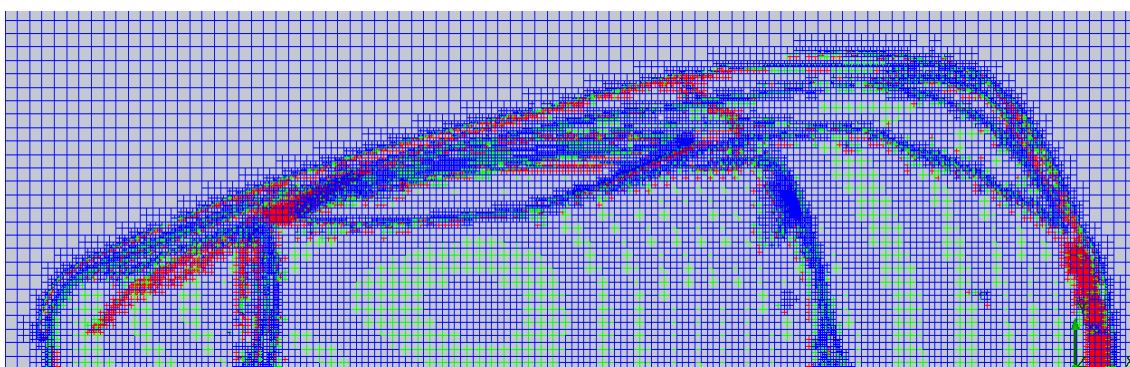


Figura 62 - Vista lateral da malha 1 com refinamentos ao longo da simulação obtida em Flow Simulation

General Info

Iterations: 291

CPU time: 32277 s

Solver Refinement

Refinement level	7
Refinement criterion	1.5
Unrefinement criterion	0.15
Adaptive refinement in fluid	On
Use global parameter variation	Off
Approximate maximum cells	2000000
Refinement strategy	Periodic
Units	Iterations
Relaxation interval	40
Periodic refinement options	Start: 100 Period: 50

Number Of Cells

Total cells	2198203
Fluid cells	1529335
Solid cells	343067
Partial cells	325801
Irregular cells	0
Trimmed cells	900

Goals

Name	Unit	Value	Progress	Use in convergence	Delta	Criteria
GG Av Static Pressure 1	Pa	101326	0	Off	0.0143474 479	0.0520291 733
GG Av Total Pressure 1	Pa	102522	100	On	0.0707783 483	0.1536645 79
GG Av Dynamic Pressure 1	Pa	1191.16	100	On	0.0601924 202	0.1059861 05
GG Av Velocity 1	m/s	44.4815	0	Off	0.0012711 291	0.0018421 329
GG Av X - Component of Velocity 1	m/s	-44.4679	0	Off	0.0012718 0155	0.0016639 923
GG Av Y - Component of Velocity 1	m/s	0.117283	0	Off	0.0018577 8339	0.0034347 3444
GG Av Z - Component of Velocity 1	m/s	0.161457	0	Off	0.0011177 116	0.0046734 9042

GG Av	m	0.0112623	0	Off	0.0001252	3.7397771
Turbulent Length 1					5023	2e-005
GG X -	N	-282.965	100	On	3.4186215	25.287472
Component of Force 1					6	3
GG Y -	N	465.902	0	Off	3.3743594	21.540097
Component of Force 1					2	8
GG Z -	N	154.294	100	On	6.1520979	13.475773
Component of Force 1					5	7
GG Min Static Pressure 1	Pa	96780.6	0	Off	20.218319	599.230479
GG Max Static Pressure 1	Pa	103355	0	Off	39.760489	532.585125
GG Min Total Pressure 1	Pa	96780.6	100	On	20.218319	599.230479
GG Max Total Pressure 1	Pa	108262	100	On	71.437457	418.549888

GG Min Dynamic Pressure 1	Pa	0	100	On	0	0
GG Max Dynamic Pressure 1	Pa	4825.41	100	On	36.052229 6	74.760184 9
GG Min Velocity 1	m/s	0	0	Off	0	0
GG Max Velocity 1	m/s	88.2192	0	Off	0.3139408 16	0.6805769 84
GG Min X - Compo- nent of Velocity 1	m/s	-79.2217	100	On	0.5029603 59	0.9270938 14
GG Max X - Compo- nent of Velocity 1	m/s	63.2957	100	On	0.2610541 67	1.3880661 3

Min/Max Table

Name	Minimum	Maximum
Pressure [Pa]	96780.6	103355
Temperature [K]	290.296	294.245
Velocity [m/s]	0	86.5705
X – Component of Velocity [m/s]	-75.2831	58.266
Y – Component of Velocity [m/s]	-40.7772	60.2151
Z – Component of Velocity [m/s]	-81.9825	46.4859
Fluid Temperature [K]	290.296	294.245
Mach Number []	0	0.253521
Shear Stress [Pa]	0	105.301
Heat Transfer Coefficient [W/m ² /K]	0	0
Surface Heat Flux [W/m ²]	0	0
Density [kg/m ³]	1.15234	1.24005

Dados gerais das análises numéricas aplicando a malha 2

Initial Mesh Settings

Automatic initial mesh: Off

Basic Mesh Dimensions

Number of cells in X	182
Number of cells in Y	65
Number of cells in Z	62

Control Planes

Control planes in X direction

Name	Minimum	Maximum	Number of cells	Ratio
X1	-22.4	-8	30	3
X2	-8	-3.5	40	3
X3	-3.5	0.5	100	1
X4	0.5	1.5	10	0.333333
X5	1.5	2	2	1

Control planes in Y direction

Name	Minimum	Maximum	Number of cells	Ratio
Y1	0	1.5	40	1
Y2	1.5	3.5	15	0.333333
Y3	3.5	8	10	0.5

Control planes in Z direction

Name	Minimum	Maximum	Number of cells	Ratio
Z1	-0.12	1.5	40	1
Z2	1.5	3	15	0.333333
Z3	3	5	7	0.333333

Solid/Fluid Interface

Small solid features refinement level	2
Curvature refinement level	2
Curvature refinement criterion	0.0893270217
Tolerance refinement level	2
Tolerance refinement criterion	0.01 m

Refining cells

Refine fluid cells	Off
Refine partial cells	On
Level of refining partial cells	2
Refine solid cells	Off

Narrow Channels

Advanced narrow channel refinement	On
Characteristic number of cells across a narrow channel	10
Narrow channels refinement level	4
The minimum height of narrow channels	Off
The maximum height of narrow channels	Off

Análise sem refinamentos ao longo da simulação

General Info

Iterations: 267

CPU time: 24224 s

Number Of Cells

Total cells	1276184
Fluid cells	931906
Solid cells	164947
Partial cells	179331
Irregular cells	0
Trimmed cells	460

Goals

Name	Unit	Value	Progress	Use in convergence	Delta	Criteria
GG Av Static Pressure 1	Pa	101326	100	On	0.0176338086	0.0419030068
GG Av Total Pressure 1	Pa	102522	100	On	0.0416517017	0.139016279

GG Av	Pa	1191.09	100	On	0.0392623	0.1077366
Dynamic Pressure 1					204	31
GG Av	m/s	44.4802	0	Off	0.0007108	0.0018770
Velocity 1					68991	0306
GG Av X -	m/s	-44.4682	0	Off	0.0008269	0.0017140
Component of Velocity 1					05358	9256
GG Av Y -	m/s	0.10959	0	Off	0.0002963	0.0032379
Component of Velocity 1					6429	1773
GG Av Z -	m/s	0.147175	0	Off	0.0020922	0.0043738
Component of Velocity 1					5261	7063
GG Av	m	0.0112838	0	Off	0.0001086	3.7921137
Turbulent Length 1					03681	8e-005
GG X -	N	-278.313	100	On	1.1112851	25.073166
Component of Force 1					7	8
GG Y -	N	470.178	0	Off	2.4286566	23.985362
Component of Force 1					4	1

GG Z - N		200.256	100	On	2.8782203	17.857777
Component of Force 1					6	6
GG Min Static Pressure 1	Pa	98198	100	On	43.852569	624.84234
					4	2
GG Max Static Pressure 1	Pa	103825	100	On	9.4691156	462.94694
					2	5
GG Min Total Pressure 1	Pa	98198	100	On	43.852569	624.84234
					4	2
GG Max Total Pressure 1	Pa	105837	100	On	25.662252	458.70484
					9	2
GG Min Dynamic Pressure 1	Pa	0	100	On	0	0
GG Max Dynamic Pressure 1	Pa	4029.97	100	On	43.116122	57.474030
						9
GG Min Velocity 1	m/s	0	0	Off	0	0
GG Max Velocity 1	m/s	82.4661	0	Off	0.4295387	0.5533649
					84	31

GG Min X - Component of Velocity 1	m/s	-70.6676	100	On	0.0669020 552	0.7130274 75
GG Max X - Component of Velocity 1	m/s	47.3203	100	On	0.8958597 69	0.9271215 65

Min/Max Table

Name	Minimum	Maximum
Pressure [Pa]	98198	103825
Temperature [K]	290.794	294.222
Velocity [m/s]	0	80.5596
X – Component of Velocity [m/s]	-69.0476	44.6708
Y – Component of Velocity [m/s]	-38.3609	62.531
Z – Component of Velocity [m/s]	-65.278	44.2699
Fluid Temperature [K]	290.794	294.222
Mach Number []	0	0.235717
Shear Stress [Pa]	0	82.6794
Heat Transfer Coefficient [W/m ² /K]	0	0
Surface Heat Flux [W/m ²]	0	0
Density [kg/m ³]	1.16471	1.23595

Análise com refinamentos ao longo da simulação

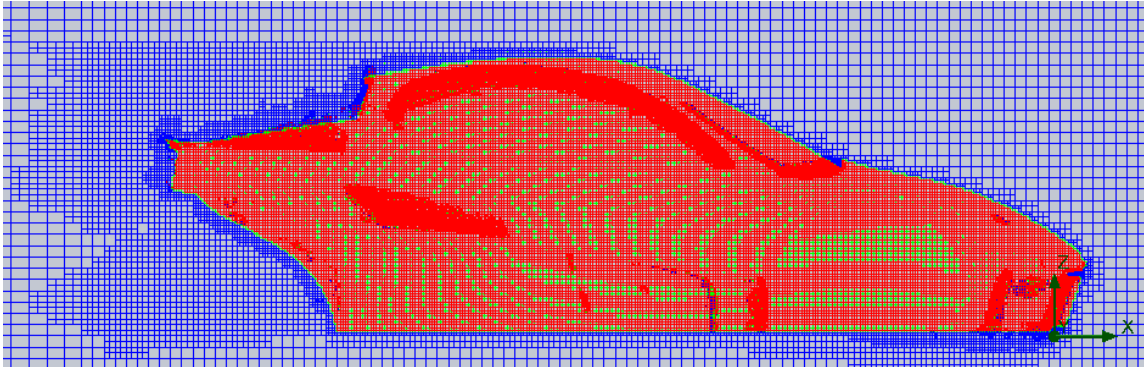


Figura 63 - Vista lateral da malha 2 com refinamentos ao longo da simulação obtida em Flow Simulation

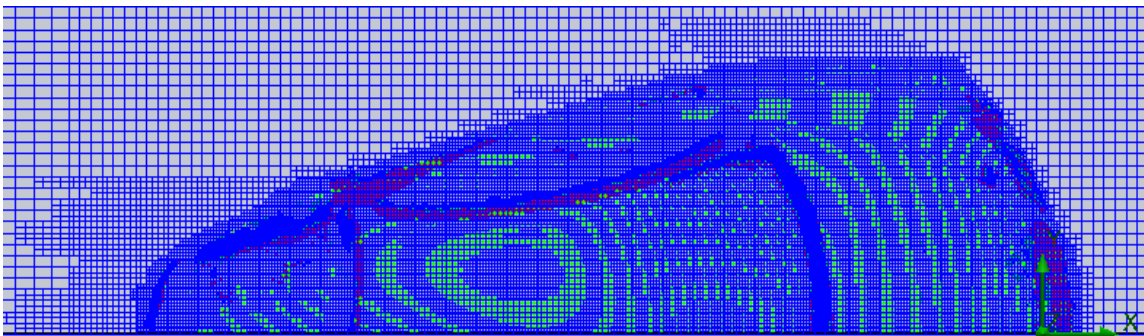


Figura 64 - Vista de topo da malha 2 com refinamentos ao longo da simulação obtida em Flow Simulation

General Info

Iterations: 341

CPU time: 40883 s

Solver Refinement

Refinement level	7
Refinement criterion	1.5
Unrefinement criterion	0.15
Adaptive refinement in fluid	On
Use global parameter variation	Off
Approximate maximum cells	2000000
Refinement strategy	Periodic
Units	Iterations
Relaxation interval	40
Periodic refinement options	Start: 100 Period: 50

Number Of Cells

Total cells	1500002
Fluid cells	1108568
Solid cells	189776
Partial cells	201658
Irregular cells	0
Trimmed cells	651

Goals

Name	Unit	Value	Progress	Use in convergence	Delta	Criteria
GG Av Static Pressure 1	Pa	101326	100	On	0.00879243028	0.041913149
GG Av Total Pressure 1	Pa	102522	100	On	0.0287555044	0.139035688
GG Av Dynamic Pressure 1	Pa	1191.19	100	On	0.02298675	0.107741451
GG Av Velocity 1	m/s	44.482	0	Off	0.000457345095	0.00187703147
GG Av X - Component of Velocity 1	m/s	-44.4703	0	Off	0.000629580162	0.0017141287
GG Av Y - Component of Velocity 1	m/s	0.109816	0	Off	0.000799109646	0.00323513983
GG Av Z - Component of Velocity 1	m/s	0.145675	0	Off	0.00201799873	0.00436499537

GG Av	m	0.0114034	0	Off	1.9506286 e-005	4.2391353 6e-005
Turbulent Length 1						
GG X -	N	-283.753	100	On	2.4045051 2	25.073434 1
Compo- nent of Force 1						
GG Y -	N	471.128	0	Off	3.2756952 9	23.987531 2
Compo- nent of Force 1						
GG Z -	N	231.63	100	On	1.6114553 6	17.854462 1
Compo- nent of Force 1						
GG Min	Pa	98205.2	100	On	34.813532 4	626.52810 9
Static Pressure 1						
GG Max	Pa	103411	100	On	62.807385 3	474.78824 9
Static Pressure 1						
GG Min	Pa	98205.2	100	On	34.813532 4	626.52810 9
Total Pressure 1						
GG Max	Pa	105291	100	On	208.40356	458.69275 7
Total Pressure 1						

GG Min Dynamic Pressure 1	Pa	0	100	On	0	0
GG Max Dynamic Pressure 1	Pa	4013.58	100	On	42.836517 9	57.973438 8
GG Min Velocity 1	m/s	0	0	Off	0	0
GG Max Velocity 1	m/s	82.2788	0	Off	0.4320991 36	0.5549331 39
GG Min X - Compo- nent of Velocity 1	m/s	-71.2425	100	On	0.2917180 36	0.7340319 53
GG Max X - Compo- nent of Velocity 1	m/s	45.2032	100	On	0.7147329 81	0.9264527 15

Min/Max Table

Name	Minimum	Maximum
Pressure [Pa]	98205.2	103411
Temperature [K]	290.809	294.214
Velocity [m/s]	0	80.751
X – Component of Velocity [m/s]	-68.7477	41.0854
Y – Component of Velocity [m/s]	-36.225	60.6793
Z – Component of Velocity [m/s]	-71.0628	43.6543
Fluid Temperature [K]	290.809	294.214
Mach Number []	0	0.236271
Shear Stress [Pa]	0	79.0792
Heat Transfer Coefficient [W/m ² /K]	0	0
Surface Heat Flux [W/m ²]	0	0
Density [kg/m ³]	1.16634	1.22895

Análise aplicando o método de discretização automático com refinamentos ao longo da simulação

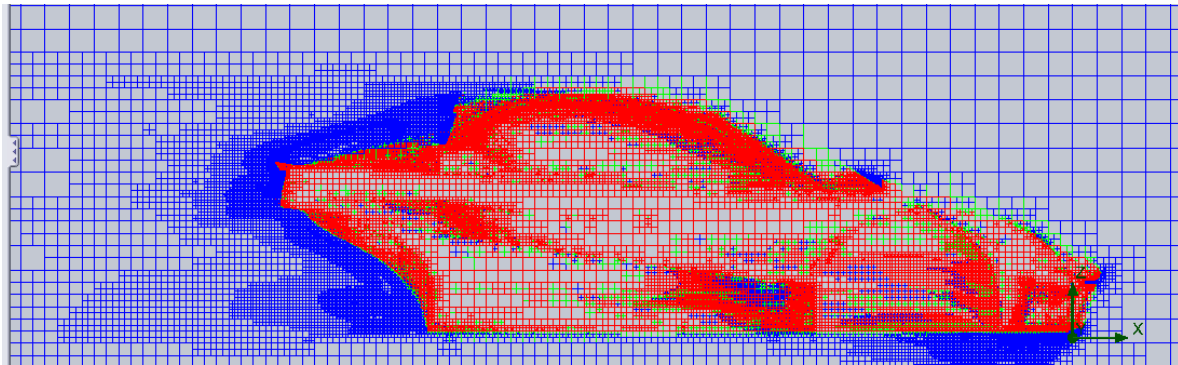


Figura 65 - Vista lateral da malha automática com refinamentos ao longo da simulação obtida em Flow Simulation

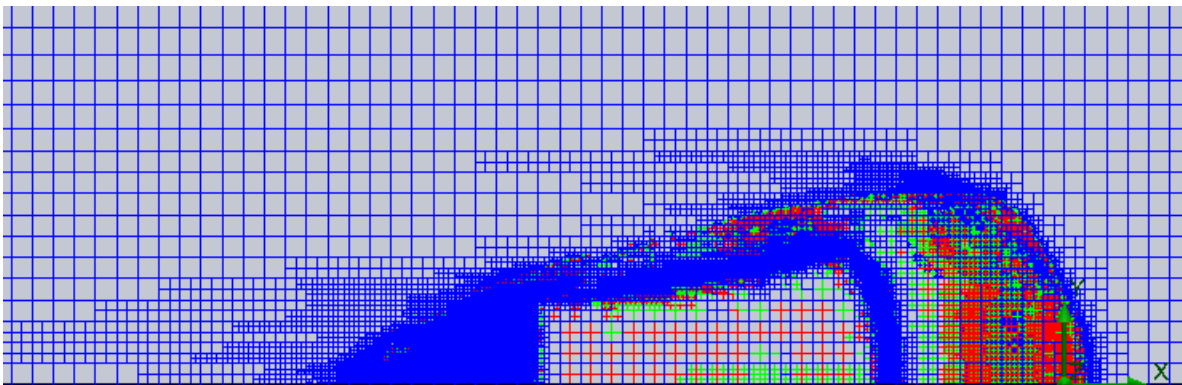


Figura 66 - Vista de topo da malha automática com refinamentos ao longo da simulação obtida em Flow Simulation

Initial Mesh Settings

Automatic initial mesh: On

Result resolution level: 8

Advanced narrow channel refinement: On

Refinement in solid region: Off

Geometry Resolution

Evaluation of minimum gap size: Automatic

Evaluation of minimum wall thickness: Automatic

Solver Refinement

Refinement level	7
Refinement criterion	1.5
Unrefinement criterion	0.15
Adaptive refinement in fluid	On
Use global parameter variation	Off
Approximate maximum cells	1500000
Refinement strategy	Periodic
Units	Iterations
Relaxation interval	40
Periodic refinement options	Start: 100 Period: 50

General Info

Iterations: 542

CPU time: 50200 s

Basic Mesh Dimensions

Number of cells in X	130
Number of cells in Y	41
Number of cells in Z	37

Number Of Cells

Total cells	1500001
Fluid cells	1177247
Solid cells	148940
Partial cells	173814
Irregular cells	0
Trimmed cells	1030

Goals

Name	Unit	Value	Progress	Use in convergence	Delta	Criteria
GG Av Static Pressure 1	Pa	101326	100	On	0.0033889203	0.0137299061
GG Av Total Pressure 1	Pa	102522	100	On	0.0157384269	0.0652109282
GG Av Dynamic Pressure 1	Pa	1191.18	100	On	0.0187050702	0.0524141353

GG Av Velocity 1	m/s	44.4822	0	Off	0.0003433 42679	0.0007799 57076
GG Av X - Component of Velocity 1	m/s	-44.4723	0	Off	0.0005907 4628	0.0005877 51204
GG Av Y - Component of Velocity 1	m/s	0.100392	0	Off	0.0013004 3234	0.0024565 5527
GG Av Z - Component of Velocity 1	m/s	0.129809	0	Off	0.0016336 9264	0.0033039 3448
GG Av Turbulent Length 1	m	0.0109548	0	Off	2.3377292 8e-005	3.0055742 4e-005
GG X - Component of Force 1	N	-287.59	100	On	0.4599641 97	11.068231 4

GG Y - N		456.415	0	Off	2.0113465	3.4224946
Component of Force 1					8	9
GG Z - N		207.273	100	On	2.2127995	5.3777867
Component of Force 1					9	8
GG Min	Pa	97543.1	100	On	39.529161	222.76366
Static Pressure 1						4
GG Max	Pa	102975	100	On	27.381859	196.04063
Static Pressure 1					9	3
GG Min	Pa	97543.1	100	On	39.529161	222.76366
Total Pressure 1						4
GG Max	Pa	104801	100	On	188.10502	212.80172
Total Pressure 1					2	4
GG Min	Pa	0	100	On	0	0
Dynamic Pressure 1						
GG Max	Pa	4474.54	100	On	20.176723	35.325881
Dynamic Pressure 1					7	7
GG Min	m/s	0	0	Off	0	0
Velocity 1						

GG Max Velocity 1	m/s	87.1328	0	Off	0.186626109	0.387688484
GG Min X - Component of Velocity 1	m/s	-77.3343	100	On	0.272414972	0.280533537
GG Max X - Component of Velocity 1	m/s	47.6029	100	On	0.680172054	1.01317964

Min/Max Table

Name	Minimum	Maximum
Pressure [Pa]	97543.1	102975
Temperature [K]	290.4	294.246
Velocity [m/s]	0	85.7773
X – Component of Velocity [m/s]	-76.7261	45.4676
Y – Component of Velocity [m/s]	-38.602	59.4714
Z – Component of Velocity [m/s]	-69.4289	51.6657
Fluid Temperature [K]	290.4	294.246
Mach Number []	0	0.251136
Shear Stress [Pa]	0	89.0953
Heat Transfer Coefficient [W/m ² /K]	0	0
Surface Heat Flux [W/m ²]	0	0
Density [kg/m ³]	1.15665	1.2238

**ANEXO D – DADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA DO MODELO
SEM SPOILER**

O pré-processamento realizado na análise do modelo sem spoiler traseiro é idêntico ao aplicado no modelo com spoiler, as variações que ocorrem na discretização do domínio computacional são unicamente devido às diferenças entre os modelos CAD. Neste sentido e tendo em conta que a análise do modelo sem spoiler apenas foi realizada para comparar as implicações da introdução de um spoiler, neste anexo apenas serão apresentados os resultados da discretização e da análise da malha 1 sem refinamentos ao longo da simulação utilizada no estudo comparativo.

General Info

Iterations: 574

CPU time: 30520 s

Number Of Cells

Total cells	1506729
Fluid cells	1195931
Solid cells	162200
Partial cells	148598
Irregular cells	0
Trimmed cells	153

Goals

Name	Unit	Value	Progress	Use in convergence	Delta	Criteria
GG Av Static Pressure 1	Pa	101325	100	On	0.129902733	16.9116447
GG Av Total Pressure 1	Pa	102517	100	On	0.192255074	16.7495594
GG Av Dynamic Pressure 1	Pa	1186.57	100	On	0.0659872654	0.173904698
GG Av Velocity 1	m/s	44.3997	0	Off	0.000717009529	0.00645008389
GG Av X - Component of Velocity 1	m/s	-44.394	100	On	0.000262015292	0.00648794695
GG Av Y - Component of Velocity 1	m/s	0.00762332	0	Off	0.000706857652	0.000564483483
GG Av Turbulent Length 1	m	0.0100806	0	Off	5.17842258e-005	2.53095712e-006

GG X - N Component of Force 1	-304.778	100	On	14.236098	3674.9917 2
GG Y - N Component of Force 1	520.093	0	Off	11.988095 8	357.34618 2
GG Z - N Component of Force 1	310.229	100	On	71.653935 2	5368.6184 9
GG Av Z - m/s Component of Velocity 1	0.0099727 4	0	Off	0.0009358 42368	0.0002435 28988

Min/Max Table

Name	Minimum	Maximum
Pressure [Pa]	96321.9	102565
Temperature [K]	288.357	294.31
Velocity [m/s]	0	102.009
X – Component of Velocity [m/s]	-78.6119	40.1515
Y – Component of Velocity [m/s]	-57.5674	82.8432
Z – Component of Velocity [m/s]	-53.0963	39.3168
Fluid Temperature [K]	288.357	294.31
Mach Number []	0	0.299735
Shear Stress [Pa]	0	46.0684
Heat Transfer Coefficient [W/m ² /K]	0	0
Surface Heat Flux [W/m ²]	0	0
Density [kg/m ³]	1.15266	1.21583

ANEXO E – DADOS DAS ANÁLISES NUMÉRICAS DO MODELO À ESCALA

Dados gerais das análises numéricas

System Info

Product	Flow Simulation 2010 0.0. Build: 1063
Computer name	INGO-PC
User name	ingo
Processors	Intel(R) Core(TM)2 Quad CPU Q6700 @ 2.66GHz
Memory	4094 MB / 8388607 MB
Operating system	(Build 7600)
CAD version	SolidWorks 2010 SP0
CPU speed	2667 MHz

General Info

Units system	SI (m-kg-s)
Analysis type	External (exclude internal spaces)
Exclude cavities without flow conditions	On
Coordinate system	Global coordinate system
Reference axis	X

Initial Mesh Settings

Automatic initial mesh: On

Result resolution level: 8

Advanced narrow channel refinement: On

Refinement in solid region: Off

Geometry Resolution

Evaluation of minimum gap size: Automatic

Evaluation of minimum wall thickness: Automatic

Computational Domain

X min	-4.48 m
X max	0.4 m
Y min	-1.6 m
Y max	1.6 m
Z min	-0.0005 m
Z max	1 m

Boundary Conditions

2D plane flow	None
At X min	Default
At X max	Default
At Y min	Default
At Y max	Default
At Z min	Default
At Z max	Default

Physical Features

Heat conduction in solids: Off

Time dependent: Off

Gravitational effects: Off

Flow type: Laminar and turbulent

High Mach number flow: Off

Humidity: Off

Default roughness: 0 micrometer

Default wall conditions: Adiabatic wall

Material Settings

Fluids: Air

Calculation Control Options

Refinement level	7
Refinement criterion	1.5
Unrefinement criterion	0.15
Adaptive refinement in fluid	On
Use global parameter variation	Off
Approximate maximum cells	1500000
Refinement strategy	Periodic
Units	Iterations
Relaxation interval	40
Periodic refinement options	Start: 100 Period: 50

Simulação com uma velocidade $5V_p$

Ambient Conditions

Thermodynamic parameters	Static Pressure: 101325 Pa Temperature: 293.2 K
Velocity parameters	Velocity vector Velocity in X direction: -222 m/s Velocity in Y direction: 0 m/s Velocity in Z direction: 0 m/s
Turbulence parameters	Turbulence intensity and length Intensity: 0.1 % Length: 0.01 m

General Info

Iterations: 191

CPU time: 8512 s

Basic Mesh Dimensions

Number of cells in X	145
Number of cells in Y	96
Number of cells in Z	42

Number Of Cells

Total cells	988547
Fluid cells	891577
Solid cells	42292
Partial cells	54678
Irregular cells	0
Trimmed cells	114

Goals

Name	Unit	Value	Progress	Use in convergence	Delta	Criteria
GG Normal Force 1	N	818.689	0	Off	50.179642 2	176.38157 5
GG X - Component of Normal Force 1	N	-588.336	0	Off	9.1726912 8	117.80985 8
GG Y - Component of Normal Force 1	N	-2.23526	0	Off	1.5884412 9	0.2177110 29

GG Z - N Component of Normal Force 1		569.305	0	Off	66.083975 2	178.06996 6
GG Force 1	N	847.174	0	Off	49.904399 4	176.37952 3
GG X - N Component of Force 1		-623.116	100	On	9.9386622 1	118.16876
GG Y - N Component of Force 1		-2.22898	0	Off	1.4816048 6	0.2162997 36
GG Z - N Component of Force 1		573.956	100	On	65.966741 6	178.09509 9
GG X - N*m Component of Torque 1		-0.289929	0	Off	0.3125082 25	0.1925557 49
GG Y - N*m Component of Torque 1		190.305	0	Off	25.143125 9	44.084340 3

GG Z - Compo- nent of Torque 1	N*m	0.8734	0	Off	0.8228636 92	0.1643284 59
---	-----	--------	---	-----	-----------------	-----------------

Min/Max Table

Name	Minimum	Maximum
Pressure [Pa]	25327	139324
Temperature [K]	224.651	321.495
Velocity [m/s]	0	439.512
X – Component of Velocity [m/s]	-399.632	132.713
Y – Component of Velocity [m/s]	-299.725	299.182
Z – Component of Velocity [m/s]	-235.254	187.844
Fluid Temperature [K]	224.651	321.495
Mach Number []	0	1.44225
Shear Stress [Pa]	0	670.536
Heat Transfer Coefficient [W/m ² /K]	0	0
Surface Heat Flux [W/m ²]	0	0
Density [kg/m ³]	0.361826	1.54825

Simulação com uma pressurização $5P_p$

Ambient Conditions

Thermodynamic parameters	Static Pressure: 506625 Pa Temperature: 293.2 K
Velocity parameters	Velocity vector Velocity in X direction: -44.4 m/s Velocity in Y direction: 0 m/s Velocity in Z direction: 0 m/s
Turbulence parameters	Turbulence intensity and length Intensity: 0.1 % Length: 0.01 m

General Info

Iterations: 341

CPU time: 26365 s

Basic Mesh Dimensions

Number of cells in X	145
Number of cells in Y	96
Number of cells in Z	42

Number Of Cells

Total cells	1500002
Fluid cells	1250795
Solid cells	120774
Partial cells	128433
Irregular cells	0
Trimmed cells	198

Goals

Name	Unit	Value	Progress	Use in convergence	Delta	Criteria
GG Normal Force 1	N	153.109	0	Off	1.73166248	3.85750993
GG X - Component of Normal Force 1	N	-103.295	0	Off	1.09922875	5.01724037
GG Y - Component of Normal Force 1	N	-0.813662	0	Off	2.22523481	0.132998192

GG Z - N	113.013	0	Off	2.5834056	2.7339361
Component of Normal Force 1				2	7
GG Force 1	159.264	0	Off	1.6055842	3.9864715
				8	3
GG X - N	-111.32	100	On	1.1228466	5.1017156
Component of Force 1				1	5
GG Y - N	-0.777031	0	Off	2.1855054	0.1309774
Component of Force 1				5	86
GG Z - N	113.896	100	On	2.5484207	2.7370724
Component of Force 1				9	4
GG X - N*m	0.0778199	0	Off	0.2731987	0.0193260
Component of Torque 1				37	408

GG Y - Compo- nent of Torque 1	N*m	35.1219	0	Off	0.6072459 16	0.5429362 1
GG Z - Compo- nent of Torque 1	N*m	0.320753	0	Off	0.9523967 07	0.0587608 072

Min/Max Table

Name	Minimum	Maximum
Pressure [Pa]	479296	513180
Temperature [K]	288.427	294.391
Velocity [m/s]	0	104.986
X – Component of Velocity [m/s]	-76.3644	33.0618
Y – Component of Velocity [m/s]	-84.8101	82.5916
Z – Component of Velocity [m/s]	-56.1963	43.9803
Fluid Temperature [K]	288.427	294.391
Mach Number []	0	0.308417
Shear Stress [Pa]	0	259.179
Heat Transfer Coefficient [W/m ² /K]	0	0
Surface Heat Flux [W/m ²]	0	0
Density [kg/m ³]	5.75326	6.08385

Simulação do ensaio de túnel de vento

Ambient Conditions

Thermodynamic parameters	Static Pressure: 101325 Pa Temperature: 302.95 K
Velocity parameters	Velocity vector Velocity in X direction: -45.3 m/s Velocity in Y direction: 0 m/s Velocity in Z direction: 0 m/s
Turbulence parameters	Turbulence intensity and length Intensity: 0.1 % Length: 0.01 m

General Info

Iterations: 591

CPU time: 60745 s

Basic Mesh Dimensions

Number of cells in X	150
Number of cells in Y	122
Number of cells in Z	42

Number Of Cells

Total cells	1500002
Fluid cells	1272233
Solid cells	111248
Partial cells	116521
Irregular cells	0
Trimmed cells	185

Goals

Name	Unit	Value	Progress	Use in convergence	Delta	Criteria
GG Normal Force 1	N	31.2817	0	Off	0.0467122 252	0.8211793 89
GG X - Component of Normal Force 1	N	-21.3063	0	Off	0.0282520 299	1.0426159
GG Y - Component of Normal Force 1	N	-0.017272	0	Off	0.0273043 961	0.0349398 314

GG Z - N Compo- nent of Normal Force 1		22.9038	0	Off	0.0441436 208	0.5087600 25
GG Force 1	N	32.5571	100	On	0.0465965 502	0.8524423 77
GG X - N Compo- nent of Force 1		-22.986	100	On	0.0288754 454	1.0671052 9
GG Y - N Compo- nent of Force 1		-0.026077	100	On	0.0270750 182	0.0348150 016
GG Z - N Compo- nent of Force 1		23.0566	100	On	0.0433816 06	0.5089046 47
GG X - N*m Compo- nent of Torque 1		- 0.0472248	12.5	Off	0.0031406 9647	0.0039175 8761

GG Y -	N*m	7.24393	100	Off	0.0131624 8	0.1124822 36
Component of Torque 1						
GG Z -	N*m	- 0.0998887	8.8	Off	0.0178441 808	0.0110613 395
Component of Torque 1						

Min/Max Table

Name	Minimum	Maximum
Pressure [Pa]	96515	102669
Temperature [K]	299.413	306.793
Velocity [m/s]	0	92.248
X – Component of Velocity [m/s]	-70.9611	33.2951
Y – Component of Velocity [m/s]	-71.7617	74.5732
Z – Component of Velocity [m/s]	-57.5201	51.5616
Fluid Temperature [K]	299.413	306.793
Mach Number []	0	0.266023
Shear Stress [Pa]	0	65.3757
Heat Transfer Coefficient [W/m ² /K]	0	0
Surface Heat Flux [W/m ²]	0	0
Density [kg/m ³]	1.11812	1.18254

**ANEXO F – RESULTADOS DO ENSAIO EM TUNEL DE
VENTO**

**(facultados pela VE- Fabricação de Veículos de Tracção
Eléctrica, Lda.)**

Ensaio com uma velocidade de escoamento de 59.9 m/s

no.	time	Beta	Alpha	speed	q	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	1923	-31,5	20	72	232,8	-24,9	-54,45	-1,31	-0,18	0,01	2,13
2	1932	-31,5	20	72	232,8	-24,84	-54,43	-1,39	-0,18	0	2,12
3	1940	-31,5	20	72	232,8	-24,92	-54,08	-1,33	-0,19	0,01	2,27
4	1945	-31,5	20	72	232,8	-24,94	-53,96	-1,33	-0,19	0,01	2,29
5	1950	-31,5	20	72	232,8	-24,91	-54,34	-1,39	-0,19	0,01	2,17
6	1955	-31,5	20	72	232,8	-24,87	-54,32	-1,35	-0,2	0,01	2,16
7	1960	-31,5	20	72	232,8	-24,85	-54,42	-1,32	-0,19	0,01	2,12
8	1966	-31,5	20	72	232,8	-24,91	-54,37	-1,25	-0,19	0,01	2,17

Ensaio com uma velocidade de escoamento de 55.56 m/s

no.	time	Beta	Alpha	speed	q	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	1704	-31,5	20	72	232,8	-21,46	-44,45	-0,92	-0,2	0,03	2,58
2	1711	-31,5	20	72	232,8	-21,47	-44,53	-0,91	-0,2	0,03	2,59
3	1724	-31,5	20	72	232,8	-21,51	-44,61	-0,94	-0,2	0,02	2,58
4	1734	-31,5	20	72	232,8	-21,43	-44,46	-0,89	-0,2	0,03	2,59
5	1740	-31,5	20	72	232,8	-21,44	-44,47	-0,89	-0,2	0,03	2,6
6	1747	-31,5	20	72	232,8	-21,43	-44,42	-0,92	-0,19	0,02	2,59
7	1752	-31,5	20	72	232,8	-21,36	-44,27	-0,88	-0,19	0,03	2,58
8	1759	-31,5	20	72	232,8	-21,39	-44,32	-0,84	-0,2	0,03	2,59

Ensaio com uma velocidade de escoamento de 51.5 m/s

no.	time	Beta	Alpha	speed	q	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	1605	-31,5	20	72	232,8	-18,28	-38,25	-0,85	-0,16	0,02	2,1
2	1614	-31,5	20	72	232,8	-18,27	-38,25	-0,97	-0,16	0,02	2,1
3	1621	-31,5	20	72	232,8	-18,19	-38,17	-0,94	-0,15	0,02	2,09
4	1627	-31,5	20	72	232,8	-18,2	-38,24	-0,94	-0,16	0,02	2,09
5	1632	-31,5	20	72	232,8	-18,22	-38,32	-0,85	-0,16	0,02	2,09
6	1638	-31,5	20	72	232,8	-18,25	-38,35	-0,84	-0,16	0,02	2,09
7	1644	-31,5	20	72	232,8	-18,23	-38,35	-0,85	-0,16	0,02	2,1
8	1649	-31,5	20	72	232,8	-18,23	-38,35	-0,84	-0,16	0,01	2,09

Ensaio com uma velocidade de escoamento de 45.3 m/s

no.	time	Beta	Alpha	speed	q	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	1468	-31,5	20	72	232,8	-14,18	-30,43	-0,85	-0,11	0,01	1,52
2	1477	-31,5	20	72	232,8	-14,18	-30,52	-0,82	-0,12	0,01	1,51
3	1487	-31,5	20	72	232,8	-14,21	-30,57	-0,87	-0,11	0,01	1,51
4	1495	-31,5	20	72	232,8	-14,21	-30,51	-0,81	-0,12	0,01	1,51
5	1501	-31,5	20	72	232,8	-14,19	-30,51	-0,83	-0,12	0,01	1,51
6	1507	-31,5	20	72	232,8	-14,15	-30,46	-0,75	-0,12	0,01	1,52
7	1514	-31,5	20	72	232,8	-14,16	-30,43	-0,75	-0,12	0,01	1,52
8	1520	-31,5	20	72	232,8	-14,17	-30,48	-0,76	-0,12	0,01	1,52

Ensaio com uma velocidade de escoamento de 41.65 m/s

no.	time	Beta	Alpha	speed	q	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	1308	-31,5	20	72	232,8	-11,86	-26,21	-0,61	-0,09	0	1,19
2	1321	-31,5	20	72	232,8	-11,88	-26,24	-0,65	-0,09	0	1,2
3	1335	-31,5	20	72	232,8	-11,87	-26,32	-0,63	-0,09	0	1,18
4	1350	-31,5	20	72	232,8	-11,85	-26,17	-0,65	-0,09	0	1,19
5	1360	-31,5	20	72	232,8	-11,86	-26,23	-0,64	-0,09	0	1,19
6	1368	-31,5	20	72	232,8	-11,84	-26,19	-0,63	-0,09	0	1,2
7	1376	-31,5	20	72	232,8	-11,89	-26,27	-0,64	-0,1	0	1,19
8	1383	-31,5	20	72	232,8	-11,88	-26,33	-0,63	-0,1	0	1,19

Ensaio com uma velocidade de escoamento de 36.7 m/s

no.	time	Beta	Alpha	speed	q	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	1134	-31,5	20	72	232,8	-9,24	-20,72	-0,5	-0,06	0	0,88
2	1143	-31,5	20	72	232,8	-9,24	-20,64	-0,46	-0,07	0	0,87
3	1150	-31,5	20	72	232,8	-9,26	-20,74	-0,52	-0,07	0	0,88
4	1158	-31,5	20	72	232,8	-9,25	-20,73	-0,5	-0,07	0	0,88
5	1168	-31,5	20	72	232,8	-9,26	-20,75	-0,49	-0,07	0	0,87
6	1177	-31,5	20	72	232,8	-9,26	-20,79	-0,5	-0,08	0	0,87
7	1186	-31,5	20	72	232,8	-9,25	-20,84	-0,52	-0,08	0	0,88
8	1192	-31,5	20	72	232,8	-9,26	-20,81	-0,49	-0,08	-0,01	0,88

Ensaio com uma velocidade de escoamento de 19.9 m/s

no.	time	Beta	Alpha	speed	q	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	720	-31,5	20	72	232,8	-2,72	-6,3	-0,13	-0,02	-0,01	0,23
2	733	-31,5	20	72	232,8	-2,73	-6,34	-0,12	-0,03	-0,01	0,23
3	746	-31,5	20	72	232,8	-2,73	-6,36	-0,12	-0,03	-0,01	0,23
4	760	-31,5	20	72	232,8	-2,72	-6,37	-0,12	-0,03	-0,01	0,23
5	774	-31,5	20	72	232,8	-2,73	-6,37	-0,14	-0,03	-0,01	0,23
6	789	-31,5	20	72	232,8	-2,72	-6,33	-0,15	-0,03	0	0,23

Ensaio com uma velocidade de escoamento de 13.9 m/s

no.	time	Beta	Alpha	speed	q	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	253	-31,5	20	72	232,8	-1,38	-3,09	-0,07	-0,01	0	0,09
2	301	-31,5	20	72	232,8	-1,37	-3,11	-0,08	-0,01	0	0,09
3	321	-31,5	20	72	232,8	-1,38	-3,14	-0,07	-0,01	0	0,09
4	347	-31,5	20	72	232,8	-1,36	-3,14	-0,07	-0,01	0	0,1
5	394	-31,5	20	72	232,8	-1,35	-3,15	-0,06	-0,01	0	0,1
6	431	-31,5	20	72	232,8	-1,35	-3,16	-0,05	-0,01	-0,01	0,11

**ANEXO G – MODELO NUMÉRICO UTILIZADO PELO
SOFTWARE FLOW SIMULATION**

De acordo com (SolidWorks Flow Simulation, 2010), o Flow Simulation da CosmosFlowworks utiliza as leis de conservação de massa, quantidade de movimento e energia conhecidas como as equações de Navier-Stokes, para a resolução de problemas associados à mecânica dos fluidos. Estas equações são suplementadas por equações que definem a natureza do fluido (equações de estado) através de dependências empíricas da densidade, condutividade térmica e viscosidade de fluidos.

O Flow Simulation aplica um sistema de equações para descrever escoamentos laminares e turbulentos, o que permite a transição do estado de escoamento laminar para turbulento e vice-versa.

Para a resolução de problemas de escoamentos turbulentos, como é o caso da simulação de escoamentos em torno de um automóvel, o Flow Simulation utilizadas as “*Favre-averaged Navier-Stokes equations*”, nas quais são considerados os efeitos da turbulência sobre os parâmetros do escoamento em termos de média no tempo. A aplicação deste método implica o surgimento de termos adicionais nas equações, conhecidos por tensões de Reynolds. Para a resolução deste sistema de equações o Flow Simulation utiliza as equações de transporte para a energia cinética turbulenta e a sua taxa de dissipação, actualmente bastante utilizadas na resolução de problemas da área da mecânica dos fluidos computacional, conhecido por modelo de turbulência κ - ϵ .