

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

FELIPPE DE MARCO
MARCUS VINICIUS PINHEIRO DA SILVA

DESENVOLVIMENTO AERODINÂMICO DE UM CARRO DE
FÓRMULA SAE ELÉTRICO

TCC

PONTA GROSSA

2018

FELIPPE DE MARCO
MARCUS VINICIUS PINHEIRO DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO AERODINÂMICO DE UM CARRO DE
FÓRMULA SAE ELÉTRICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre de Castro Alves

Co-orientador: Prof. Me. José Roberto Okida

PONTA GROSSA

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

DESENVOLVIMENTO AERODINÂMICO DE UM CARRO FÓRMULA SAE ELÉTRICO

por

FELIPPE DE MARCO E MARCUS VINICIUS PINHEIRO DA SILVA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 6 de dezembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Alexandre de Castro Alves
Orientador

Prof. Me. Francisco Emilio Dusi
Membro Titular

Prof. Me. Rodrigo Villaca Santos
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho
Coordenador do Curso

AGRADECIMENTOS

À equipe UTForce e-Racing pelo desafio e confiança, mais especificamente aos membros das áreas de aerodinâmica e materiais: Johnson Ruo Ting Hung, Vinicius Borges e Marcelo Sena. Além deles, agradecemos a orientação do trabalho aos professores José Roberto Okida e Alexandre de Castro Alves.

Eu não entendia como aquilo se movia com força própria. Quando passou por mim, sem nem mesmo pensar, eu me vi perseguindo aquela máquina tão rápido quanto eu pudesse correr. (HONDA, Soichiro)

RESUMO

DE MARCO, Felipe; PINHEIRO DA SILVA, Marcus Vinicius. **Desenvolvimento Aerodinâmico de um Carro de Fórmula SAE Elétrico**. 2018. 66f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

Diante de um cenário de competição automobilística estudantil, se faz necessário um estudo aprofundado na melhoria de performance do carro de Fórmula SAE elétrico da equipe UTForce e-Racing. Este estudo concentra-se no desenvolvimento aerodinâmico do carro, englobando 3 fatores importantes: restrição do arrasto sofrido pelo carro, determinação da força de sustentação negativa (*downforce*) atuante no veículo e arrefecimento de seus componentes elétricos. A partir disso, o trabalho reúne o desenvolvimento de 4 modelos de projeto: o bico da carenagem, um difusor aerodinâmico e um conjunto de arrefecimento tanto para o inversor de frequência quanto para motor do carro. Dessa forma, o estudo contém as equações governantes dos cálculos de projeto, a modelagem de cada projeto de acordo com seus objetivos específicos e suas simulações fluidodinâmicas computacionais. Sendo assim, os resultados das simulações indicam os parâmetros esperados e orientam, de forma confiável, as fases posteriores do projeto.

Palavras-chave: Aerodinâmica. Fórmula SAE. Carro elétrico. UTForce e-Racing. Performance.

ABSTRACT

DE MARCO, Felipe; PINHEIRO DA SILVA, Marcus Vinicius. **Aerodynamic Development of a Formula SAE Electric Car**. 2018. 66f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2018.

According to an automobilist student competition scenario, it is necessary a depth approach in order to increase performance of a Formula SAE electric car from the UTForce e-Racing team. The focus of this study is the aerodynamic development of the car, including 3 important parts: restriction of the drag force on the car, determination of the downforce acting on the vehicle and cooling of electrical components. On this scenario, this work presents the development of 4 design projects: a nose cone, an undertray and a cooling system of a frequency inverter and an electric motor. This study contains the equations for each physic parameter of project, the computational modeling design and the fluid dynamics simulations. Therefore, the simulations results indicate the expected parameters and conduct the project reliably to the next phases.

Keywords: Aerodynamics. Formula SAE. Electric car. UTForce e-Racing. Performance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Classificação Geral da 14ª Competição Fórmula SAE Brasil Elétrico 2017.	15
Figura 2: Carro Force 1 da equipe UTForce <i>e-Racing</i>	16
Figura 3: Linhas de correntes em um túnel de vento.	19
Figura 4: Valores de coeficiente de arrasto aerodinâmico.	20
Figura 5: Esquema da variação de pressão em um aerofólio.	22
Figura 6: Asas de um carro de fórmula SAE.	23
Figura 7: Representação do fluxo de ar no efeito solo de um carro de fórmula 1.	24
Figura 8: Difusor aerodinâmico da equipe Brawn de Fórmula 1.	25
Figura 9: Esquema de funcionamento do difusor aerodinâmico.	26
Figura 10: Desenho de uma aleta retangular.	30
Figura 11: Caminho de soluções estruturais.	33
Figura 12: Estrutura cúbica em volume finito.	34
Figura 13: Disposição da lei da conservação de massa para o cubo estrutural.	35
Figura 14: Disposição das tensões viscosas em todas direções do cubo.	36
Figura 15: Disposição para conservação de energia em uma estrutura cúbica.	37
Figura 16: Projeto bico da carenagem.	43
Figura 17: Projeto difusor em vista isométrica.	43
Figura 18: Vista da parte traseira do difusor aerodinâmico.	44
Figura 19: Projeto placa aletada.	46
Figura 20: Projeto da carenagem traseira.	47
Figura 21: Montagem do carro com a carenagem traseira em vista lateral.	47
Figura 22: Montagem do carro com a carenagem.	48
Figura 23: Projeto de serpentina acoplada ao motor.	49
Figura 24: Montagem da estrutura de arrefecimento e motor elétrico.	49
Figura 25: Vista em corte das serpentinas de arrefecimento.	50
Figura 26: Resultado simulação bico da carenagem.	52
Figura 27: Vetores representativos dos gradientes de pressão sobre o bico.	52
Figura 28: Representação da variação de pressão no difusor aerodinâmico.	54
Figura 29: Pressões envolvidas no difusor aerodinâmico.	54
Figura 30: Variação de velocidade do fluxo de ar em baixo do difusor aerodinâmico.	55
Figura 31: Resultado simulação placa aletada.	56
Figura 32: Resultado simulação radiador.	58
Figura 33: Tabela de correlação para transferência de calor com fluxo externo.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Modelos do projeto aerodinâmico.	39
Tabela 2: Cálculo de dimensionamento das aletas.	45
Tabela 3: Parâmetros de simulação bico da carenagem.	51
Tabela 4: Parâmetros de simulação do difusor aerodinâmico.	53
Tabela 5: Parâmetros de simulação placa aletada.	56
Tabela 6: Parâmetros de simulação radiador.	57

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras latinas

A	Área de referência do corpo	[m ²]
A _a	Área total da aleta	[m ²]
A _b	Área da base da aleta	[m ²]
A _r	Área da aleta de seção retangular	[m ²]
A _s	Área da seção transversal do corpo	[m ²]
B	Constante de proporcionalidade	[N/(m/s) ²]
C _D	Coefficiente de arrasto	[-]
C _L	Coefficiente de sustentação	[-]
C _p	Calor específico do fluido	[J/KgK]
e	Espessura da aleta	[m]
F	Força de resistência dos fluidos	[N]
F _D	Força de arrasto	[N]
F _L	Força de sustentação	[N]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
h	Coefficiente convectivo	[W/m ² K]
k	Condutividade térmica do material	[W/mK]
L	Comprimento da superfície	[m]
L _c	Comprimento corrido da aleta	[m]
L _s	Comprimento da seção transversal da aleta	[m]
m	Índice solução transferência de calor convectiva	[-]
N	Constante dependente do fluido e do corpo	[-]
N _u	Número de Nusselt	[-]
P	Perímetro molhado da aleta	[m]
p	Pressão	[Pa]
q _A	Transferência de calor real da aleta	[W]
q _{aleta}	Transferência de calor da aleta	[W]
q _h	Transferência de calor convectivo	[W]
q _x	Transferência de calor na direção x	[W]
Re _L	Número de Reynolds	[-]

S_E	Somatório de energia potencial	[J]
S_{M_x}	Momento em x	[ms]
t	Tempo	[s]
T_∞	Temperatura do fluido arrefecido	[K]
T_b	Temperatura da base da aleta	[K]
T_s	Temperatura superficial do corpo	[K]
V	Velocidade do fluido	[m/s]
V_e	Velocidade de escoamento	[m/s]
v_x	Componente de velocidade na coordenada x	[m/s]
v_y	Componente de velocidade na coordenada y	[m/s]
v_z	Componente de velocidade na coordenada z	[m/s]
w	Comprimento da aleta	[m]
z	Altura do corpo em relação ao corpo	[m]

LETRAS GREGAS

ν	Viscosidade cinemática do fluido	[m ² /s]
α	Difusividade térmica do fluido	[m ² /s]
δ_x	Comprimento do cubo infinitesimal em x	[m]
δ_y	Comprimento do cubo infinitesimal em y	[m]
δ_z	Comprimento do cubo infinitesimal em z	[m]
ϵ	Método da efetividade das aletas	[-]
η_a	Eficiência eficiência de aletas	[-]
θ	Variação de temperatura	[K]
θ_b	Variação de temperatura da base da aleta	[K]
μ	Viscosidade absoluta do fluido	[Ns/m ²]
ρ	Massa específica de fluido	[kg/m ³]
ρ_{ar}	Massa específica do ar	[kg/m ³]
τ_{xx}	Componente de tensão viscosa na direção xx	[Pa]
τ_{yx}	Componente de tensão viscosa na direção yx	[Pa]
τ_{zx}	Componente de tensão viscosa na direção zx	[Pa]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO GERAL	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 FÓRMULA SAE BRASIL.....	15
2.2 UTFORCE <i>E-RACING</i>	16
2.3 AERODINÂMICA VEICULAR	17
2.3.1 Arrasto	17
2.3.2 Sustentação Negativa (<i>Downforce</i>)	20
2.3.2.1 Aerofólios	21
2.3.2.2 Efeito solo	23
2.4 ARREFECIMENTO AERODINÂMICO	26
2.4.1 Determinação do Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção	27
2.4.1.1 Número de Reynolds	27
2.4.1.2 Número de Prandtl	28
2.4.1.3 Número de Nusselt	28
2.4.2 Aletas	29
2.4.2.1 Eficiência da aleta	29
2.4.2.2 Efetividade da aleta.....	29
2.5 ELEMENTOS FINITOS E FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)	32
2.5.1 Equações Dominantes para Volumes Finitos	34
2.5.1.1 Equação da conservação de massa	35
2.5.1.2 Equação da conservação da quantidade de movimento.....	36
2.5.1.3 Equação da conservação de energia.....	37
3 METODOLOGIA	38
3.1 MODELAGEM.....	38
3.2 SIMULAÇÃO	39
3.2.1 Geração da Malha	40
3.2.2 Parâmetros da Simulação.....	41
4 DESENVOLVIMENTO MECÂNICO	42
4.1 PROJETO BICO DA CARENAGEM	42
4.2 PROJETO DO DIFUSOR.....	43
4.3 PROJETO DE ARREFECIMENTO DO INVERSOR	44
4.3.1 Placa Aletada.....	45
4.3.2 Carenagem Traseira	46
4.4 PROJETO DE ARREFECIMENTO DO MOTOR	48
5 RESULTADOS DO PROJETO VIRTUAL	51
5.1 SIMULAÇÃO DO BICO DA CARENAGEM	51
5.3 SIMULAÇÃO DA PLACA ALETADA	55

5.4 SIMULAÇÃO DO RADIADOR	57
6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	59
REFERÊNCIAS.....	61
ANEXO A – Tabela para a determinação do número de Nusselt.	64

1 INTRODUÇÃO

A competição estudantil realizada pela *Society of Automotive Engineers* (SAE) teve seu início nos Estados Unidos, em 1981. Com objetivo de fomentar a especialização de estudantes de engenharia no setor automotivo de alta performance foi criada a *Formula SAE Student*, impulsionada pelas três grandes montadoras americanas da época: *General Motors*, *Ford* e *Chrysler*. No Brasil desde 2004, a competição envolve estudantes de diferentes regiões de dentro e fora do país. Atualmente, a competição Fórmula SAE é realizada em 6 países diferentes, sendo eles: Austrália, Itália, Inglaterra, Alemanha, Brasil e Estados Unidos, com objetivo de incentivar as boas práticas de engenharia automotiva (CRUZ, 2018).

A equipe UTForce e-Racing existe desde 2015, porém foi no ano de 2017 a sua estreia na competição nacional (equipe 9ª colocada na Fórmula SAE Elétrico Brasil). A equipe é formada por estudantes dos mais variados cursos de graduação, mas em sua maioria das áreas de engenharia elétrica, mecânica e de produção. O projeto consiste no desenvolvimento de um carro elétrico, tipo fórmula, para competição. No ano de 2018, a equipe irá propor melhorias de projeto do primeiro carro e o desenvolvimento de estratégias na obtenção de um êxito ainda maior no ano seguinte.

No intuito de promover o desenvolvimento de boas práticas de engenharia, se faz necessário um estudo aprofundado em conceitos e aplicações aerodinâmicas com uma justificativa pertinente no âmbito do ganho de performance e no arrefecimento de componentes elétricos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver o projeto aerodinâmico do carro Force 2 da equipe UTForce e-Racing que representa a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Campus Ponta Grossa) na competição nacional estudantil de carros elétricos tipo fórmula. O projeto aerodinâmico consiste no desenvolvimento do bico da carenagem, de um difusor aerodinâmico, do sistema de

arrefecimento do inversor de frequência e do sistema de arrefecimento do motor elétrico do carro.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Tratam-se também como objetivos, de forma específica, analisar as condições físicas dos problemas para cada projeto, desenvolver uma modelagem direcionada às especificações de cada projeto. E ainda analisar a validade de cada componente desenvolvido por meio de simulações fluidodinâmicas, no *software* Ansys® Workbench v18.1.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

É abordada nessa seção os conhecimentos necessários para o embasamento teórico do tema deste trabalho.

2.1 FÓRMULA SAE BRASIL

É uma competição anual que acontece no município de Piracicaba-SP e recebe equipes de vários estados brasileiros e até de fora do país. A competição consiste no desenvolvimento completo de um carro, podendo ser elétrico ou à combustão. Há provas que avaliam custos, *design* e performance. Atualmente, a competição Fórmula SAE Elétrico conta com 15 equipes de estudantes das mais variadas universidades brasileiras. A figura 1 mostra a classificação geral do último ano de competição dos carros elétricos.

Figura 1: Classificação Geral da 14ª Competição Fórmula SAE Brasil Elétrico 2017.



14ª Competição Fórmula SAE BRASIL - PETROBRAS **SAE BRASIL**
ELÉTRICO 2017
Classificação Geral

Posição	Carro #	Equipe	Penalidades	Custos	Apresentação	Design	Aceleração	Skid Pad	Autocross	Enduro	Eficiência	Pontuação Total
1	E01	Unicamp E-Racing		70,3	70,7	120,0	100,0	71,1	123,7	275,0	100,0	930,8
2	E08	B'Energy Racing			39,7	73,0	40,9	28,4	68,8	163,5	100,0	514,2
3	E02	Fórmula FEI Elétrico		66,4	56,0		49,7	75,0	125,0	13,0	100,0	485,1
4	E04	EESC - USP Tupã		64,2	73,3	90,0						227,4
5	E03	Ampera Racing		63,6	65,5	78,5	4,5	3,5	6,5			222,1
6	E07	CHEETAH E-RACING		71,1	75,0	65,8						211,9
7	E06	Minerva eRacing		76,8	54,3	64,0						195,1
8	E05	Faraday Racing		61,1	32,8	61,3						155,2
9	E14	UTForce e-Racing		69,0	37,1	31,8						137,8
10	E15	Fórmula Tesla UFMG		35,3	36,2	50,0						121,5
11	E12	Fórmula CEM-EV		47,0	53,4							100,5
12	E13	Fórmula E-Route UFSCar			32,8							32,8
13	E11	FGR				10,0						10,0
14	E10	FÓRMULA UNIP ELÉTRICO			3,4	3,5						6,9
15	E09	Fórmula-E UFPB				5,0						5,0

Fonte: Cruz (2018).

2.2 UTFORCE *E-RACING*

A equipe UTForce *e-Racing* representa a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Campus Ponta Grossa) no cenário nacional através da competição Fórmula SAE Elétrico. A equipe é composta por mais de 60 membros entre estudantes de engenharia e tecnologia. O projeto de extensão é dividido em 5 grandes áreas, sendo elas: Administrativo, Marketing, Projeto Elétrico, Projeto Mecânico e Desempenho.

O carro possui um motor elétrico acionado por um inversor de frequência que é alimentado por um *pack* de baterias. Além disso, o carro possui outros sistemas elétricos/eletrônicos complexos e um projeto mecânico confiável que proporciona segurança e ganho de performance. A figura 2 mostra o carro Force 1 da competição de 2017.

Figura 2: Carro Force 1 da equipe UTForce *e-Racing*.



Fonte: UTForce *e-Racing* (2018).

O Projeto Mecânico da equipe UTForce *e-Racing* é dividido em algumas áreas, porém o foco do presente trabalho será no desenvolvimento aerodinâmico do carro Force 2.

2.3 AERODINÂMICA VEICULAR

Os principais conceitos de estudo da aerodinâmica veicular se resumem ao arrasto e a sustentação negativa (*downforce*).

2.3.1 Arrasto

Arrasto consiste em uma resistência aerodinâmica que um corpo sólido em movimento sofre ao passar em meio fluido. Em outras palavras, arrasto pode ser definido como uma força de atrito provocada pela interação entre a superfície do objeto e as moléculas do ar e é expressada por uma força de direção igual e sentido oposto ao seu deslocamento (HALL, 2015).

Como o ar passa ao redor do objeto, a magnitude da força de arrasto depende da forma do corpo. Assim, a componente da força que atua paralelamente ao movimento do fluido produzirá variações de velocidade e pressão sobre o objeto de estudo (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2010; HALL, 2015).

A força de arrasto pode ser expressa na equação 1 como uma variação da força de resistência dos fluidos, sendo ela (PALANDI, 2010):

$$F = B V^N \quad (1)$$

F: força de resistência dos fluidos;

B: constante depende da geometria do corpo;

V: velocidade do fluido;

N: constante dependente do fluido.

No caso do arrasto, a equação 2 é escrita da seguinte maneira (PALANDI, 2010):

$$F_D = B V^2 \quad (2)$$

Sendo,

$$B = \frac{1}{2} \rho_{ar} \cdot A \cdot C_D \quad (3)$$

F_D : força de arrasto;

ρ_{ar} : massa específica do ar;

A: área frontal do corpo;

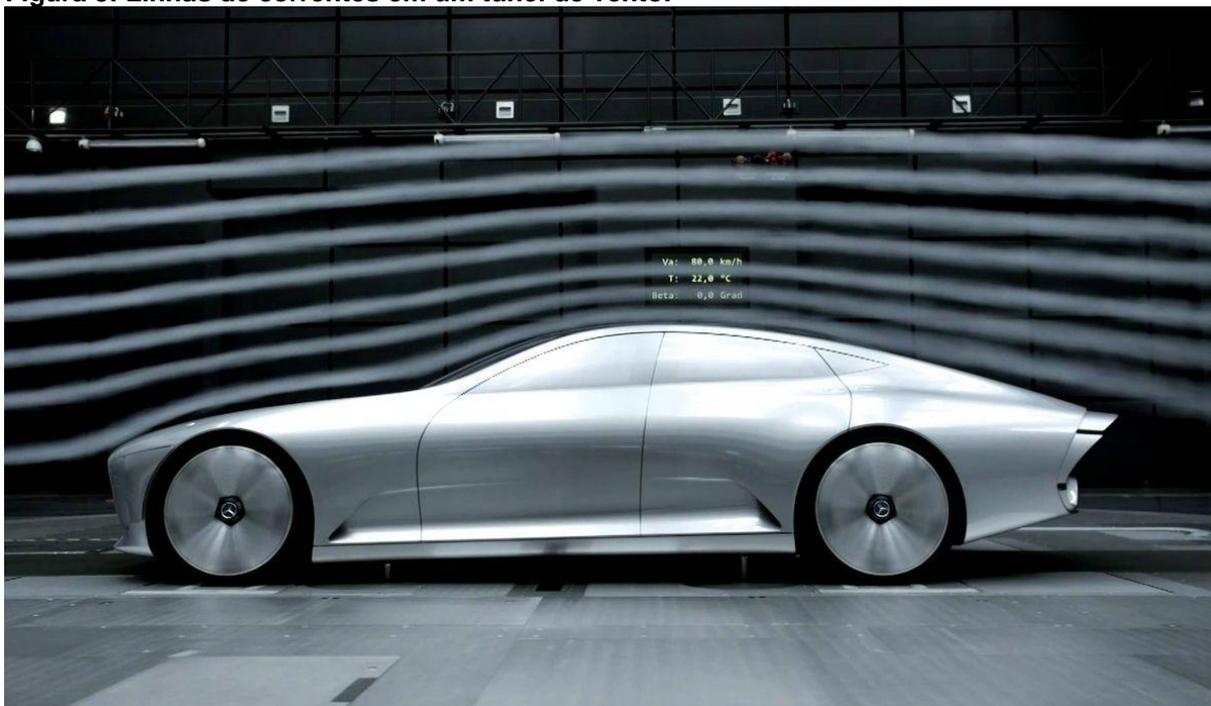
C_D : coeficiente de arrasto.

Com isso, pela equação 4 podemos escrever a força de arrasto como sendo (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2010):

$$F_D = \frac{V^2 \cdot A \cdot \rho_{ar} \cdot C_D}{2} \quad (4)$$

A equação 4 revela, portanto, a relação de interdependência da força de arrasto com a forma do corpo e as propriedades do ar. O coeficiente de arrasto (C_D) é determinado experimentalmente, geralmente em túneis de vento, como mostra a figura 3.

Figura 3: Linhas de correntes em um túnel de vento.



Fonte: Fernie (2016).

Contudo, cada corpo com forma variada possui um C_D diferente, e assim a área frontal do corpo sintetiza o envolvimento entre força de arrasto e a geometria de um corpo em movimento (G. JUNIOR; TEIXEIRA; FERREIRA, 2015).

A figura 4 mostra os diferentes valores do coeficiente de arrasto para corpos com diferentes formas.

Figura 4: Valores de coeficiente de arrasto aerodinâmico.

forma	descrição	C	forma	descrição	C
	Formato mais aerodinâmico	< 0,1		Caminhão	0,8-1,0
	Carro esporte	0,2-0,3		Bicicleta de corrida com ciclista	0,9
	Semi-esfera (abertura para trás)	0,38		Cubo	1,05
	Carros de passeio	0,4-0,5		Placa quadrada	1,2
	Esfera	0,47		Motociclista	1,8
	Ônibus	0,6-0,8		Semi esfera (abertura para frente)	1,42
	Cilindro	0,7-1,3		Seção em C (abertura para frente)	2,30

Fonte: LEITURAS DE FÍSICA (1998).

2.3.2 Sustentação Negativa (*Downforce*)

A sustentação negativa ou *downforce* é uma força perpendicular ao movimento do carro que visa aumentar a aderência do veículo à pista. O ganho de *downforce* significa um aumento de velocidade em curvas sem que o carro rode ou perca estabilidade, potencializando as forças de tração envolvidas no carro (KATZ, 1995).

Existem duas maneiras de aumentar o *downforce* em veículos de corrida automotivos: através do uso de aerofólios e com o efeito solo.

2.3.2.1 Aerofólios

Com o objetivo de aumentar o *downforce* do carro, os aerofólios obedecem a equação de Bernoulli, onde havendo um estreitamento na passagem de um fluido há o aumento de sua velocidade e diminuição da pressão estática sobre a superfície por onde ele passa (MAIA, 2015).

O equacionamento da equação de Bernoulli é dado pela equação 5 (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2010) :

$$\int \frac{dp}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = cte \quad (5)$$

Sendo,

p: pressão do fluido;

V: velocidade do fluido;

z: altura relativa;

g: aceleração da gravidade;

ρ : densidade do fluido.

Desconsidera-se os efeitos da energia potencial gravitacional agindo sobre o escoamento e multiplicando-se a equação 5 pela massa específica, temos (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2010):

$$p + \frac{\rho V^2}{2} = cte \quad (6)$$

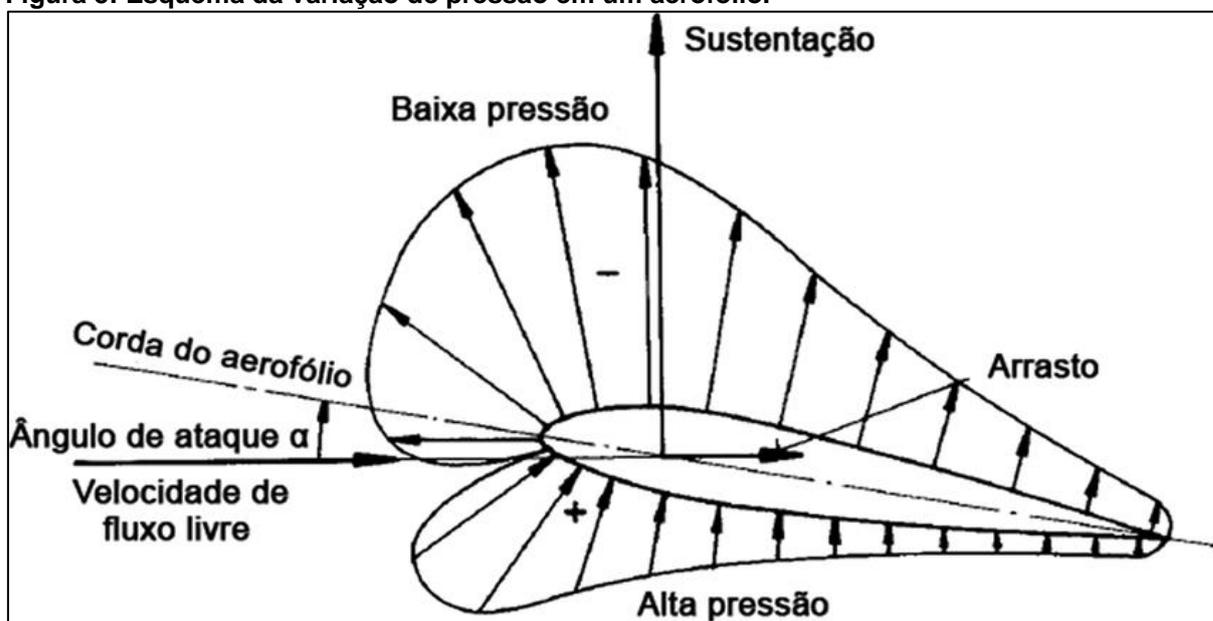
Pode-se categorizar a equação 6 para uma mesma linha de corrente de escoamento pode-se levar em conta os efeitos de pressão e velocidade citados anteriormente (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2010).

$$p_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} \quad (7)$$

Nos aerofólios, a passagem do fluxo de ar provoca o surgimento de um vórtice em sua região traseira. Esse vórtice, tendo sentido anti-horário, causa o surgimento de um contra fluxo em sentido horário que balanceia o momento angular do corpo. Fazendo-se uma simples soma vetorial do fluxo e do contra fluxo, nota-se que na parte superior eles se somam enquanto na de baixo se cancelam. Assim, os vetores resultantes são maiores na parte de cima e o ar na parte de cima atinge velocidades maiores do que na parte de baixo. Isso provoca uma redução de pressão na parte de cima do aerofólio e, portanto, essa diferença de pressão gera uma força de sustentação para cima. No caso de aerofólios automotivos, o processo é o mesmo, porém com sentido oposto. O resultado é uma força para baixo, chamada *downforce* (MAIA, 2015).

A figura 5 mostra a representação esquemática de uma asa de avião. Relacionando-a com a aerodinâmica veicular, temos que a imagem representa exatamente o fenômeno inverso.

Figura 5: Esquema da variação de pressão em um aerofólio.



Fonte: Picolo, Bühler e Rampinelli (2014).

Sendo assim, a utilização de asas (dianteira e traseira) em carros de alta performance aumenta o *downforce* gerado e contribui para estabilidade do carro em altas velocidades (MAIA, 2015).

A figura 6 mostra um carro de fórmula sae com asas.

Figura 6: Asas de um carro de fórmula SAE.



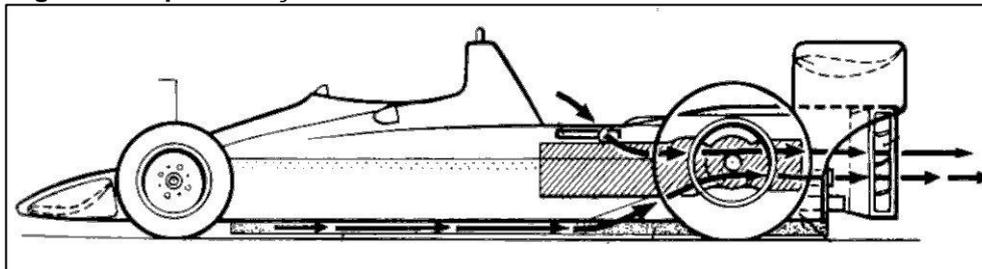
Fonte: Collins (2018).

2.3.2.2 Efeito solo

A segunda maneira de geração de *downforce* em um veículo é através do chamado efeito solo. Com o deslocamento de um veículo sobre uma pista, há sobre ele um fluxo de ar contrário ao seu movimento que se divide entre a parte superior e inferior do carro. O fluxo inferior, no entanto, é obrigado a se comprimir na região entre o dorso do veículo e o solo. Nessa compressão, de acordo com os mesmos princípios de Bernoulli, esse fluxo sofre uma aceleração e uma consequente redução de pressão. Como a pressão em cima do veículo se mantém, isso gera uma diferença de pressão entre a porção superior e inferior do veículo, gerando *downforce*. Reduzir a altura do veículo em relação ao solo permite amplificar o efeito solo no carro e é uma das maneiras mais utilizadas para obtenção do *downforce* (ALVES, 2017).

A figura 7 mostra as linhas de fluxo de ar passando em um carro fórmula.

Figura 7: Representação do fluxo de ar no efeito solo de um carro de fórmula 1.



Fonte: Dantas (2018).

Fazendo-se um comparativo à força de arrasto, a força de sustentação tem uma equação similar. Porém, levando-se em consideração agora o coeficiente de sustentação obtemos a equação 8 (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2010):

$$F_L = \frac{V^2 \cdot A \cdot \rho_{ar} \cdot C_L}{2} \quad (8)$$

F_L : força de sustentação;

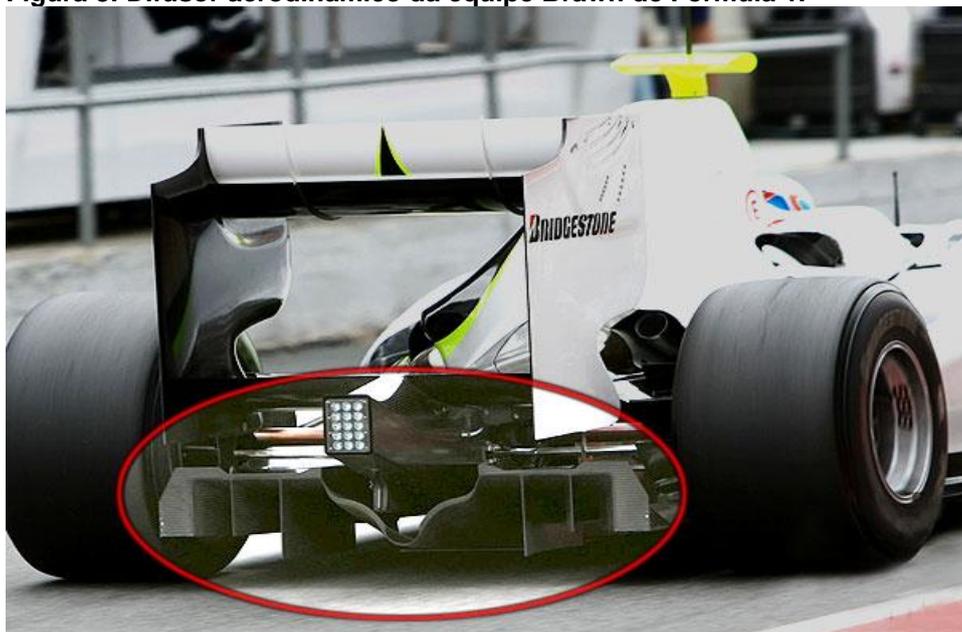
A: área da seção;

C_L : coeficiente de sustentação.

Nesse intuito de acelerar o fluxo de ar que passa por baixo do veículo e conseqüentemente diminuir a pressão estática local, o difusor tem um papel importante no ganho de *downforce* e uma conseqüente melhora de performance do veículo (ALVES, 2017).

A figura 8 mostra um difusor aerodinâmico de um carro de fórmula 1. Destacado na imagem, a parte de trás do difusor possui canaletas que linearizam o fluxo de ar que passa em baixo dele.

Figura 8: Difusor aerodinâmico da equipe Brawn de Fórmula 1.

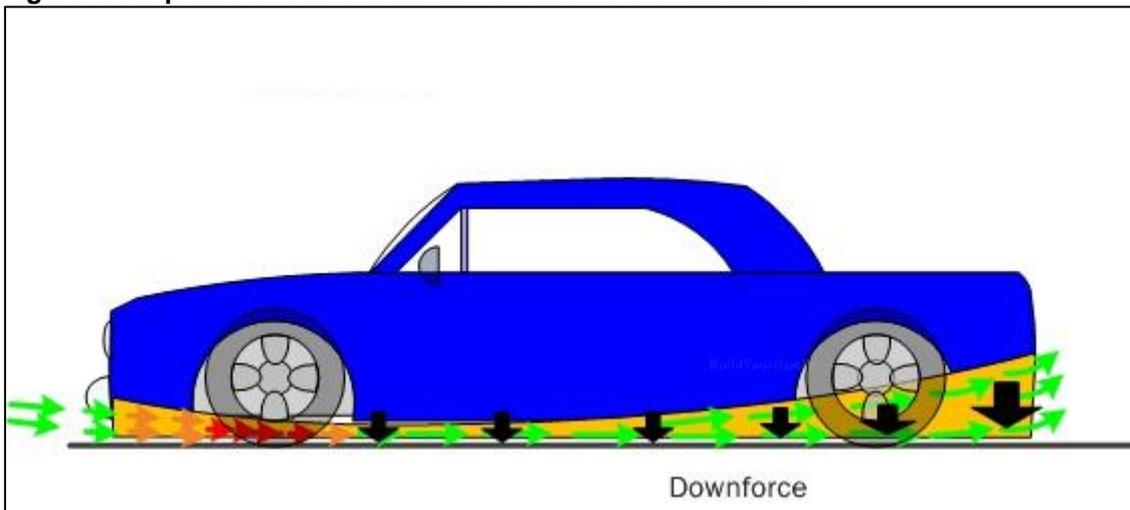


Fonte: Vicentim (2012).

Seguindo o princípio da equação de Bernoulli (equação 7), o difusor tem o objetivo de restringir a passagem de ar na entrada e expandir o ar na saída. Esse efeito aumenta a velocidade do ar em baixo do carro, e conseqüentemente, há uma redução em sua pressão. Assim, pela diferença de pressão que há em cima e em baixo do carro, uma força de sustentação negativa é gerada. Na saída do difusor, esse ar expande de forma linearizada e assim ganha pressão e perde velocidade. Essa inclinação na saída do difusor contrapõe a área de instabilidade na traseira do veículo, melhorando o escoamento e diminuindo a área de baixa pressão (ALVES, 2017).

A figura 9 esquematiza o funcionamento básico de um difusor aerodinâmico em um carro.

Figura 9: Esquema de funcionamento do difusor aerodinâmico.



Fonte: Adaptado de THE BYORC TEAM (2018).

2.4 ARREFECIMENTO AERODINÂMICO

Arrefecimento aerodinâmico consiste na utilização do fluxo de ar como forma de diminuir a temperatura de componentes elétricos de um carro de fórmula SAE. Isso é possível devido à uma troca térmica convectiva entre o fluxo de ar com uma certa velocidade entrando e arrefecendo componentes automotivos (CAMPOS, 2009).

Segundo a lei zero da termodinâmica, “se dois corpos estiverem em equilíbrio térmico com um terceiro, estarão em equilíbrio térmico entre si”. Portanto, se um corpo de menor energia térmica estiver em contato com um corpo de maior energia térmica, o calor flui do corpo de maior temperatura para o de menor (MORAN; SHAPIRO, 2009; SCHULZ, 2018).

No caso do arrefecimento aerodinâmico, essa troca térmica pode ser expressa pela equação da transferência de calor por convecção, onde o fluxo de ar à uma certa velocidade troca calor com os componentes automotivos. Essa transferência de calor é expressa pela equação 9 (INCROPERA; BERGMAN; DEWITT, 2008):

$$q = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (9)$$

q: transferência de calor;

h: coeficiente convectivo;

A_s : área da seção transversal do corpo;
 T_s : temperatura superficial do corpo;
 T_∞ : temperatura do fluido de arrefecimento.

2.4.1 Determinação do Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção

Seguindo a lei de resfriamento de Newton, sabe-se que a convecção se dá quando um fluido em movimento encontra uma superfície com temperatura diferente à do fluido. Para determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção, se faz necessário uma análise do tipo de escoamento, da geometria da superfície pela qual o fluido troca calor, da camada limite e algumas propriedades termodinâmicas de transporte de fluido (INCROPERA; BERGMAN; DEWITT, 2008).

2.4.1.1 Número de Reynolds

O número de Reynolds pode ser definido como o parâmetro de partida para a análise do tipo de escoamento e sua natureza. O número de Reynolds pode ser definido pela equação 10, como sendo (MOREIRA,2012):

$$Re_L = \frac{\rho V_e L}{\mu} = \frac{V_e L}{\nu} \quad (10)$$

ρ : densidade do fluido;
 V_e : velocidade de escoamento;
 L : comprimento da superfície;
 μ : viscosidade absoluta do fluido;
 ν : viscosidade cinemática do fluido.

Re_L define, portanto, se a natureza do escoamento é laminar, turbulento ou de transição. Assim, as equações governantes desse tipo de escoamento podem ser definidas (INCROPERA; BERGMAN; DEWITT, 2008).

2.4.1.2 Número de Prandtl

O número de Prandtl é um parâmetro adimensional que permite relacionar a razão entre a difusividade de momento e a difusividade térmica de um fluido. A equação 11 mostra essa relação entre quantidade de movimento e calor do número de Prandtl (INCROPERA; BERGMAN; DEWITT, 2008).

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{k} \quad (11)$$

Sendo,

α : difusividade térmica do fluido;

μ : viscosidade absoluta do fluido;

c_p : calor específico do fluido.

k : condutividade térmica do material.

A partir dos valores de Reynolds e Prandtl conhecidos, determina-se a variável do número de Nusselt, representada para cada caso na figura 1 do anexo A (INCROPERA; BERGMAN; DEWITT, 2008).

2.4.1.3 Número de Nusselt

O número de Nusselt é um parâmetro adimensional que fornece o gradiente de transferência de calor na camada limite térmica de uma superfície. Como mostra na equação 12, Nusselt tem relação com posição, Reynolds e Prandtl (INCROPERA; BERGMAN; DEWITT, 2008).

$$Nu = f(X, Re_L, Pr) \quad (12)$$

Definindo Nusselt pela equação 13:

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (13)$$

h: coeficiente convectivo;

L: comprimento da superfície;

k: condutividade térmica do material.

2.4.2 Aletas

Com o objetivo de aumentar a área superficial em contato com o fluido de arrefecimento, se faz necessário o uso de aletas (superfícies estendidas) para obtenção de um ganho significativo na transferência de calor (ABRAHÃO et al., 2007).

De modo a estudar sua viabilidade diante o projeto, dois parâmetros são identificados para caracterizar a importância das aletas na taxa de transferência de calor entre o fluido e o sólido. Esses parâmetros são a eficiência e a efetividade da aleta (MOREIRA, 2016).

2.4.2.1 Eficiência da aleta

A determinação da eficiência da aleta é um método de seleção de qual tipo de aleta é mais relevante ao projeto, relacionando o caso real com o caso ideal de atuação das aletas (MOREIRA, 2016).

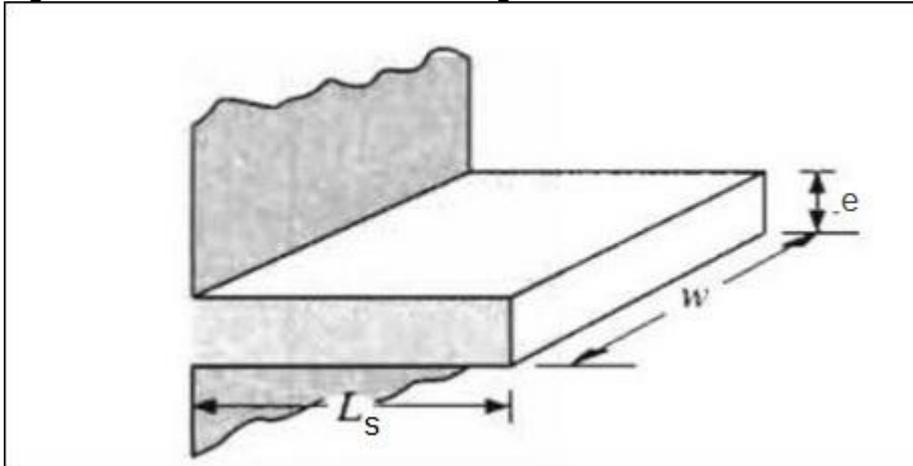
$$\eta_a = \frac{\text{fluxo de calor transmitido para aleta-caso real}}{\text{fluxo de calor transmitido para a aleta à temp.base-caso ideal}} \quad (14)$$

2.4.2.2 Efetividade da aleta

O método da efetividade da aleta (ϵ) compara o fluxo de calor devido à atuação da aleta com o fluxo de calor caso não houvesse aleta. Assim, a efetividade demonstra a vantagem ou não do uso de aletas em um projeto de arrefecimento (MOREIRA, 2016).

A figura 10 retrata um desenho esquemático de uma aleta retangular.

Figura 10: Desenho de uma aleta retangular.



Fonte: Moreira (2016)

O método da efetividade da aleta pode ser expresso pela equação 15:

$$\epsilon = \frac{q_{aleta}}{q_{s/aleta}} = \frac{q_{aleta}}{h A_b \theta_b} \quad (15)$$

Onde,

$$\theta_b = T_b - T_\infty \quad (16)$$

A_b : área da base da aleta;

h : coeficiente convectivo;

T_∞ : temperatura do fluido de arrefecimento;

T_b : Temperatura da base da aleta.

Como regra geral, o uso de aletas é justificado se $\epsilon > 2$ (MOREIRA,2016).

2.4.2.3 Dimensionamento de aletas

Para o dimensionamento de aletas de perfil retangular, calcula-se o comprimento corrigido indicado pela equação 17.

$$L_c = L_s + e/2 \quad (17)$$

Sendo,

L_c : comprimento corrigido da aleta;

L_s : comprimento da seção transversal da aleta;

e : espessura da aleta.

A eficiência para aletas retangulares é dada pela equação 18 (MOREIRA,2016):

$$\eta_a = \frac{\sqrt{hPkA} \theta_b \tanh(mL_c)}{hPL_c \theta_b} = \frac{\tanh(mL_c)}{mL_c} \quad (18)$$

Sendo,

$$m = \sqrt{\frac{hP}{kA}} \quad (19)$$

h : coeficiente convectivo;

P : perímetro molhado;

k : condutividade térmica do material;

A : Área da aleta;

m : Índice solução transferência de calor convectiva.

O perímetro molhado da aleta pode ser definido pela equação 20 (MOREIRA,2016):

$$P = 2 \times (w + e) \quad (20)$$

Onde,

e : espessura da aleta;

w : comprimento da aleta.

Na equação 21, temos a área da aleta de seção retangular (MOREIRA,2016):

$$A_r = w \times e \quad (21)$$

Sendo assim, o fluxo de calor real transferido pela aleta é apresentado pela equação 22. Essa transferência de calor é obtida com a eficiência da aleta conhecida (MOREIRA,2016).

$$q_A = \eta_a h A_a \theta_b \quad (22)$$

Para,

η_a : eficiência das aletas;

θ_b : diferença de temperatura da aleta e do fluido.

Onde, A_a é a área total da aleta dada pela equação 23 (MOREIRA,2016):

$$A_a = 2 \times w \times L_c \quad (23)$$

Onde,

L_c : comprimento corrigido da aleta.

Um parâmetro importante para validação da utilização do sistema aletado é o valor da razão da equação 24 ser muito menor do que 1. Assim, o dimensionamento das aletas é aceitável no projeto (MOREIRA,2016).

$$\frac{hA_a}{kP} \ll 1 \quad (24)$$

Sendo,

h : coeficiente convectivo;

P : perímetro molhado;

A_a : área da aleta;

k : condutividade térmica do material.

2.5 ELEMENTOS FINITOS E FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)

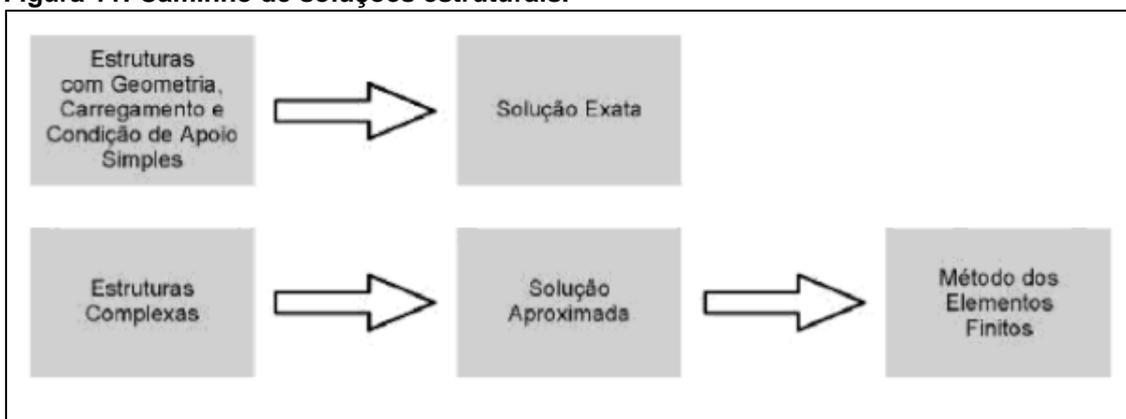
Alguns projetos em engenharia são muito complexos para verificação analítica, o que torna as soluções simplesmente impossíveis, por conta das variáveis utilizadas na análise do problema. Os procedimentos analíticos são capazes de determinar a

exata solução dos deslocamentos, deformações e tensões atuantes em todos os infinitos pontos de uma estrutura, no entanto as soluções conhecidas são muito restritas em sua forma (ALVES FILHO,2018).

Um caminho alternativo para análises de estruturas complexas consiste no método de elementos finitos, que se baseia na partição em inúmeras finitas partes uma estrutura complexa para que uma solução aproximada seja aplicada de forma aceitável pelo engenheiro e assim se determine com muita precisão o comportamento estrutural de acordo com as mais diversas condições (ALVES FILHO,2018).

A figura 11 sugere esquematicamente o caminho a ser percorrido para soluções de estruturas discutidas anteriormente.

Figura 11: Caminho de soluções estruturais.



Fonte: Alves Filho (2018).

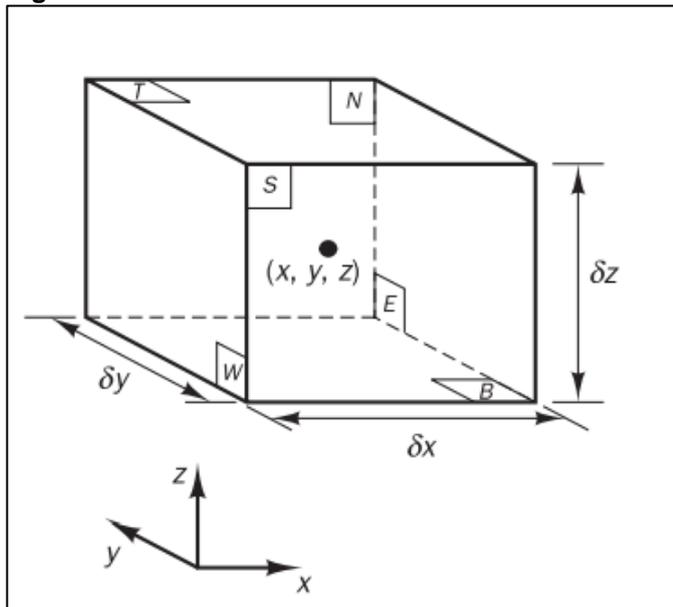
Da mesma maneira que o método de elementos finitos pode ser utilizado para estruturas, ele pode ser utilizado para as análises fluido-térmicas, com uma pequena mudança de nomenclatura: denomina-se volumes finitos, como por exemplo projetos aerodinâmicos de aeronaves, carros de alta performance, dentre outros.

A análise fluidodinâmica computacional, *computational fluid dynamics (CFD)*, é uma análise numérica dos fenômenos que envolvem o escoamento de fluidos e transferência de calor em uma superfície particular. Essa análise é feita por meio de simulações no computador e permite o ganho de tempo e redução do custo de projeto já que a ferramenta antecipa possíveis problemas e facilita suas soluções (SOLIMAN, 2015).

2.5.1 Equações Dominantes para Volumes Finitos

A forma mais simples de se dividir um volume de controle em finitos elementos é a de um cubo. Como essa estrutura possui seis faces as equações dominantes serão resolvidas para cada face do cubo em todos os finitos cubos existentes, a figura 12 relata a estrutura do cubo com lados δx , δy e δz . (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Figura 12: Estrutura cúbica em volume finito.



Fonte: Versteeg e Malalasekera (2007).

Assim de uma forma lógica quanto maior a quantidade de elementos mais precisa será a resposta final, porém existe a exigência computacional que essa quantidade de nós necessita para ser calculada, então é incumbido ao engenheiro projetista a análise de tempo de processamento e qualidade dos resultados gerados pelo computador.

As equações dominantes para volumes finitos podem ser divididas em três básicas leis: equação da conservação da massa; quantidade de movimento e energia. (SOLIMAN, 2015).

2.5.1.1 Equação da conservação de massa

A equação da conservação de massa em volumes de controle descreve que o aumento da massa deve se igualar a taxa de fluxo de massa para fluido dentro do volume controle. (FOX, 2010).

Têm se a lei para conservação de massa para um volume de controle, equação 25.

$$\frac{\delta(\rho)}{\delta t} + \frac{\delta(\rho v_x)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho v_y)}{\delta y} + \frac{\delta(\rho v_z)}{\delta z} = 0 \quad (25)$$

Sendo,

ρ : densidade do fluido;

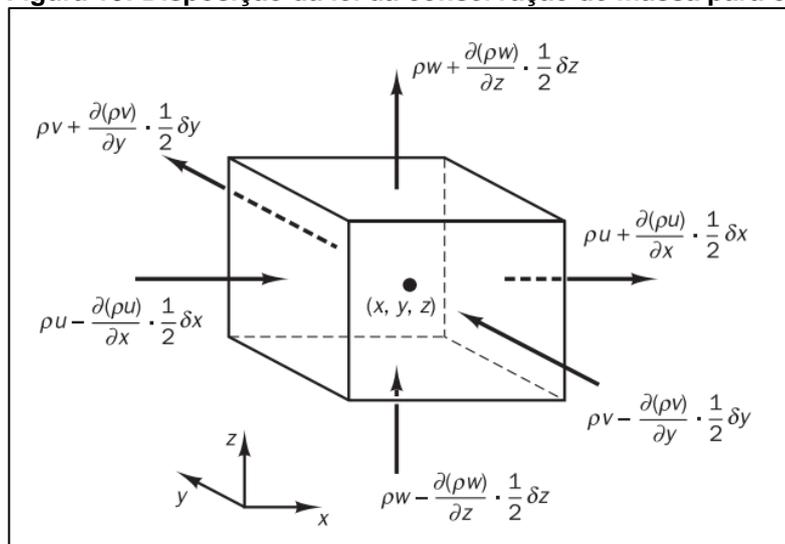
v_x : velocidade na direção x;

v_y : velocidade na direção y;

v_z : velocidade na direção z;

Dessa maneira a lei da conservação de massa deve ser aplicada para todas as faces do cubo estrutural no volume de controle. A figura 13 mostra a disposição destas equações para um elemento da malha de volumes finitos.

Figura 13: Disposição da lei da conservação de massa para o cubo estrutural.



Fonte: Versteeg e Malalasekera (2007).

2.5.1.2 Equação da conservação da quantidade de movimento

A equação da conservação de movimento, também chamada de segunda lei de Newton, prova que a quantidade de movimento de uma partícula aumenta na mesma taxa que as forças atuantes sobre a mesma partícula. (FOX, 2010).

A segunda lei de Newton pode ser escrita da seguinte forma para a direção x, equação 26.

$$\rho \frac{Dv_x}{Dt} = \frac{\delta(-p + \tau_{xx})}{\delta x} + \frac{\delta(\tau_{yx})}{\delta y} + \frac{\delta(\tau_{zx})}{\delta z} + S_{Mx} \quad (26)$$

Sendo,

S_{Mx} : momento em x por unidade de volume por unidade de tempo;

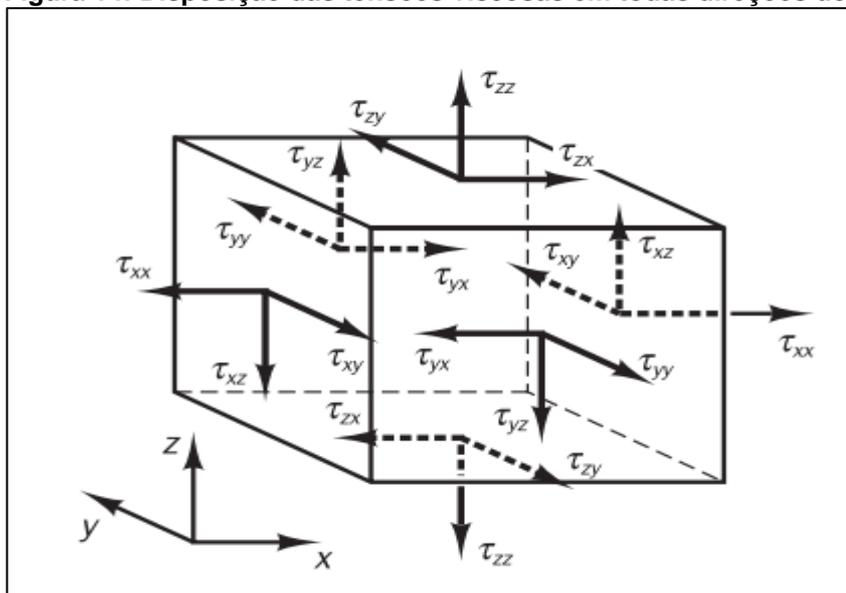
p: pressão;

τ_{ij} : componente de tensão viscosa atuando na direção j em uma superfície normal à direção i.

Para as outras direções y e z as equações de quantidade de movimento são análogas à equação 26.

A figura 14 mostra a disposição das componentes de tensão viscosa em todas as direções para a estrutura do cubo.

Figura 14: Disposição das tensões viscosas em todas direções do cubo.



Fonte: Versteeg e Malalasekera (2007).

2.5.1.3 Equação da conservação de energia

A equação da conservação da energia, também chamada de primeira lei da termodinâmica, prova que a taxa de aumento da energia do fluido é igual a soma da taxa de calor adicionado ao fluido com o trabalho realizado. (FOX, 2007)

A primeira lei da termodinâmica pode ser escrita para a componente x da seguinte forma, equação 27:

$$\rho \frac{DE_x}{Dt} = \left[\frac{\delta[v_x(-p + \tau_{xx})]}{\delta x} + \frac{\delta(v_x \tau_{yx})}{\delta y} + \frac{\delta(v_x \tau_{zx})}{\delta z} \right] \delta x \delta y \delta z - \frac{\delta q_x}{\delta x} \delta x \delta y \delta z + S_E \quad (27)$$

Sendo,

DE_x/Dt : taxa de energia em x;

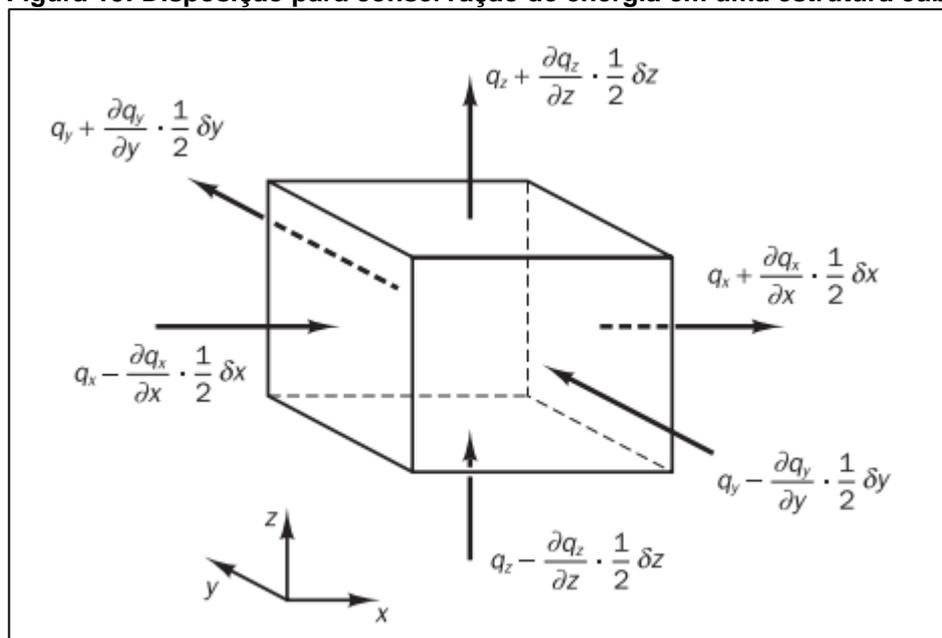
S_E : somatório de energia potencial;

q_x : fluxo de calor na direção x.

A equação 27 é dada para a conservação de energia na direção x, as equações para as outras direções, y e z, são análogas à essa.

A figura 15 mostra a disposição da primeira lei da termodinâmica para a estrutura cúbica de finitos volumes.

Figura 15: Disposição para conservação de energia em uma estrutura cúbica.



Fonte: Versteeg e Malalasekera (2007).

3 METODOLOGIA

Com base na análise dos elementos que compõe o desenvolvimento do projeto aerodinâmico do carro Force 2, busca-se abordar uma metodologia de projeto clara em ordem de estruturar o foco do estudo.

3.1 MODELAGEM

No processo de modelagem estrutural, primeiramente define-se o objetivo de estudo do projeto e quais parâmetros serão abordados como objetivo.

As equações 4 e 8 definem a magnitude de força de arrasto e sustentação, respectivamente. Com base no equacionamento de tais forças, cria-se um modelo de carenagem preferenciando a restrição da área frontal do bico e assim limitando a força de arrasto que age sobre ele. Seguindo o mesmo raciocínio, o difusor aerodinâmico é modelado com a intenção de restringir o ar que passa por ele, tendo assim uma diminuição em sua pressão e aumento de *downforce*.

Nos parâmetros de arrefecimento, são levados em conta o cálculo da efetividade das aletas (equação 15) com o intuito de dimensionar um modelo eficiente que amplifique a transferência de calor no local pelo aumento da área superficial (equação 9). Esse dimensionamento é feito com base no fluxo de ar que passa por uma carenagem traseira (equações 10,11 e 13), e assim, gerando uma convecção forçada local, há um arrefecimento no inversor e uma temperatura local variante.

Outro parâmetro estudado é a transferência de calor necessária para que se tenha componentes de arrefecimento modelados com vazão mássica suficiente para reduzir a temperatura até a temperatura de trabalho do motor. Há a modelagem de um sistema de arrefecimento para o motor elétrico com base na utilização de um radiador (equação 9), onde a água como fluido de trabalho circula entre serpentinas acopladas ao motor e fazem a troca térmica com o mesmo.

Como forma de explicar o processo de modelagem, a tabela 1 mostra o objetivo de cada projeto e o conceito da modelagem.

Tabela 1: Modelos do projeto aerodinâmico.

Projeto	Objetivo	Solução
Bico da Carenagem	Mínimo arrasto possível	Limitação da área frontal do bico
Difusor	Maior magnitude de <i>downforce</i> possível	Restringe a seção por onde passa o fluxo de ar
Placa Aletada	Aumentar a troca térmica local	Aumentando a área de contato entre o ar e a placa do inversor
Carenagem Traseira	Arrefecer o Inversor	Direcionando o fluxo de ar para a placa aletada
Conjunto Radiador	Arrefecer o Motor	Circulando água ao redor do motor através de uma serpentina

Fonte: Autoria própria.

Com o objetivo de otimizar a fase de projeto mecânico das peças aerodinâmicas e de arrefecimento do Force 2, foram utilizadas metodologias de gestão de projetos, na qual incluem o conceito do projeto, a modelagem e as simulações. Portanto, a metodologia de projeto propõe o objetivo de cada peça e as possíveis soluções encontradas em literaturas diversas, citadas neste trabalho.

Algumas restrições físicas que foram respeitadas são as regras encontradas no edital da competição Fórmula SAE, este conjunto de regras existe como um norte para os alunos projetistas e tem como objetivo a preservação da segurança de todos os carros construídos para a competição.

3.2 SIMULAÇÃO

Na simulação, utilizando o *software* Ansys Workbench® v18.1, é feita a análise computacional do comportamento dos componentes aerodinâmicos em meio à parâmetros pré-selecionados de escoamento sobre os sólidos.

3.2.1 Geração da Malha

Primeiramente, seleciona-se o modelo que será objeto de estudo. A partir do modelo selecionado cria-se a malha para essa geometria. A malha é composta de elementos finitos estruturalmente dispostos sobre a geometria a ser estudada e tem o objetivo de mapear toda a superfície do modelo e pelo método de elementos finitos descrever o comportamento linearizado em ambiente simulado.

Os parâmetros de malha utilizados nas simulações representam as características físicas de cada geometria estudada. De forma geral, utilizou-se uma preferência física de malha para problemas de CFD, com ordem de elemento linear e tipo de função de malha “*Curvature*” ou “*Proximity*”. A variação das funções utilizadas tem dependência com a geometria de cada corpo simulado. No caso do bico, carenagem traseira e radiador, foi utilizado a função *Curvature* por representar melhor as características físicas apresentadas. Já a função *Proximity* foi escolhida na simulação do difusor e da placa aletada, gerando melhor confiabilidade para geometrias planas detalhadas.

Para efeito de solução do método de elementos finitos e conseqüentemente para o de volumes finitos, se faz necessário a avaliação da qualidade da malha gerada na simulação. O *software* Ansys Workbench® possui vários métodos de avaliação de malhas, esses métodos avaliam a distribuição, a geometria e a quantidade dos nós dos elementos constituintes da malha, desta maneira o programa qualifica quantitativamente os elementos de acordo com a geometria e garante um nível de certeza aceitável para a simulação.

Para a verificação da qualidade da malha, *Element Quality* como o *software* denomina, foi utilizado o parâmetro *Target Skewness*, que tem como base de sua programação os elementos finitos tetraédricos e busca o aprimoramento da malha no alvo escolhido pelo operador, nos casos das simulações subseqüentes de 0,90. A escala do avaliador varia de 0 a 1, sendo 0 o pior caso e 1 o melhor. O programa adverte que o alvo escolhido não seja menor do que 0,8 por conta da qualidade da malha e informa que um número maior do que 0,90 consumirá muito processamento do computador. Por estas razões o *Target Skewness* foi estipulado para 0,90 (ANSYS® Help, 2017).

Esse método de avaliação da malha foi escolhido, pois é o método padrão do programa Ansys®, na avaliação de malhas que são projetadas para cálculos no *Fluent*. Assim seguindo as considerações de qualidade do programa foi utilizado esse método.

3.2.2 Parâmetros da Simulação

A simulação é feita com base nos parâmetros do problema físico que o objeto de estudo se encontra, para que se tenha a melhor precisão possível entre os dados simulados e os dados reais.

Na configuração do *Fluent*, o fluido escolhido para a simulação foi o ar a 30°C com regime de escoamento permanente. A simulação é realizada com uma velocidade média de entrada no volume de controle (*inlet*) de 15 m/s. As condições de contorno variam com o problema físico em cada projeto. Os problemas de natureza fluidodinâmica possuem condições de contorno o ar com velocidade no *inlet* de 15 m/s, já nos problemas de natureza térmica são fixadas temperaturas máximas na parede externa da placa aletada e no diâmetro de entrada do radiador. Em ambos os problemas térmicos há uma convecção forçada tanto na parede do radiador quanto nas aletas da placa do inversor, esse h de convecção é determinado pelos cálculos da equação 13.

Na execução do programa utilizou-se 100 iterações na resolução de cada modelo, e assim, o critério de aceitação foi mediante à convergência de todos os pontos.

4 DESENVOLVIMENTO MECÂNICO

Nesta etapa de desenvolvimento mecânico é mostrado o modelo dos projetos aerodinâmicos e de arrefecimento realizados para o Force 2.

4.1 PROJETO BICO DA CARENAGEM

O projeto do bico da carenagem levou em consideração a redução da força de arrasto que o carro sofre quando se movimenta em baixas e em altas velocidades. Com a diminuição desta força em relação à um carro sem o equipamento aerodinâmico projetado, pode-se considerar que o bico da carenagem melhora a condição aerodinâmica do carro. Desta maneira o veículo tende a ter um rendimento de consumo de bateria menor e atingir velocidades finais maiores.

O projeto do bico da carenagem teve como modelo perfeito a forma de uma gota, pois esta é conhecida como a configuração que mais diminui a força de arrasto aplicada. Porém as condições físicas de um carro não permitem que o perfil de um bico da carenagem seja idêntico ao formato de gota.

Afim de se aproximar do formato perfeito para a diminuição da força de arrasto, foi projetado um bico da carenagem, para o Force 2, com uma seção frontal menor do que o resto do corpo, mas que ainda sim respeita as condições físicas do chassi já projetado e construído para o carro.

A figura 16 mostra em vista isométrica o bico da carenagem projetado para as condições físicas apresentadas.

Figura 16: Projeto bico da carenagem.

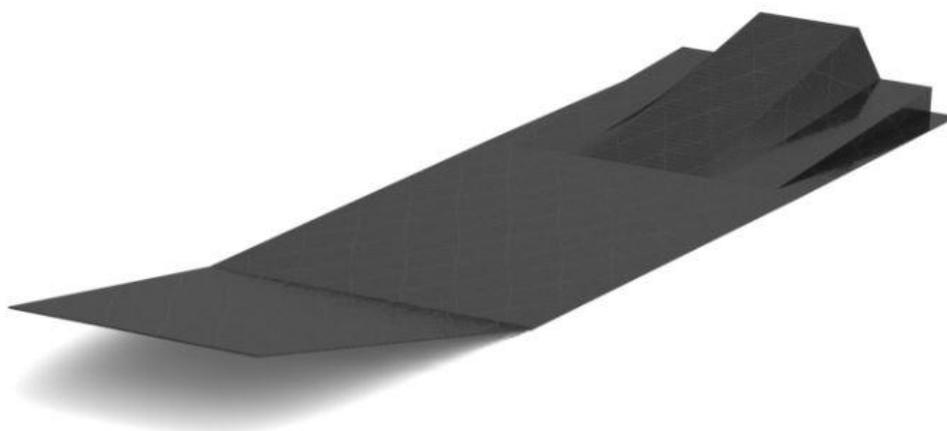


Fonte: Autoria própria realizada no Solidworks® v2017.

4.2 PROJETO DO DIFUSOR

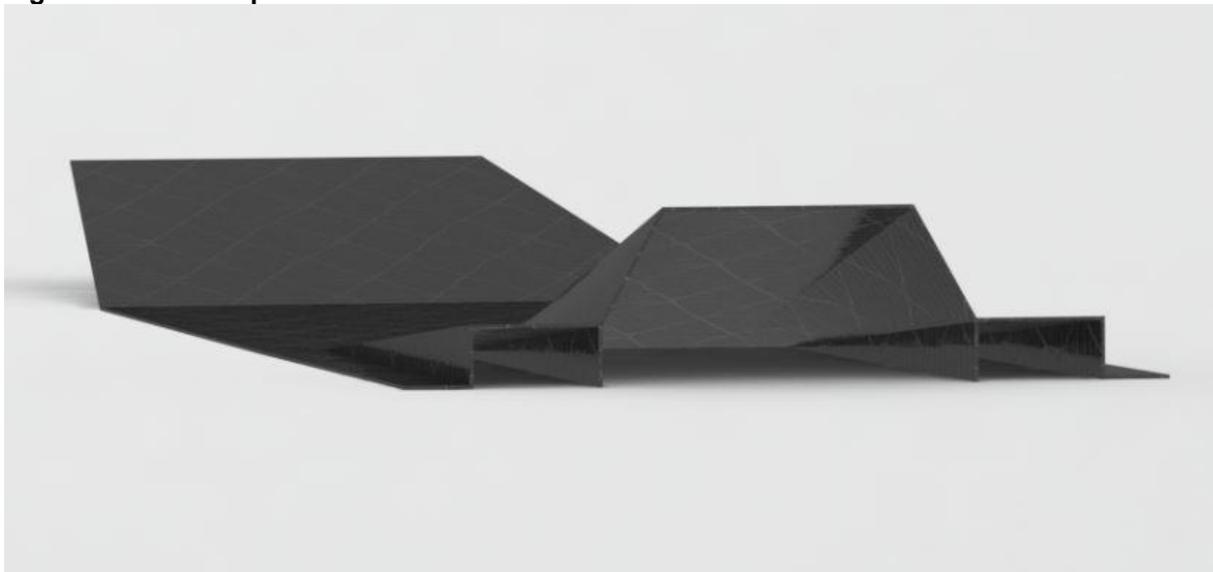
Seguindo a estrutura inferior do carro, o difusor é feito de fibra de carbono e funciona com a aceleração do fluxo de ar passante por baixo dele. O modelo que retrata o melhor ganho de *downforce* pela variabilidade do gradiente de pressão sob ele é mostrado na figura 17.

Figura 17: Projeto difusor em vista isométrica.



Fonte: Autoria própria realizada no Solidworks® v2017.

Figura 18: Vista da parte traseira do difusor aerodinâmico.



Fonte: Autoria própria realizada no Solidworks® v2017.

A figura 18 mostra a parte traseira do difusor, onde a inclinação resultante segue as medidas do chassi e reflete o ganho de *downforce* com a geometria utilizada.

4.3 PROJETO DE ARREFECIMENTO DO INVERSOR

Em veículos elétricos existem uma série de componentes que geram muito calor, devido a transformação de energia elétrica em energia térmica. Esses dispositivos eletrônicos possuem uma faixa de temperatura ótima de trabalho e se atingirem temperaturas muito altas danos irreparáveis ou até mesmo acidentes podem acontecer.

Um desses dispositivos eletrônicos que necessitam arrefecimento, devido à sua alta taxa de trabalho realizado é o inversor de frequência. Este dispositivo necessita de um sistema de arrefecimento, pois sozinho não consegue trocar o calor necessário para o seu funcionamento ótimo.

Afim de assegurar um bom desempenho do inversor de frequência do veículo elétrico, foram projetados 2 componentes que formam um conjunto de arrefecimento do inversor: uma placa aletada onde o inversor é fixado e uma carenagem traseira que direciona o escoamento.

4.3.1 Placa Aletada

Sabendo-se que a transferência de calor sobre um corpo varia com a sua área (equação 9), julga-se necessário a utilização de aletas na placa que suporta o inversor como forma de amplificar a troca térmica entre o fluxo de ar e a placa.

Como forma de justificar a utilização de aletas no projeto, calcula-se a efetividade das mesmas (equação 11). Como o valor calculado é muito maior do que 2, é válido a utilização da placa aletada.

Além disso, calcula-se também a eficiência do conjunto aletado (equação 10). A eficiência definiu a geometria da aleta a ser utilizada no problema. A partir desses cálculos, a tabela 2 mostra o comportamento das aletas no cenário do problema térmico do inversor.

Tabela 2: Cálculo de dimensionamento das aletas.

Dimensionamento das Aletas		
Comprimento (L)	0,05	m
Largura (w)	0,4	m
Espessura (t)	0,001	m
Comprimento Corrigido (Lc)	0,0505	m
Condutividade Térmica (k)	204	W/mK
Perímetro (P)	0,802	m
Coeficiente Convectivo (h)	30	W/m ² K
Área da Aleta (A)	0,0004	m ²
Área Total da Aleta (Aa)	0,0404	m ²
Índice de Transf. De Calor (m)	17,1712825	
Eficiência da Aleta (na)	0,80715366	
Efetividade da Aleta (e)	81,7263256	
Critério de Verificação da Aleta (hA/kP)	7,3346E-05	<< 1
Calor Transferido (qa)	68,4789162	W

Fonte: Autoria própria realizada no Microsoft Excel® v2013.

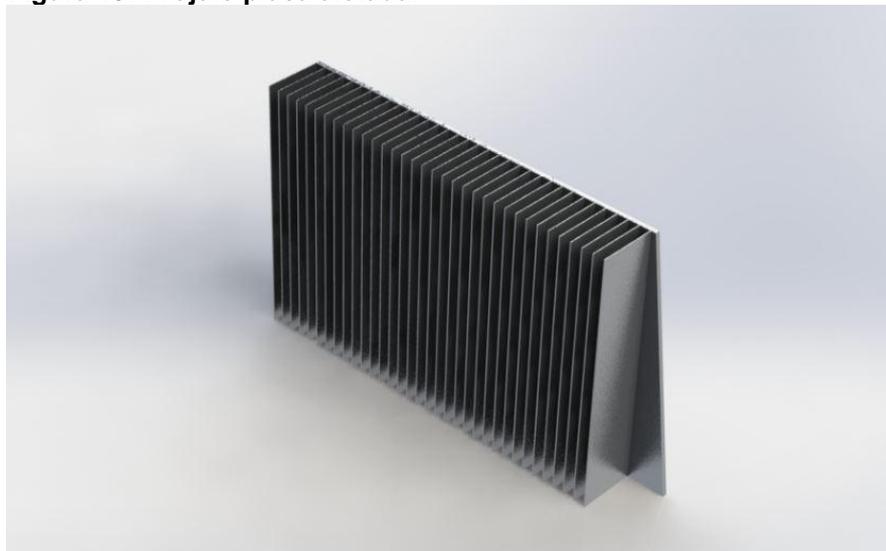
Sendo assim, as aletas possuem uma eficiência de 80,7%, efetividade de 81,72, e transferência de calor de 68,47 W por aleta. Este cenário define o melhor caso de projeto para a placa aletada de alumínio.

O projeto da placa aletada visa o aumento da transferência de calor do inversor para que este trabalhe em sua faixa de temperatura ideal, para uma melhor

performance do componente eletrônico o que induz uma redução no consumo de bateria.

A figura 19 mostra uma vista isométrica da placa aletada, que será fixada no inversor.

Figura 19: Projeto placa aletada.



Fonte: Autoria própria realizada no Solidworks® v2017.

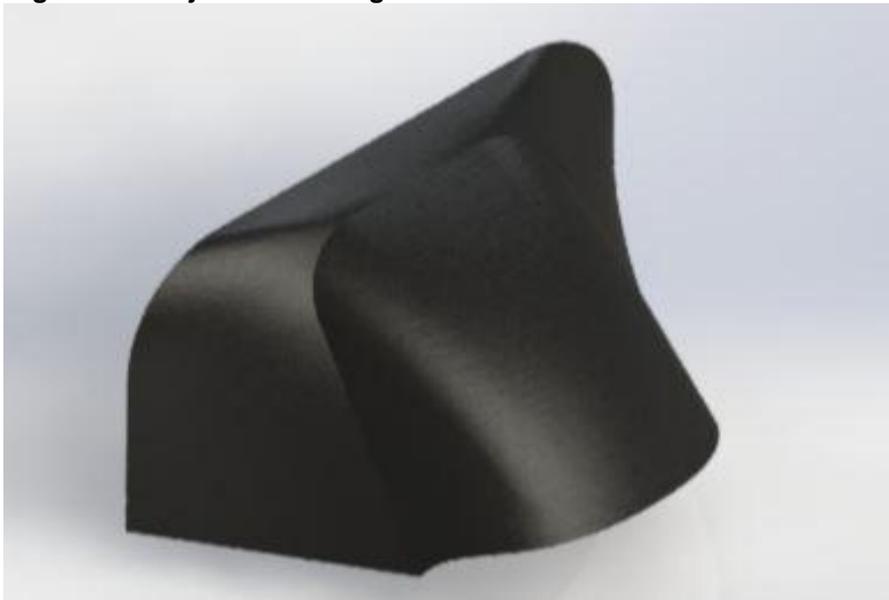
4.3.2 Carenagem Traseira

Visando o aproveitamento do fluxo de ar que escoar sobre o carro em altas velocidades, foi projetado uma carenagem traseira que é acoplada no carro e melhora o escoamento de ar sobre a placa aletada.

O projeto buscou aproveitar o espaço de trás do chassi do carro com o intuito de direcionar o maior fluxo de ar possível para as aletas, buscando assim uma convecção forçada no local.

A figura 20 mostra a vista isométrica da carenagem traseira projetada para o carro.

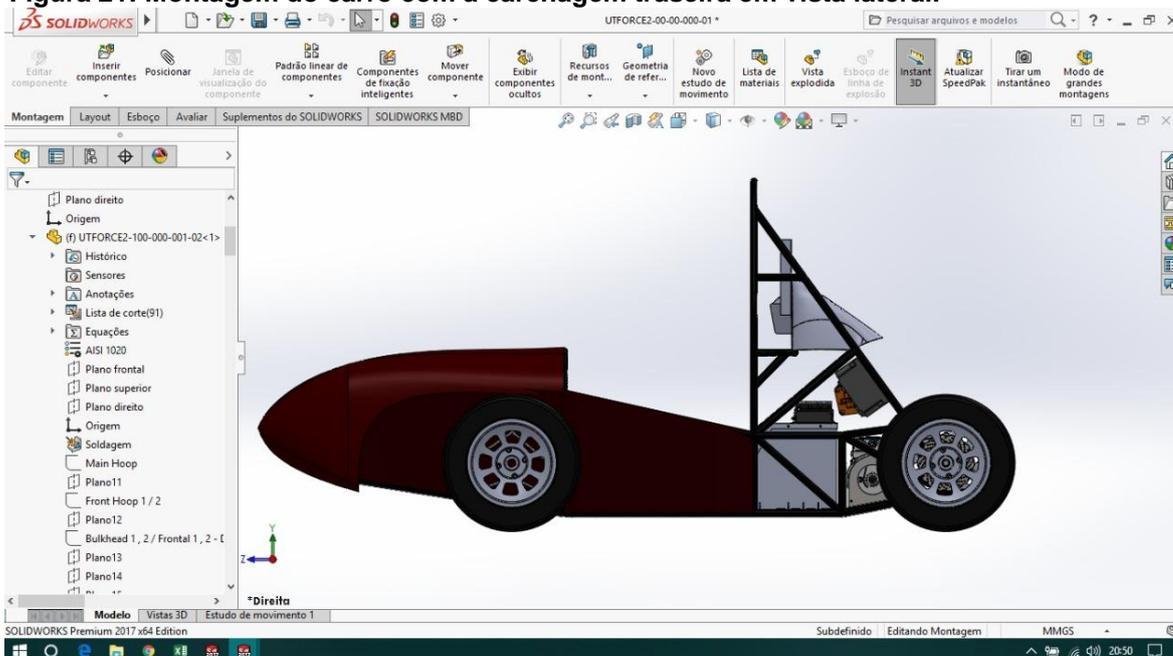
Figura 20: Projeto da carenagem traseira.



Fonte: Autoria própria realizada no Solidworks® v2017.

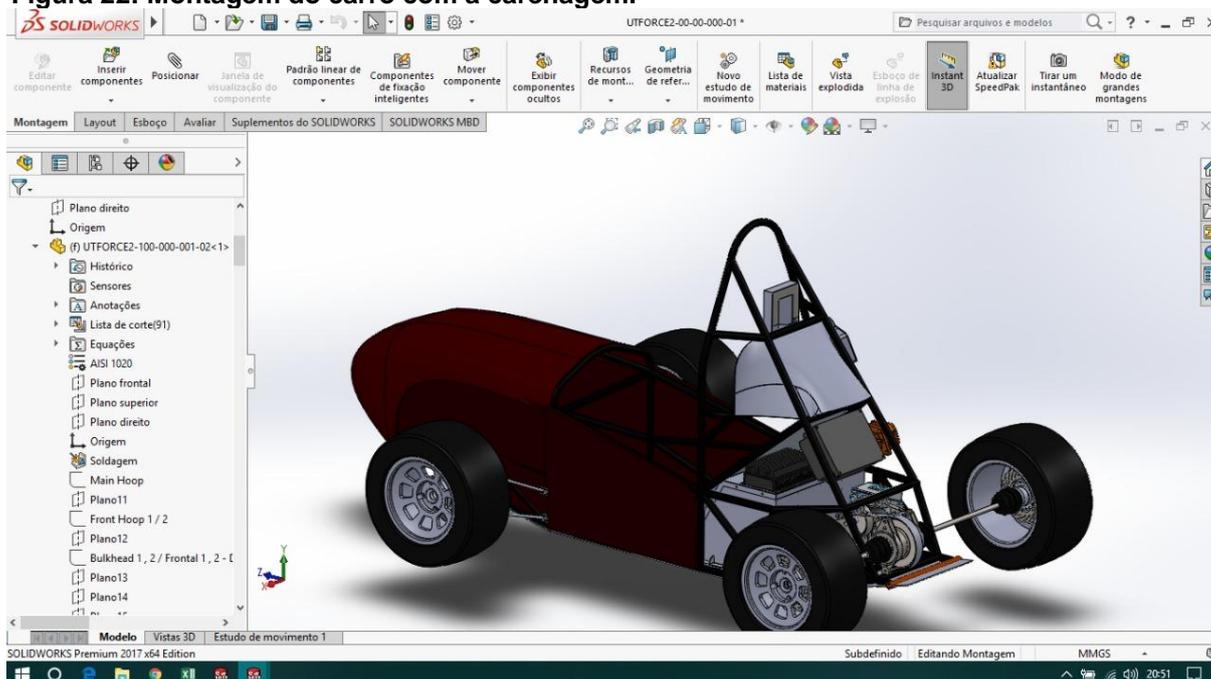
A carenagem traseira é feita de fibra de vidro, com a intenção de limitar o peso sobre o carro. As figuras 22 e 23 mostram a montagem do carro com a carenagem traseira.

Figura 21: Montagem do carro com a carenagem traseira em vista lateral.



Fonte: Autoria própria realizada no Solidworks® v2017.

Figura 22: Montagem do carro com a carenagem.



Fonte: Autoria própria realizada no Solidworks® v2017.

4.4 PROJETO DE ARREFECIMENTO DO MOTOR

Conhece-se radiadores como os dispositivos de arrefecimento de motores a combustão, na maioria dos carros atualmente existe este equipamento que possui em seu interior um fluido de arrefecimento que circula por entre as serpentinas em seu ciclo térmico projetado. Dessa maneira o radiador melhora o resfriamento do motor nos carros.

Os carros elétricos possuem motores que também geram calor, pois transformam energia eletromagnética parte em energia cinética e parte em energia térmica, estes motores como os motores a combustão de carros convencionais possuem uma faixa de temperatura ótima de operação e necessitam ser resfriados.

Esse projeto tem como principal objetivo o arrefecimento do motor elétrico utilizado no Force 2, ele possuirá como fluido térmico de trabalho a água, pois este fluido possui grande capacidade térmica, é mais facilmente encontrado, tem simples manuseio e é atóxico.

A figura 23 mostra a estrutura de arrefecimento do motor elétrico feita em alumínio, onde há a entrada da água arrefecida vinda do radiador, a passagem pelas serpentinas internas vazadas e a saída da água já em equilíbrio com a temperatura

do motor elétrico. Esta estrutura é acoplada na caraça do motor, permitindo também a condução térmica com o mesmo.

Figura 23: Projeto de serpentina acoplada ao motor.



Fonte: A autoria própria realizada no Solidworks® v2017.

A figura 24 mostra uma imagem renderizada do acoplamento da estrutura de arrefecimento com o motor elétrico.

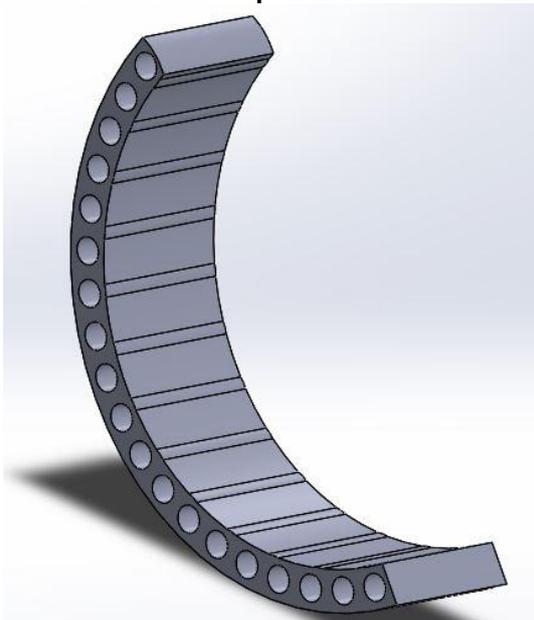
Figura 24: Montagem da estrutura de arrefecimento e motor elétrico.



Fonte: A autoria própria realizada no Solidworks® v2017.

A figura 25 mostra uma vista em corte da estrutura de arrefecimento.

Figura 25: Vista em corte das serpentinas de arrefecimento.



Fonte: Autoria própria realizada no Solidworks® v2017.

5 RESULTADOS DO PROJETO VIRTUAL

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações realizadas para os projetos anteriormente descritos.

5.1 SIMULAÇÃO DO BICO DA CARENAGEM

O projeto do bico da carenagem objetiva a melhora aerodinâmica do Force 2, como anteriormente apresentado no trabalho. Por questão da funcionalidade da peça definiu-se os parâmetros de simulação para o projeto:

Tabela 3: Parâmetros de simulação bico da carenagem.

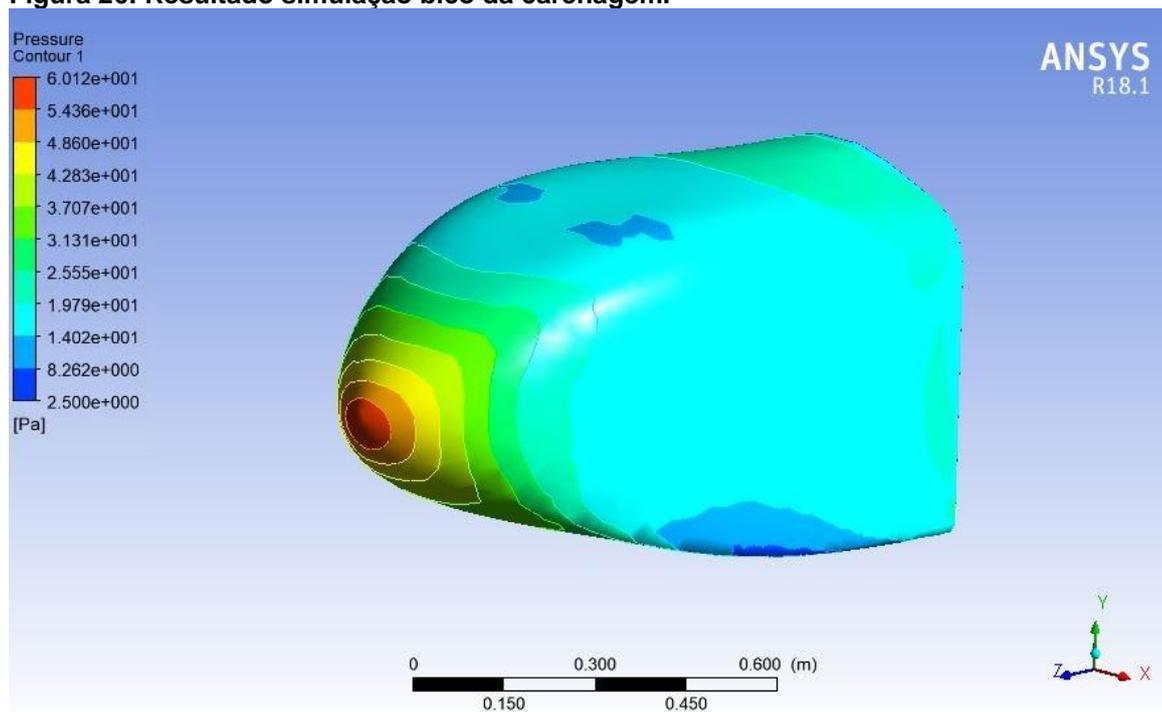
Parâmetros de Projeto	
Material do bico	Fibra de Vidro
Velocidade do ar entrada (V_{ar})	15 m/s
Temperatura entrada do ar (T_{ar})	30°C
Pressão na saída	101325 Pa
Direcionamento do Fluxo	Condição de não deslizamento

Fonte: Autoria própria.

Como resultado da simulação do bico da carenagem para os parâmetros de projetos utilizados, foi obtido uma magnitude da força de arrasto (F_D) de 6,71 N.

A figura 26 mostra a simulação do bico da carenagem com a representação do gradiente de pressão.

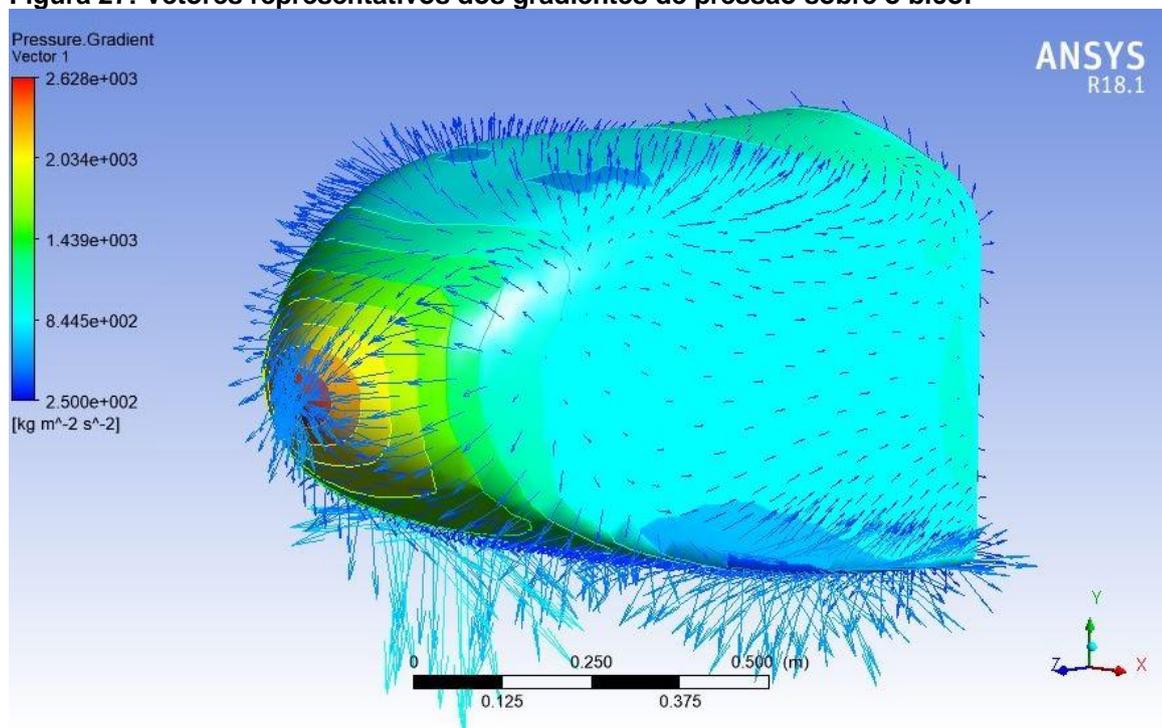
Figura 26: Resultado simulação bico da carenagem.



Fonte: Autoria própria realizada no Ansys® Workbench Fluid Flow (Fluent) v18.1.

Na figura 27, têm-se os vetores gradientes de pressão sobre o bico.

Figura 27: Vetores representativos dos gradientes de pressão sobre o bico.



Fonte: Autoria própria realizada no Ansys® Workbench Fluid Flow (Fluent) v18.1.

Sendo assim, as simulações exibem a condição mínima de arrasto do projeto do bico da carenagem e proporciona melhor geometria pela busca por performance.

5.2 SIMULAÇÃO DO DIFUSOR

O difusor aerodinâmico tem como função a valorização da estabilidade do carro, assim as simulações foram feitas no sentido de se encontrar um valor de *downforce* máximo. Os parâmetros de simulação utilizados seguem na tabela 4.

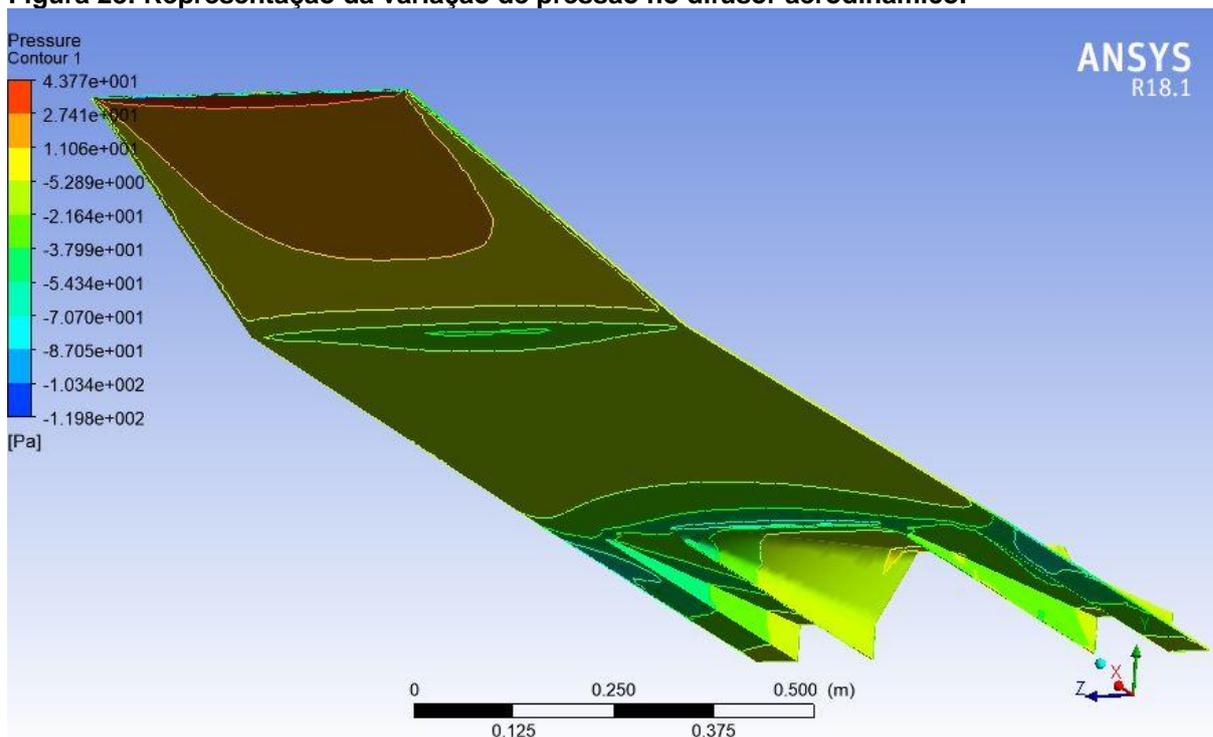
Tabela 4: Parâmetros de simulação do difusor aerodinâmico.

Parâmetros de Simulação	
Material do difusor	Fibra de carbono
Velocidade do ar entrada (V_{ar})	15 m/s
Temperatura entrada do ar (T_{ar})	30°C
Pressão na saída	101325 Pa

Fonte: Autoria própria.

A figura 28 mostra o gradiente de pressão na superfície do difusor, exemplificando os conceitos aerodinâmicos estudados. Simulando o difusor com o solo, têm-se pressões menores em menores distâncias do mesmo com o solo. Assim, segue a figura que explica o efeito físico de ganho de *downforce*.

Figura 28: Representação da variação de pressão no difusor aerodinâmico.



Fonte: Autoria própria realizada no Ansys® Workbench Fluid Flow (Fluent) v18.1.

A figura 29 mostra a representação do efeito solo no difusor aerodinâmico, onde as pressões variam de acordo com a geometria da seção que passa o fluxo de ar.

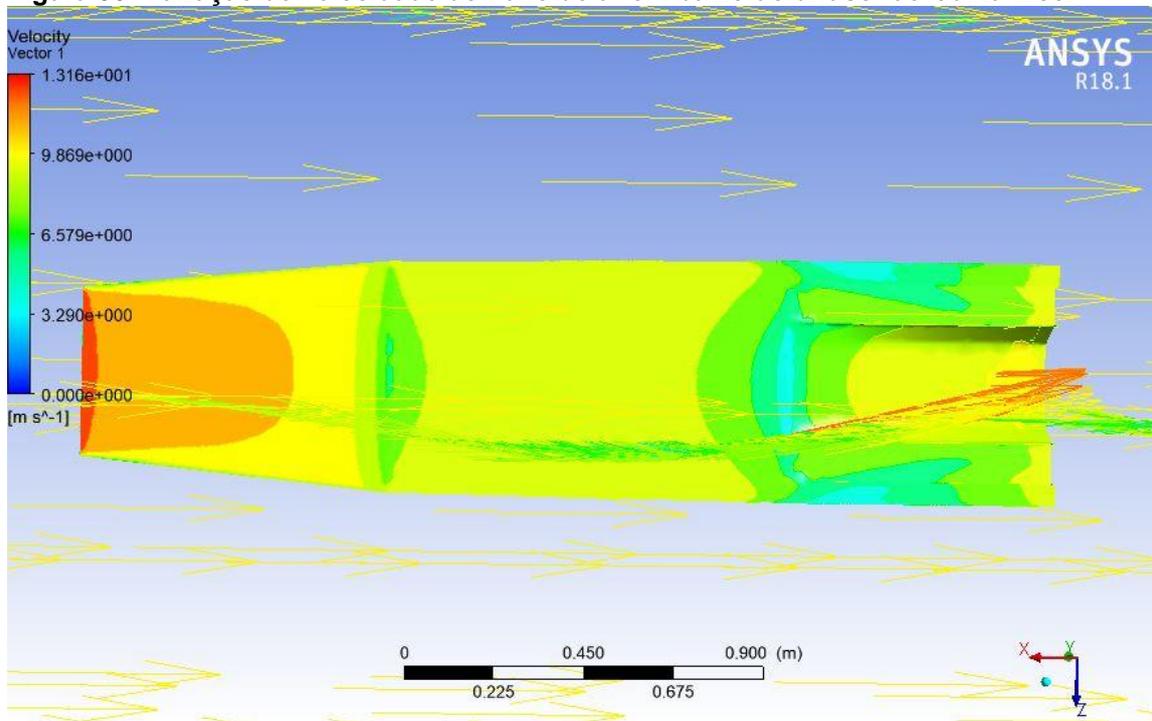
Figura 29: Pressões envolvidas no difusor aerodinâmico.



Fonte: Autoria própria realizada no Ansys® Workbench Fluid Flow (Fluent) v18.1.

Na figura 30, têm-se a representação vetorial da variação da velocidade do fluxo de ar passando por baixo do difusor.

Figura 30: Variação de velocidade do fluxo de ar em baixo do difusor aerodinâmico.



Fonte: Autoria própria realizada no Ansys® Workbench Fluid Flow (Fluent) v18.1.

Assim, as simulações do difusor aerodinâmico retratam fielmente os conceitos físicos tratados no problema aerodinâmico. A partir dessas simulações, foi obtido o valor da magnitude da força de sustentação (F_L) de -16, 526 N.

5.3 SIMULAÇÃO DA PLACA ALETADA

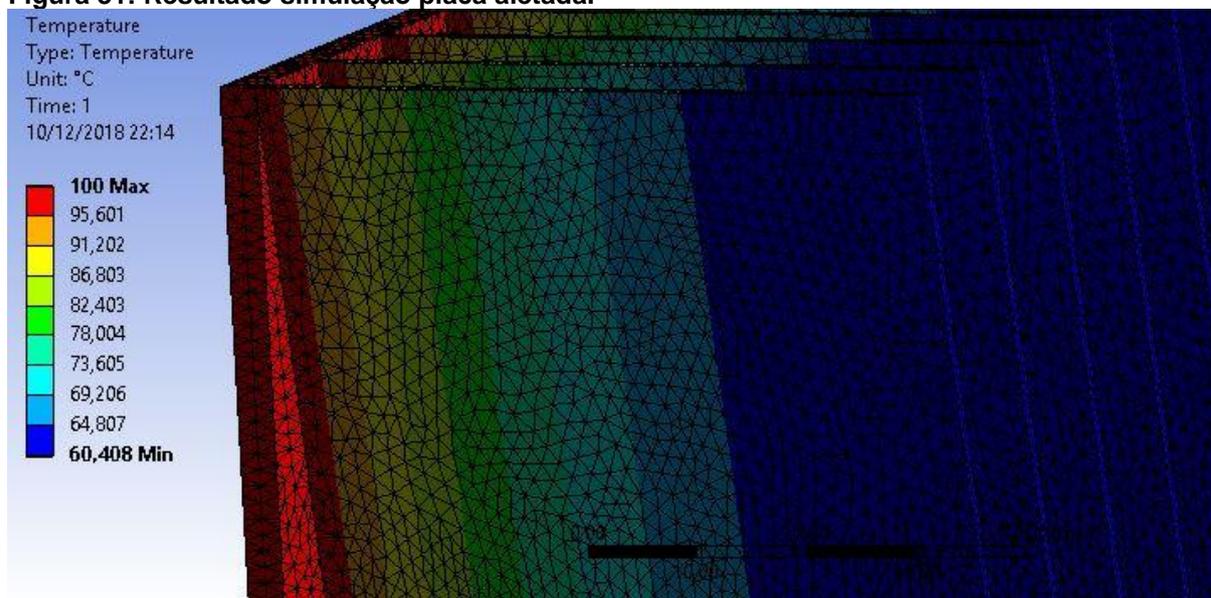
Esse projeto como previamente exemplificado visa a melhora na transferência de calor do inversor de frequência fixado na placa. Por questão da funcionalidade da peça definiu-se os parâmetros de simulação para o projeto que são:

Tabela 5: Parâmetros de simulação placa aletada.

Parâmetros de simulação	
Temperatura máxima de trabalho do inversor (T_{max})	100 °C
Dimensões da placa (x,y,z)	394,33 x 335,15 x 225 mm
Altura das aletas	50 mm
Quantidade de aletas	34 aletas
Espessura das aletas (e_a)	1,0 mm
Material da placa aletada	Alumínio
Coefficiente de convecção (h)	30 W/m ² K
Velocidade do ar entrada (V_{ar})	15 m/s
Temperatura entrada do ar (T_{ar})	30°C

Fonte: Autoria própria.

Como resultado da simulação da placa aletada para a temperatura máxima registrada no inversor foi obtido uma faixa de temperatura que varia entre 100°C à 60,4°C ao longo da placa, o resultado está apresentado da figura 31.

Figura 31: Resultado simulação placa aletada.

Fonte: Autoria própria realizada no Ansys® Workbench Fluid Flow (Fluent) v18.1.

Portanto, o arrefecimento no inversor obteve uma variação de temperatura de 39,6 °C com o rendimento das aletas.

5.4 SIMULAÇÃO DO RADIADOR

O radiador projetado tem como objetivo a melhora no resfriamento dos motores elétricos utilizados no carro. Por questão da funcionalidade da peça definiu-se os parâmetros de simulação para o projeto que são:

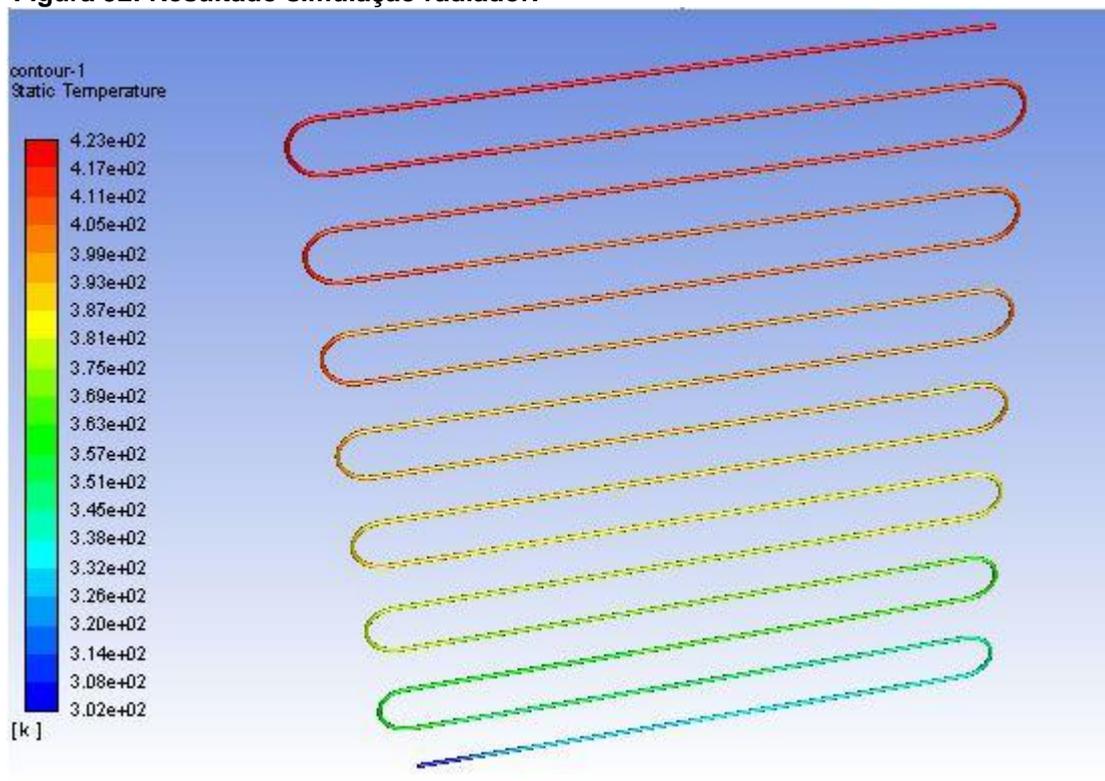
Tabela 6: Parâmetros de simulação radiador.

Parâmetros de projeto	
Temperatura máxima de trabalho do motor (T_{max})	423 K
Número de serpentinas do radiador	15
Fluido de trabalho	Água
Espessura do tubo	2,5 mm
Material do radiador	Alumínio
Velocidade do ar entrada (V_{ar})	15 m/s
Temperatura entrada do ar (T_{ar})	30°C
Temperatura de entrada do fluido de trabalho (T_{fe})	30 °C
Vazão do fluido de trabalho	800 l/h

Fonte: Autoria própria com modelos feitos no Solidworks® v2017.

Como resultado da simulação do radiador para a potência utilizada foi obtido uma faixa de temperatura que varia entre 423 K à 302 K ao longo do radiador, o resultado está apresentado da figura 32.

Figura 32: Resultado simulação radiador.



Fonte: Autoria própria realizada no Ansys® Workbench Fluid Flow (Fluent) v18.1.

Com esses dados, fica claro que o radiador consegue arrefecer o fluxo de água que passa por ele e assim, melhora o funcionamento do motor do carro.

6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi realizado a descrição do projeto aerodinâmico e de arrefecimento para um carro tipo fórmula elétrico de competição.

Foram projetadas peças fundamentais para um carro de alto desempenho, como por exemplo: bico da carenagem, difusor aerodinâmico, sistema de arrefecimento de motores e carenagem traseira.

Como forma de comprovação das propostas realizadas utilizou-se a simulação como parte fundamental dos procedimentos constituintes do projeto. E ela se mostrou muito útil na autenticação dos desenhos realizados.

O *design* do bico da carenagem se mostrou eficiente, pois a condição mínima da força de arrasto foi atendida para o projeto, força de arrasto com magnitude de 6,71 N, portanto seu objetivo conceitual foi atingido uma vez que é capaz de diminuir a resistência do para as condições das provas.

O projeto do difusor foi aprovado como peça fundamental de estabilidade do carro *Force 2*, uma vez que conseguiu magnitudes de força de sustentação adequadas para o projeto, -16,526 N, e as simulações mostraram que o desenho do difusor corresponde fielmente ao que se é esperado em desempenho desta peça aerodinâmica.

As simulações de arrefecimento do inversor obtiveram resultados satisfatórios, uma vez que a placa aletada consegue manter o componente eletrônico, que nela é acoplado, à uma temperatura de trabalho correspondente com as requisitadas pelo equipamento, a diferença de temperaturas foi de aproximadamente 40°C.

A carenagem traseira desenvolvida para o direcionamento de fluxo de ar resultante para a placa aletada é uma peça secundária na aerodinâmica do veículo e se mostra uma ferramenta importante na melhora do desempenho da placa aletada projetada.

O radiador projetado é eficaz no arrefecimento do fluido refrigerante e conseqüentemente na refrigeração dos motores elétricos do veículo, a diferença de temperatura foi de aproximadamente 121 K. Desta forma a eficiência desejada para o carro pode ser atingida.

De acordo com o que foi apresentado neste trabalho todos os projetos realizados obtiveram comprovação matemática para a sua fabricação. Essas peças

automobilísticas irão realizar as funções que lhe foram idealizadas de maneira eficiente e segura durante a competição.

Como sugestão para trabalhos futuros propõe-se:

- O estudo da troca dos materiais dos componentes aerodinâmicos projetados para maior performance;
- O estudo do aumento de eficiência a placa aletada que recebe um fluxo forçado da carenagem traseira;
- O melhoramento dos *designs* por este trabalho apresentado;
- O projeto de asas aerodinâmicas frontais e laterais para o carro;
- O projeto de carenagem lateral para o melhor escoamento de fluxo de ar;
- O projeto de troca do fluido refrigerante do radiador para aumentar a sua eficiência.

REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, Pedro Bazani et al. **Estudo do Comportamento e Desempenho de Aleta Tipo Pino**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE**. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2018. 455 p.

ALVES, Matheus Chimango. **Estudo Aerodinâmico de Asa em Efeito Solo para Gerar Sustentação Usando Ferramentas de Dinâmica de Fluidos Computacional**. 2017. 104 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

THE BYORC TEAM. **Car Aerodynamics Basics and How-To Design Tips**. Disponível em: <<https://www.buildyourownracecar.com/race-car-aerodynamics-basics-and-design/>>. Acesso em: 24 nov. 2018.

CAMPOS, Edwin Ronald Valderrama. **Modelagem do Uso de Nanofluidos no Sistema de Arrefecimento de Motores a Combustão Interna**. 2009. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

COLLINS, Sam. **Wings and things**. Disponível em: <<http://www.racecar-engineering.com/blogs/wings-and-things/>>. Acesso em: 31 maio 2018.

CRUZ, Mariana. **Fórmula SAE Brasil, O que é**. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/formula-sae-brasil>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

DANTAS, André. **Aerodinâmica Sobre Rodas**. Disponível em: <<http://www.autoentusiastasclassic.com.br/2012/05/aerodinamica-sobre-rodas-parte-2.html>>. Acesso em: 31 maio 2018.

FERNIE, Michael. **Drag Coefficients Explained: Which Kind Of Car Is Slippiest?** 2016. Disponível em: <<https://www.carthrottle.com/post/drag-coefficients-explained-which-kind-of-car-is-slippiest/>>. Acesso em: 09 dez. 2018.

FOX, Robert; MCDONALD, Alan; PRITCHARD, Philip. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8. ed. Ltc, 2010.

G. JUNIOR, Celso do Vale; TEIXEIRA, Messias Barbosa; FERREIRA, Vicente. **ESTUDO DA DIMINUIÇÃO DO ARRASTO AERODINÂMICO E DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DE UMA GEOMETRIA VEICULAR**. 2015. Disponível em: <<https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos15/32822383.pdf>>. Acesso em: 01 dez. 2018.

HALL, Nancy. **What is Drag?** 2015. Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/drag1.html>>. Acesso em: 31 maio 2018.

INCROPERA, F.P., BERGMAN, T.L., DEWITT, D.P. (2008), **Fundamentos de transferência de calor e de massa**, 6ª ed., Editora LTC, Rio de Janeiro-RJ, 643p

KATZ, Joseph. **Race Car Aerodynamics: Designing for Speed**. Cambridge: Bentley, 1995.

LEITURAS DE FÍSICA. São Paulo: Gref - Instituto de Física da Usp, 1998.

MAIA, Rangel Silva. **Desenvolvimento de uma metodologia para a análise de aerofólios com aplicação no automobilismo baseada em simulações numéricas**. 2015. 107 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Automotiva, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N.. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2009.

MOREIRA, José R. Simões. **EFICIÊNCIA E EFETIVIDADE DE ALETAS**. 2016. Disponível em: <<http://www.usp.br/sisea/wp-content/uploads/2016/08/Aula-7-Aletas-eficiencia-e-efetividade.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2018.

PALANDI, Joecir et al. **Fluidos Reais e Ideais**. 2010. Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/gef/arquivos/fluidos.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2018.

PICOLO, Ana Paula; BÜHLER, Alexandre Jose; RAMPINELLI, G. A.. An approach to the wind energy as an alternative for teaching topics of classical physics. Jan, 2014.

SCHULZ, Daniel. **Lei Zero da Termodinâmica**. Disponível em:
<https://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/lei_zero.htm>. Acesso em: 06 jun. 2018.

SOLIMAN, Paulo Augusto. **AERODINÂMICA EM FORMULA SAE: PROCESSO DE PROJETO COM FOCO EM DIRIGIBILIDADE**. 2015. 79 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

STILES, Alex. **A few examples of my engineering work**. Disponível em:
<<https://alexstiles.wordpress.com/cad/>>. Acesso em: 06 jun. 2018.

UTFORCE E-RACING (Paraná). **O Carro**. Disponível em:
<http://www.utforce.com.br/#o_carro>. Acesso em: 21 maio 2018.

VERSTEEG, H K; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics**. 2. ed. Glasgow: Bell & Bain Limited, 2007. 503 p. Disponível em:
<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM702/Versteeg_Malalasekera_2ed.pdf>.
Acesso em: 24 nov. 2018

VICENTIM, Joice. **Difusores de Ar Para Carros de Corrida**. 2012. Disponível em:
<<http://murall.com.br/difusores-de-ar-para-carros-um-componente-simples-porem-essencial/>>. Acesso em: 02 dez. 2018.

ANEXO A – Tabela para a determinação do número de Nusselt.

Figura 3333: Tabela de correlação para transferência de calor com fluxo externo.

TABLE 7.9 Summary of convection heat transfer correlations for external flow^{a, b}

Correlation		Geometry	Conditions ^c
$\delta = 5x Re_x^{-1/2}$	(7.19)	Flat plate	Laminar, T_f
$C_{f,x} = 0.664 Re_x^{-1/2}$	(7.20)	Flat plate	Laminar, local, T_f
$Nu_x = 0.332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$	(7.23)	Flat plate	Laminar, local, T_f , $Pr \geq 0.6$
$\delta_t = \delta Pr^{-1/3}$	(7.24)	Flat plate	Laminar, T_f
$\bar{C}_{f,x} = 1.328 Re_x^{-1/2}$	(7.29)	Flat plate	Laminar, average, T_f
$\bar{Nu}_x = 0.664 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$	(7.30)	Flat plate	Laminar, average, T_f , $Pr \geq 0.6$
$Nu_x = 0.565 Pe_x^{1/2}$	(7.32)	Flat plate	Laminar, local, T_f , $Pr \leq 0.05$, $Pe_x \geq 100$
$C_{f,x} = 0.0592 Re_x^{-1/5}$	(7.34)	Flat plate	Turbulent, local, T_f , $Re_x \leq 10^8$
$\delta = 0.37x Re_x^{-1/5}$	(7.35)	Flat plate	Turbulent, T_f , $Re_x \leq 10^8$
$Nu_x = 0.0296 Re_x^{4/5} Pr^{1/3}$	(7.36)	Flat plate	Turbulent, local, T_f , $Re_x \leq 10^8$, $0.6 \leq Pr \leq 60$
$\bar{C}_{f,L} = 0.074 Re_L^{-1/5} - 1742 Re_L^{-1}$	(7.40)	Flat plate	Mixed, average, T_f , $Re_{x,c} = 5 \times 10^5$, $Re_L \leq 10^8$
$\bar{Nu}_L = (0.037 Re_L^{4/5} - 871) Pr^{1/3}$	(7.38)	Flat plate	Mixed, average, T_f , $Re_{x,c} = 5 \times 10^5$, $Re_L \leq 10^8$, $0.6 \leq Pr \leq 60$
$\bar{Nu}_D = C Re_D^m Pr^{1/3}$ (Table 7.2)	(7.52)	Cylinder	Average, T_f , $0.4 \leq Re_D \leq 4 \times 10^5$, $Pr \geq 0.7$
$\bar{Nu}_D = C Re_D^m Pr^n (Pr/Pr_s)^{1/4}$ (Table 7.4)	(7.53)	Cylinder	Average, T_s , $1 \leq Re_D \leq 10^6$, $0.7 \leq Pr \leq 500$
$\bar{Nu}_D = 0.3 + [0.62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3} \times [1 + (0.4/Pr)^{2/3}]^{-1/4}] \times [1 + (Re_D/282,000)^{5/8}]^{4/5}$	(7.54)	Cylinder	Average, T_f , $Re_D Pr \geq 0.2$
$\bar{Nu}_D = 2 + (0.4 Re_D^{1/2} + 0.06 Re_D^{2/3}) Pr^{0.4} \times (\mu/\mu_s)^{1/4}$	(7.56)	Sphere	Average, T_s , $3.5 \leq Re_D \leq 7.6 \times 10^4$, $0.71 \leq Pr \leq 380$
$\bar{Nu}_D = 2 + 0.6 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}$	(7.57)	Falling drop	Average, T_∞
$\bar{Nu}_D = 1.13 C_1 C_2 Re_{D,max}^m Pr^{1/3}$ (Tables 7.5, 7.6)	(7.60), (7.61)	Tube bank ^d	Average, \bar{T}_f , $2000 \leq Re_{D,max} \leq 4 \times 10^4$, $Pr \geq 0.7$
$\bar{Nu}_D = C C_2 Re_{D,max}^m Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{1/4}$ (Tables 7.7, 7.8)	(7.64), (7.65)	Tube bank ^d	Average, \bar{T} , $1000 \leq Re_D \leq 2 \times 10^6$, $0.7 \leq Pr \leq 500$

Fonte: Incropera (2008).

Figura 34: Continuação para tabela de correlação para transferência de calor com fluxo externo.

TABLE 7.9 (Continued)

Correlation		Geometry	Conditions
Single round nozzle	(7.75)	Impinging jet	Average, T_f , $2000 \leq Re \leq 4 \times 10^5$, $2 \leq (H/D) \leq 12$, $2.5 \leq (r/D) \leq 7.5$
Single slot nozzle	(7.79)	Impinging jet	Average, T_f , $3000 \leq Re \leq 9 \times 10^4$, $2 \leq (H/W) \leq 10$, $4 \leq (x/W) \leq 20$
Array of round nozzles	(7.77)	Impinging jet	Average, T_f , $2000 \leq Re \leq 10^5$, $2 \leq (H/D) \leq 12$, $0.004 \leq A_r \leq 0.04$
Array of slot nozzles	(7.81)	Impinging jet	Average, T_f , $1500 \leq Re \leq 4 \times 10^4$, $2 \leq (H/W) \leq 80$, $0.008 \leq A_r \leq 2.5A_{r,o}$
$\bar{\varepsilon}j_H = \bar{\varepsilon}j_m = 2.06Re_D^{-0.575}$	(7.85)	Packed bed of spheres ^d	Average, \bar{T} , $90 \leq Re_D \leq 4000$, Pr (or Sc) ≈ 0.7

^aCorrelations in this table pertain to isothermal surfaces; for special cases involving an unheated starting length or a uniform surface heat flux, see Section 7.2.4 or 7.2.5.

^bWhen the heat and mass transfer analogy is applicable, the corresponding mass transfer correlations may be obtained by replacing Nu and Pr by Sh and Sc , respectively.

^cThe temperature listed under "Conditions" is the temperature at which properties should be evaluated.

^dFor tube banks and packed beds, properties are evaluated at the average fluid temperature, $\bar{T} = (T_i + T_o)/2$, or the average film temperature, $\bar{T}_f = (T_s + \bar{T})/2$.

Fonte: Incropera (2008).