SÉRGIO RODRIGUES DA SILVA

**ESTUDO DA VARIAÇÃO DO NÚMERO DE *SWIRL* EM CABEÇOTE
DE MOTOR DIESEL ATRAVÉS DO MODELAMENTO EM CFD**

São Paulo

2016

SÉRGIO RODRIGUES DA SILVA

**ESTUDO DA VARIAÇÃO DO NÚMERO DE *SWIRL* EM CABEÇOTE DE MOTOR
DIESEL ATRAVÉS DO MODELAMENTO EM CFD**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

Orientador:
Prof. Dr. Marcelo Massarani

São Paulo

2016

SÉRGIO RODRIGUES DA SILVA

**ESTUDO DA VARIAÇÃO DO NÚMERO DE *SWIRL* EM CABEÇOTE DE MOTOR
DIESEL ATRAVÉS DO MODELAMENTO EM CFD**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

Área de concentração:
Engenharia Automotiva

Orientador:
Prof. Dr. Marcelo Massarani

São Paulo

2016

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, dede 20

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

SILVA, SERGIO RODRIGUES DA
ESTUDO DA VARIAÇÃO DO NÚMERO DE SWIRL EM CABEÇOTE DE
MOTOR DIESEL ATRAVÉS DO MODELAMENTO EM CFD / S. R. D. SILVA --
Versão corr. -- São Paulo, 2016.
164 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Centro de Engenharia Automotiva.

1.Engenharia automotiva 2.Motores diesel 3.Geometria e modelagem
computacional I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Centro de
Engenharia Automotiva II.t.

DEDICATÓRIA

Aos meus amados pais por sua incrível capacidade de acreditarem em mim e que,
em alguns momentos, não me permitiram desistir desta caminhada.

À minha esposa, amiga e companheira que sempre me apoiou e abdicou seu tempo
comigo para que esse projeto pudesse ser concluído.

AGRADECIMENTOS

A Deus meu obrigado por tudo.

À empresa que trabalho pela oportunidade que me foi oferecida, tempo e ferramentas disponibilizados para que este trabalho pudesse ser elaborado.

Ao professor Marcelo Massarani, por sua orientação, confiança e toda ajuda prestada na execução deste trabalho.

A toda equipe da USP envolvida no projeto, em especial ao Eduardo Henrique Cruciani, que foi peça chave para o bom desenvolvimento de todos os testes realizados, meu muito obrigado.

Aos amigos de trabalho que durante minha ausência auxiliaram nas atividades do dia-a-dia para que este trabalho pudesse ser concretizado.

EPÍGRAFE

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e faça tudo com muito amor e muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”
(Ayrton Senna)

RESUMO

Este estudo pretende avaliar, através de simulações em *Computational Fluid Dynamics* (CFD), o comportamento do ar frio no interior da câmara de combustão com foco no movimento denominado *Swirl*. Testes computacionais no cabeçote de um motor de ignição por compressão foram realizados nos quais deslocamentos hipotéticos dos dutos de admissão foram impostos. Posteriormente foram realizadas análises na alteração do número de *Swirl* e comparados com o comportamento padrão esperado pelo cabeçote. Os resultados indicaram que o *Swirl* é sensivelmente alterado dependendo do sentido de deslocamento bem como que deslocamentos no eixo cartesiano x são mais impactantes do que deslocamentos no eixo y. Observou-se também, que diferenças expressivas no comportamento do ar ocorrem após a abertura de 73,33% da válvula de admissão. Nas conclusões são apresentados os efeitos causados pelo deslocamento dos dutos de admissão, pontos fortes e fracos deste trabalho e uma breve lista de possíveis desdobramentos desse estudo.

Palavras-chave: *Swirl*, simulações em CFD, fluxo de ar de admissão.

ABSTRACT

This research evaluates, by Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation, the cold air behaviour inside the combustion chamber with focus on a movement named *Swirl*. Virtual tests were performed on an ignition compression engine overhead where hypothetical shifts on the air intake ducts were imposed. After that analysis were done in the *Swirl* changes and compared with expected pattern. The results indicated that *Swirl* is significantly changed depending on the direction of displacement as well as displacements on Cartesian axle x are more expressive than displacements on axle y. It was also observed more expressive changes in air behaviour after valve lifting of 73,33%. In the conclusions are presented the effects caused by displacement on the air intake ducts, strengths and weakness of this research and a list of possible research deployment.

Keywords: *Swirl*, CFD simulation, air intake flow.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama esquemático de <i>Swirl</i>	23
Figura 2 - Esquematisação do <i>Tumble</i> causado pelo <i>Squish</i> próximo ao PMS	24
Figura 3 - Dois diferentes formatos de pórticos que promovem <i>Swirl</i> , sendo (a) pórtico tangencial e (b) pórtico helicoidal	25
Figura 4 - Pistão com cavidade (a) e sede de válvula modificada (b)	25
Figura 5 - Exemplo de pré-câmara	26
Figura 6 - Diagrama esquemático do medidor de <i>Swirl</i>	29
Figura 7 - Equipamento para ensaios PIV	32
Figura 8 - Exemplo de resultado gerado pelo ensaio em PIV	33
Figura 9 - Formatos de cavidade de pistão e domínio computacional	44
Figura 10 - Refinamentos de malha de acordo com a complexidade da região.....	47
Figura 11 - Malha representando o domínio computacional simulado	48
Figura 12 - Malha volumétrica aplicada em motor completo	51
Figura 13 - Perfis de velocidades obtidos através da abordagem RANS	52
Figura 14 - Perfis de velocidade obtidos na abordagem LES	52
Figura 15 - Perfis de velocidade obtidos na abordagem híbrida	53
Figura 16 - Vista superior do volume interno dos dutos de admissão	55
Figura 17 - Representação esquemática do projeto do cabeçote	56
Figura 18 - Fluxograma com as tarefas de pré-processamento	58
Figura 19 - Geometria do volume interno do cabeçote sem os dutos de exaustão...	59

Figura 20 - Geometria dos dutos de admissão.....	61
Figura 21 - Sombra da região próxima ao assento da válvula de admissão	62
Figura 22 - Detalhe da malha superficial gerada automaticamente pelo Star CCM+	62
Figura 23 - Malha volumétrica com diferentes regiões de controle	64
Figura 24 - Três camadas prismáticas geradas na região próxima às paredes do duto	65
Figura 25 - Seis camadas prismáticas geradas na região próxima às paredes do cilindro	66
Figura 26 - Condições de contorno	68
Figura 27 - Gráfico indicando convergência dos resultados.....	70
Figura 28 - Faces de medição.....	71
Figura 29 - Vista explodida dos diferentes corpos do modelo	72
Figura 30 - Cabeçote sem deslocamento dos dutos	75
Figura 31 - Resultado obtido pelo ensaio PIV para a abertura de válvula de 46,67% na face 1,2 D	76
Figura 32 - Vetores de velocidades na face 1,2 D obtido na simulação em CFD para abertura de válvula de 46,67%.....	77
Figura 33 - Resultado obtido pelo PIV para abertura de válvula = 100% na face 1,2 D	78
Figura 34 - Vetores de velocidades na face 1,2 D obtido na simulação em CFD para a abertura de válvula de 100%.....	78
Figura 35 - Gráfico do <i>Swirl</i> pontual no teste 1	79
Figura 36 - Velocidades do ar dentro da câmara de admissão obtidos no teste 1	80

Figura 37 - Deslocamento em $x = 2,5\%$ nos dutos curvo e reto.....	81
Figura 38 - Vetores de velocidade obtidos no teste 2 para abertura de 46,67% na face 1,2 D.....	82
Figura 39 - Gráfico do <i>Swirl</i> pontual do teste 2	83
Figura 40 - Comparação entre o teste 1 e 2 do fluxo do ar na região do assento da válvula para abertura de válvula igual a 73,33%	84
Figura 41 - Velocidades do ar dentro da câmara de admissão obtidos no teste 2	85
Figura 42 - Deslocamento nos dutos curvo e reto avaliado pelo teste 3	86
Figura 43 - Gráfico do <i>Swirl</i> pontual do teste 3	86
Figura 44 - Comparação entre o teste 1 e 3 do fluxo do ar na região do assento da válvula para abertura de 100%.....	87
Figura 45 - Velocidades do ar dentro da câmara de admissão obtidos no teste 3	88
Figura 46 - Deslocamento nos dutos curvo e reto avaliado pelo teste 4	89
Figura 47 - Deslocamento nos dutos curvo e reto avaliado pelo teste 5	89
Figura 48 - Gráfico do <i>Swirl</i> pontual do teste 1	90
Figura 49 - Gráfico do <i>Swirl</i> pontual do teste 4	90
Figura 50 - Gráfico do <i>Swirl</i> pontual do teste 5	91
Figura 51 - Vetores de velocidade do teste 4 para abertura em 100% na face 1,2 D92	
Figura 52 - Vetores de velocidade do teste 4 para abertura em 100% na face 1,2 D92	
Figura 53 - Deslocamentos nos dutos curvo e reto avaliado pelo teste 6	93
Figura 54 - Vetores de velocidade do teste 6 para abertura de válvula em 100% na face 1,2 D.....	94

Figura 55 - Deslocamentos nos dutos curvo e reto avaliados pelo teste 7	95
Figura 56 - Vetores de velocidade obtidos no teste 7 para abertura de 100% na face 1,2 D.....	95
Figura 57 - Comparação entre o teste 1, 2 e 7 do fluxo do ar na região do assento da válvula para abertura da válvula em 73,33%.....	96
Figura 58 - Deslocamentos nos dutos curvo e reto avaliado pelo teste 8	97
Figura 59 - Vetores de velocidade do teste 3 para abertura da válvula em 73,33% na face 1,2 D.....	97
Figura 60 - Vetores de velocidade do teste 8 para abertura da válvula em 73,33% na face 1,2 D.....	98
Figura 61 - Gráfico do <i>Swirl</i> pontual do teste 8	98
Figura 62 - Deslocamento nos dutos curvo e reto avaliado pelo teste 9	99
Figura 63 - Deslocamento nos dutos curvo e reto avaliado pelo teste 10	99
Figura 64 - Ilustração de uma célula de medição.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variações de posição avaliadas no trabalho de pesquisa	57
Tabela 2 - Dados de entrada da simulação.....	58
Tabela 3 - Resumo dos resultados obtidos	100
Tabela 4 - Grau de relevância de cada teste avaliado	101
Tabela 5 - Mapa de variação do <i>Swirl</i> conforme deslocamento dos dutos	104
Tabela 6 - Cálculo do <i>Swirl</i> médio do teste 1	111
Tabela 7 - Cálculo do <i>Swirl</i> médio do teste 2	116
Tabela 8 - Cálculo de <i>Swirl</i> médio do teste 3	121
Tabela 9 - Cálculo do <i>Swirl</i> médio do teste 4	126
Tabela 10 - Cálculo do <i>Swirl</i> médio do teste 5	131
Tabela 11 - Cálculo do <i>Swirl</i> médio do teste 6	138
Tabela 12 - Cálculo do <i>Swirl</i> médio do teste 7	145
Tabela 13 - Cálculo do <i>Swirl</i> médio do teste 8	150
Tabela 14 - Cálculo do <i>Swirl</i> médio do teste 9	155
Tabela 15 - Cálculo do <i>Swirl</i> médio do teste 10	160

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFD	Computational Fluid Dynamics
Cs	Coeficiente de <i>Swirl</i>
Csm	Coeficiente de <i>Swirl</i> médio
EGR	<i>Exhausting Gas Recirculation</i>
HC	Hidrocarbonetos
IVC	<i>Inlet Valve Close</i>
IVO	<i>Inlet Valve Open</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
MIC	Motores de Ignição por Compressão
MP	Material Particulado
NOx	Óxidos de Nitrogênio
PIV	<i>Particle Image Velocimetry</i>
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
PRONCOVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
RANS	<i>Reynolds Average Navier Stokes</i>
SCR	<i>Selective Catalytic Reduction</i>
VSE	Vale Soluções em Energia

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivos: geral e específicos	19
2. SWIRL	22
2.1 Movimentação dos gases de admissão	22
2.2 Métodos de geração de <i>Swirl</i>	25
2.3 Efeitos do <i>Swirl</i>	27
2.4 Métodos de medição de <i>Swirl</i>	28
3. FUNDAMENTOS DE CFD	37
3.1 Simulação de <i>Swirl</i> através de CFD	42
4. PROCEDIMENTO PARA MODELAGEM DO CABEÇOTE EM CFD	54
4.1 Fluxo de processo para o desenvolvimento da simulação	58
4.2 Extração do volume interno do cabeçote	59
4.3 Geração de malha	60
4.3.1 Malha superficial	62
4.3.2 Malha volumétrica	63
4.3.3 Malha nas regiões da camada limite	65
4.4 Definição da modelagem física	66
4.5 Condições de contorno	67
4.6 Avaliações preliminares	69
4.7 Automação do modelo numérico	72
4.8 Obtenção do número de <i>Swirl</i> médio	73
5. RESULTADOS	75
5.1 Análise dos resultados	102
5.2 Aplicabilidade do estudo	102

6. CONCLUSÕES.....	105
7. TRABALHOS FUTUROS.....	107
REFERÊNCIAS	108
APÊNDICE A – PLANILHA DE CÁLCULO DO <i>SWIRL</i> MÉDIO DO TESTE 1	111
APÊNDICE B – PLANILHA DE CÁLCULO DO <i>SWIRL</i> MÉDIO DO TESTE 2	116
APÊNDICE C – PLANILHA DE CÁLCULO DO <i>SWIRL</i> MÉDIO DO TESTE 3	121
APÊNDICE D – PLANILHA DE CÁLCULO DO <i>SWIRL</i> MÉDIO DO TESTE 4	126
APÊNDICE E – PLANILHA DE CÁLCULO DO <i>SWIRL</i> MÉDIO DO TESTE 5.....	131
APÊNDICE F – PLANILHA DE CÁLCULO DO <i>SWIRL</i> MÉDIO DO TESTE 6.....	138
APÊNDICE G – PLANILHA DE CÁLCULO DO <i>SWIRL</i> MÉDIO DO TESTE 7	145
APÊNDICE H – PLANILHA DE CÁLCULO DO <i>SWIRL</i> MÉDIO DO TESTE 8	150
APÊNDICE I – PLANILHA DE CÁLCULO DO <i>SWIRL</i> MÉDIO DO TESTE 9.....	155
APÊNDICE J – PLANILHA DE CÁLCULO DO <i>SWIRL</i> MÉDIO DO TESTE 10.....	160

1. INTRODUÇÃO

A turbulência do ar dentro de uma câmara de combustão de Motores de Ignição por Compressão (MIC), também chamado de *Swirl* é um parâmetro importante que influencia diretamente na eficiência do processo de combustão e, conseqüentemente, na emissão de poluentes para atmosfera e eficiência do motor (HEYWOOD, 1989).

A definição de um número de *Swirl* adequado para determinado tipo de cabeçote pode colaborar na redução da emissão de poluentes e no desenvolvimento de motores mais potentes e econômicos, sendo este hoje, um dos grandes desafios enfrentados pelas indústrias fabricantes de MIC, cuja principal desvantagem, é o fato de que a queima de seu combustível gera, entre outros, Óxidos de Nitrogênio (NOx), Material Particulado (MP) e Hidrocarbonetos (HC).

A formação de NOx ocorre devido as altas temperaturas que o ar pode atingir dentro da câmara de combustão na fase de compressão e também devido a não uniformidade dessas temperaturas. Estudos indicam que há maior formação desse poluente nas regiões onde a mistura ar-combustível está próxima a estequiométrica (PULKRABEK, 1997).

Já a formação de MP ocorre em regiões onde não ocorre a queima desejada de combustível injetado, ou seja, é a fuligem derivada de uma má queima do combustível. A temperatura do ar comprimido no interior da câmara de combustão também interfere diretamente na qualidade da queima contribuindo para a formação de MP em regiões onde o ar não atinge temperaturas adequadas para abatimento completo do combustível (PULKRABEK, 1997).

A formação de HC origina-se em regiões da câmara de combustão onde a chama realmente se apaga, ou seja, é um poluente gerado através da reação química de combustível não queimado (PULKRABEK, 1997).

As legislações ambientais impõem regras cada vez mais restritivas em relação a emissões de poluentes exigindo dos fabricantes de MIC o desenvolvimento de métodos para o controle de emissão de poluentes.

Atualmente a tecnologia mais conhecida para este controle consiste em promover o abatimento dos poluentes.

Uma das formas de abatimento de poluentes consiste no pós-tratamento dos gases oriundos da câmara de combustão, cujo método é conhecido por *Selective Catalytic Reduction* (SCR), no qual ocorre a injeção de ureia nos gases de escape com posterior catalisação dessa mistura.

Outro método de pós-tratamento, denominado *Exhausting Gas Recirculation* (EGR), promove a recirculação dos gases de escape melhorando qualitativamente o poluente emitido na atmosfera.

Há também esforços voltados ao pré-tratamento do processo de combustão, no qual o objetivo é a melhoria da mistura ar-combustível através de mudanças no método de injeção do combustível ou através da geração de turbulência do ar de admissão que é o foco principal deste estudo.

1.1 Objetivos: geral e específicos

Este estudo tem como objetivo a obtenção do número de *Swirl* através da simulação de cabeçotes de MIC, também denominados motores diesel, através de *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

Pretende-se variar a posição geométrica dos dutos de admissão do cabeçote em estudo e com isso observar e analisar o impacto no número de *Swirl*.

O resultado deste estudo poderá colaborar tanto no desenvolvimento de novos produtos quanto no controle do processo de fabricação e montagem do cabeçote.

Será possível sugerir uma técnica e/ou processo que ajude, através da simulação, a delimitar as tolerâncias geométricas de projeto de cabeçotes de MIC tomando como base a verificação do número de *Swirl* obtido com a variação dos parâmetros geométricos de posição.

Para se atingir tal objetivo, serão feitas simulações numéricas em CFD de um cabeçote, com base em seu projeto original, para representar o comportamento do ar na fase de admissão.

Posteriormente serão impostas variações hipotéticas de posição geométrica dos dutos de admissão e os modelos serão simulados novamente.

Os resultados obtidos possibilitarão analisar possíveis mudanças de comportamento no movimento do ar no interior da câmara de combustão e, portanto, ajudarão a prever impactos no funcionamento do motor quando este estiver em operação.

Os objetivos específicos deste estudo são:

- Estudo da teoria do CFD para compreensão da técnica e suas possíveis limitações.
- Estudo do fenômeno *Swirl* e sua relação com a eficiência da queima de combustível.
- Modelagem de cabeçote na condição de projeto para entender o número de *Swirl* teórico que pode ser obtido num determinado modelo de cabeçote.
- Validação do resultado teórico através do ensaio denominado *Particle Image Velocimetry* (PIV) cujo conceito será descrito posteriormente e também através de padrões aceitos pela montadora.
- Modelagem de cabeçotes hipoteticamente alterados, ou seja, com variação de posição geométrica dos dutos de admissão acima e no limite das tolerâncias de projeto, para assim avaliar as mudanças no comportamento do ar e consequentemente no número de *Swirl*.
- Efetuar uma análise crítica dos resultados obtidos visando garantir que o número de *Swirl* e o comportamento do ar esperado no interior da câmara de admissão estejam dentro de limites adequados para um bom desempenho do motor.

O estudo será realizado com base no cabeçote do motor de uma montadora com filial no Brasil que tem como característica principal a injeção de combustível realizada por injetores montados em sistema *common rail* e que, por sua vez, injeta combustível na câmara de combustão sob alta pressão.

Tal cabeçote é usado para atender as atuais normas Euro 5 e Euro 6, que são normas europeias que limitam a emissão de poluentes na atmosfera em vários países do mundo e que possuem correlação no Brasil com o Programa de Controle

da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PRONCOVE) através fases P7 e P8, respectivamente (SEMINÁRIO SOBRE EMISSÕES DE VEÍCULOS DIESEL, 2009).

Será apresentado no capítulo 2 uma introdução ao movimento denominado *Swirl* e sua importância nos motores de combustão interna, também será apresentado alguns métodos de cálculo para obtenção do número de *Swirl*.

No capítulo 3 serão apresentados os fundamentos básicos de CFD e como essa técnica colabora com a mecânica dos fluidos.

Em seguida, no capítulo 4, será descrito o passo a passo da modelagem CFD do cabeçote bem como os parâmetros adotados para a simulação virtual e a quantidade de testes realizados.

No capítulo 5 serão apresentados os resultados obtidos bem como uma análise crítica do comportamento de cada teste realizado.

No capítulo 6, serão apresentadas as conclusões com indicação de pontos fortes e fracos do estudo.

No capítulo 7 algumas propostas para trabalhos futuros serão apresentadas.

2. SWIRL

2.1 Movimentação dos gases de admissão

Este capítulo apresenta sobre o movimento do ar em uma câmara de combustão e suas consequências.

Pretende-se montar, com base em estudos anteriores, uma base de informações a serem utilizadas neste estudo.

O movimento dos gases dentro de uma câmara de combustão é um processo importante que ocorre em um motor de combustão interna. A intensidade ou ausência desse movimento afeta, significativamente, a mistura do ar com o combustível dentro de uma câmara de combustão. Isso afeta diretamente a eficiência da combustão e, conseqüentemente, a geração de gases de escape e eficiência do motor (PULKRABEK, 1997).

HEYWOOD (1989), comenta que o movimento dos gases dentro da câmara de admissão é um dos principais fatores que controlam a combustão e que tal movimento tem impacto significativo sobre a transferência de calor.

Ainda de acordo com HEYWOOD (1989) o ar de admissão se encontra em regime turbulento controlando o processo de combustão e tais movimentos do ar são importantes tanto em Motores de Ignição por Faísca (MIF) quanto em MIC.

O movimento do ar é modificado conforme passa pelos dutos de entrada, pórticos de admissão, válvulas, paredes do cilindro, cavidades do pistão e também durante o processo de compressão. Portanto, a geometria desses componentes do motor tem uma relação direta com o comportamento do ar dentro da câmara de admissão (HEYWOOD 1989).

As altas taxas de turbulência do ar de admissão associadas a geometrias de dutos que fornecem ao ar um momento angular em relação à câmara de combustão geram um movimento rotacional conhecido como *Swirl*, conforme apresentado esquematicamente pela figura 1.

Figura 1 - Diagrama esquemático de *Swirl*

Fonte: Pulkrabek (1997)

O movimento rotacional tende a reduzir de intensidade ao percorrer o volume da câmara de combustão devido ao atrito gerado pelas paredes da câmara. Porém, tal movimento se mantém durante a fase de compressão de forma que, em MIC, promove uma mistura homogênea de combustível e, em MIF, acelera o processo de queima do combustível devido ao acréscimo de temperatura gerado pelo atrito (HEYWOOD, 1989).

A geração de *Swirl* está relacionada com o formato dos dutos de admissão, porém, sua intensidade pode ser aumentada durante o ciclo de compressão do motor. Na verdade, o movimento do ar sofre alterações durante as diferentes fases do motor (PULKRABEK, 1997).

Durante a fase de admissão o *Swirl* se aproxima de zero nas regiões próximas ao Ponto Morto Inferior (PMI) e volta a ganhar intensidade atingindo seu máximo na região do Ponto Morto Superior (PMS), onde ocorre a combustão que, por sua vez,

diminui a intensidade do *Swirl* na fase de expansão dos gases de combustão (PULKRABEK, 1997).

Além do *Swirl*, dois outros movimentos do ar ocorrem dentro da câmara de admissão. São eles o *Squish* e o *Tumble*.

O movimento denominado *Squish* ocorre quando o pistão se encontra próximo ao PMS e trata-se de um movimento radial ao *Swirl*. Sua existência gera um movimento rotacional secundário conhecido por *Tumble*, conforme apresentado pela figura 2 (PULKRABEK, 1997).

Figura 2 - Esquematização do *Tumble* causado pelo *Squish* próximo ao PMS

Fonte: Pulkrabek (1997)

Tanto o sentido de giro quanto a intensidade de *Squish* e variam de acordo com o tipo de pistão, ou seja, se possuem ou não cavidades e formato da câmara de combustão (HEYWOOD, 1989).

Ambos os movimentos têm como principal função manter o ar em regime turbulento de forma a promover uma melhor mistura do ar-combustível e, conseqüentemente, melhorar queima do combustível (PULKRABEK, 1997).

2.2 Métodos de geração de *Swirl*

De acordo com HEYWOOD (1989) os métodos utilizados para se gerar *Swirl* em motores de combustão interna consistem, geralmente, em construir dutos e pórticos de admissão com curvaturas que permitam o giro do ar, ou seja, que permitam que o ar adentre a câmara de combustão com velocidade tangencial conforme apresentado pela figura 3.

Figura 3 - Dois diferentes formatos de pórticos que promovem *Swirl*, sendo (a) pórtico tangencial e (b) pórtico helicoidal

Fonte: Adaptado de Heywood (1989)

Modificações da sede de válvulas e cavidades no pistão também são outras formas de se gerar *Swirl* em câmaras de combustão, conforme apresentado pela figura 4, sendo que esta última promove giro durante a fase de compressão do ar, auxiliando também a formação de *Squish* e *Tumble* (HEYWOOD, 1989).

Figura 4 - Pistão com cavidade (a) e sede de válvula modificada (b)

Fonte: Adaptado de Heywood (1989)

Para MIC de pequeno porte e altas faixas de rotação existe também a possibilidade de uso de uma pequena câmara de combustão auxiliar, a chamada pré-câmara que fica conectada com a câmara de combustão principal através de um pequeno orifício conforme apresentado pela figura 5.

Figura 5 - Exemplo de pré-câmara

Fonte: Adaptado de Heywood (1989)

A função da pré-câmara é promover a turbulência do ar durante a fase de compressão o mesmo encontra a sua frente uma restrição aumentando a velocidade ao penetrar tangencialmente a pré-câmara. Dessa forma o ar entra em regime turbulento e gira, promovendo uma melhor mistura entre ar e combustível (HEYWOOD, 1989).

As alterações no movimento do ar em função do formato de dutos e pistão foi estudada, por exemplo, por GAFOOR e GUPTA (2015) que conduziram um experimento considerando a variação tanto do *Swirl* inicial gerado de pórtico de admissão, quanto pela variação gerada pela cavidade no pistão.

O experimento indicou que a variação em conjunto de ambas as geometrias se mostrou muito mais eficaz do que a variação de somente um desses parâmetros geométricos sugerindo uma separação entre o *Swirl* gerado pelos pórticos de admissão e o *Swirl* gerado pela cavidade do pistão devido a clara distinção à forma pelas quais são gerados (GAFOOR; GUPTA, 2015).

2.3 Efeitos do *Swirl*

Gerar *Swirl* dentro de um motor de combustão interna melhora a mistura do ar com o combustível. Em motor diesel quanto melhor for essa mistura maior é a probabilidade de se obter uma queima homogênea de combustível. Tal fato pode influir positiva ou negativamente na quantidade de material particulado (MP) e óxidos de nitrogênio (NOx) que se formam dentro da câmara de combustão. Ambas as partículas são as grandes desvantagens que um motor diesel apresenta, pois, são considerados poluentes que mais agredem o meio ambiente (LEE et al, 2008).

Em outro estudo, JEBAMANI e KUMAR (2008) defendem que a quantidade de *Swirl* a ser gerada em motor diesel deve variar de acordo com as condições de carga e velocidade do motor. Seus estudos apontam que gerar um alto grau de *Swirl* promove também aumento na temperatura dos gases dentro da câmara de combustão o que tende a aumentar a geração de NOx se este estiver operando em altas rotações. Por outro lado, quando o motor está em baixas rotações promover *Swirl* dentro da câmara de combustão passa a ser importante, pois, a mistura homogênea de ar-combustível reduz a formação de MP devido à elevação da temperatura dos gases, fato este que melhora a queima e aumenta a eficiência térmica do motor.

Em PRASAD e SHARMA (2010) foi identificado que a razão *Swirl* não impactou tanto quanto se era esperado na redução da emissão de poluentes. De fato, foi evidenciado que uma somatória de modificações influenciou na redução de poluentes. Dentre as modificações estavam, os pórticos de admissão, o formato da cavidade do pistão e dos bicos injetores.

Em SREENIVASULU et al. (2012) foi identificado, através de simulações em CFD, a influência do coeficiente de *Swirl* na injeção de diesel dentro da câmara e no processo de combustão.

Foram adotadas seis faixas de coeficiente de *Swirl* (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0 e 4,0) e avaliado o resultado dessa variação no número de *Swirl* no:

- Comportamento da pressão do ar na câmara de combustão;
- Faixa de temperatura;

- Comprimento de penetração do jato de diesel.

A conclusão foi de que o pico de pressão do ar na câmara de admissão foi encontrado com o coeficiente *Swirl* de 1,5 indicando que nesta faixa ocorreu a melhor mistura entre ar e combustível, porém, nesta mesma faixa de coeficiente *Swirl* também foi identificado um aumento nos níveis de NOx, tornando a faixa inviável do ponto de vista de emissões.

A faixa subsequente, de *Swirl* 2,0, apresentou um resultado mais satisfatório em relação aos níveis de NOx e também indicando boa mistura entre ar e combustível, sugerindo assim a faixa ideal de coeficiente de *Swirl* para o motor avaliado.

2.4 Métodos de medição de *Swirl*

É complicado medir a turbulência e, conseqüentemente, o *Swirl* que está sendo gerado por um motor em operação, por isso, geralmente um método experimental é utilizado (HEYWOOD, 1989).

O método mais comumente utilizado é denominado experimento da vazão estática. Neste método, um cabeçote padrão é montado sobre um duto com dimensões similares ao cilindro real com um sensor no final do duto.

O experimento consiste em insuflar ar no pórtyco de admissão do cabeçote que está sendo experimentado. A válvula de admissão é mantida aberta em determinado levantamento permitindo a entrada do ar no equipamento.

De acordo com HEYWOOD (1989), o ar em regime turbulento passa então por um sensor que tem características construtivas similares a de um favo de mel ou em formato de pás. O ar turbulento gera uma velocidade tangencial em relação as paredes do cilindro ao passar pelo sensor, gerando um torque através de sua rotação. Conhecendo-se as dimensões do equipamento que simula a câmara de combustão, a velocidade do ar que está sendo admitido e o torque gerado pelo sensor é possível calcular um coeficiente adimensional denominado Coeficiente de *Swirl* (Cs).

É possível observar uma ilustração esquemática do método experimental apresentado através da figura 6.

Figura 6 - Diagrama esquemático do medidor de *Swirl*

Fonte: Heywood (1989)

No experimento da vazão estática o C_s pode ser descrito pela equação 2.1, quando utilizado um sensor especial para medição do torque (HEYWOOD, 1989):

$$C_s = \frac{8.T}{\dot{m}.v_0.B} \quad (2.1)$$

No qual:

C_s = Coeficiente de *Swirl*;

T = Torque aplicado sobre o favo;

$\dot{m}$ = Vazão em massa de ar;

v_0 = Velocidade característica do ar;

B = Diâmetro do cilindro.

A velocidade característica do ar pode ser obtida pela da avaliação da queda de pressão observada através da válvula.

Para fluidos incompressíveis pode-se adotar a equação:

$$v_0 = \left[\frac{2 \cdot (p_0 - p_c)}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

E para fluidos compressíveis:

$$v_0 = \left\{ \frac{2 \cdot \gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{p_0}{\rho_0} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_c}{p_0} \right)^{(\gamma - 1)/\gamma} \right] \right\}^{1/2} \quad (2.3)$$

No qual:

v_0 = Velocidade característica do ar;

p_0 = Pressão de estagnação na entrada da válvula;

p_c = Pressão dentro do cilindro;

ρ = Densidade do fluido;

γ = Constante adiabática do fluido. Em geral $\gamma = 1,4$ para o ar nas condições atmosféricas.

Esse método apresentado é válido para um procedimento experimental que ocorre em uma situação estática e serve para prever o coeficiente de *Swirl* gerado pelos dutos de admissão de um cabeçote, mas, importante ressaltar que o coeficiente de *Swirl* pode variar significativamente em um motor real, pois, nesta situação o fluxo não é estável e sofre forte alteração durante o ciclo de compressão do motor (HEYWOOD, 1989).

O medidor de torque do Cs pode ser dotado de um formato diferente, através de pás, no qual, ao invés de se utilizar um medidor com formato de favo de mel no final do cilindro que simula a câmara, faz-se uso de um conjunto de pás. A diferença entre o primeiro modelo de medidor de *Swirl* e o segundo é que neste é possível

medir a velocidade angular das pás ao invés do torque exercido nas paredes do favo (HEYWOOD, 1989).

No caso do rotor de pás o C_s é definido por:

$$C_s = \frac{\omega_p \cdot B}{v_0} \quad (2.4)$$

No qual:

C_s = Coeficiente de *Swirl*;

ω_p = Velocidade angular do rotor de pás;

B = Diâmetro do cilindro;

v_0 = Velocidade característica do ar.

Outro experimento que tem larga utilização para medição do *Swirl* gerado dentro de uma câmara de combustão é com o uso de equipamentos que realizam ensaios através da técnica do PIV.

Esse equipamento tem características construtivas mais complexas do que o medidor de *Swirl*, porém, fornece informações mais detalhadas como, por exemplo, comportamento do ar em diferentes seções do duto experimental.

O ensaio em PIV é uma técnica óptica que mede simultaneamente três componentes vetoriais de velocidade sobre uma área bidimensional (LAVISION, 2016).

Durante o experimento pequenas partículas que reagem à luz são adicionadas na região a ser experimentada, o ar é então insuflado através do cabeçote para dentro de um cilindro transparente que simula a câmara de combustão. Enquanto isso câmeras localizadas do lado externo captam as imagens em diferentes intervalos de tempo e as enviam para um software que, por sua vez, correlacionam a sequência de imagens com as velocidades vetoriais do ar dentro do cilindro transparente (LAVISION, 2016).

Uma representação esquemática do ensaio PIV é apresentado pela figura 7.

Figura 7 - Equipamento para ensaios PIV

Fonte: Lavision (2016)

Os passos de execução do experimento são muito similares ao realizado no medidor de *Swirl*, ou seja, fixa-se uma abertura de válvula e então o ar é insuflado para dentro do cabeçote. As dimensões do cilindro que simulam a câmara de combustão também devem ser similares ao cilindro real do motor para que os resultados sejam mais próximos possíveis aos reais.

Experimentos desse tipo são interessantes, pois, funcionam não como um substituto ao medidor de *Swirl*, mas, sim como um meio de validar as medições realizadas por essas máquinas bem como simulações realizadas por CFD.

O cabeçote que será simulado numericamente por CFD neste estudo foi anteriormente ensaiado pela técnica do PIV através de uma máquina instalada na Vale Soluções em Energia (VSE).

O resultado tipicamente obtido pela técnica PIV pode ser observado na figura 8.

Figura 8 - Exemplo de resultado gerado pelo ensaio em PIV

Fonte: VSE (2013)

Neste caso específico, o comportamento do ar pode ser observado em uma determinada seção do cilindro transparente. Nota-se que o ar assume um determinado sentido vetorial indicando que o ar forma um movimento espiral dentro do cilindro. Os eixos x e y representam a posição geométrica do cilindro que possui diâmetro de 131 mm.

No experimento realizado pelo ensaio em PIV, basicamente o que se extrai são as velocidades vetoriais X , Y e Z . Logo, é através desses valores de velocidades que se extrai o número de *Swirl* (LAVISION, 2016).

A montadora, cujo cabeçote será avaliado neste estudo, possui uma máquina medidora de *Swirl* que evoluiu ao longo dos anos. Iniciou-se com um rotor de pás e atualmente é feita com base no favo de mel.

Na realização de experimentos internos a montadora em questão usa, atualmente, a seguinte definição de C_s :

$$C_S = \frac{n_D}{n} \quad (2.5)$$

No qual n_D é a velocidade tangencial do *Swirl* e n é a rotação do virabrequim que produz uma determinada velocidade média do pistão.

É possível correlacionar a velocidade tangencial do *Swirl* com o torque que este gera no medidor de *Swirl*, logo a definição de *Swirl* assume a seguinte forma:

$$C_S = \frac{n_D}{n} = \frac{2.S.M.\rho_1}{\dot{m}^2} \quad (2.6)$$

No qual:

C_S = Coeficiente de *Swirl*;

n_D = Velocidade tangencial do *Swirl*;

n = Rotação do virabrequim;

S = Curso do pistão (m);

M = Momento gerado pela velocidade tangencial do *Swirl* (N.m);

ρ_1 = Densidade do ar dentro da câmara de medição (kg/m³);

$\dot{m}$ = Vazão de ar em massa (kg/s);

A vazão mássica $\dot{m}$ pode ser obtida através do diâmetro interno da câmara de medição D , da velocidade média do escoamento v_0 e da massa específica do ar dentro da câmara de medição ρ_1 , logo:

$$\dot{m} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot v_0 \cdot \rho_1 \quad (2.7)$$

Com base em modelo de escoamento isoentrópico, é possível determinar o valor da densidade ρ_1 no interior da câmara de medição, logo:

$$\rho_1 = \frac{P_0}{R \cdot T_0} \cdot \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (2.8)$$

No qual:

P_0 = Pressão do ar no meio externo, ou de estagnação (Pa);

P_1 = Pressão do ar no interior da câmara de medição (Pa);

$R = 287 \text{ N.m/kg.K}$, é a constante do gás para o ar;

$k = 1,4$ e é a razão entre o calor específico do ar a pressão e volume constante, (cp/cv);

T_0 = Temperatura do ar no meio externo (K).

Substituindo as equações 2.7 e 2.8 em 2.6, obtém-se:

$$C_s = \frac{n_D}{n} = \frac{32 \cdot S}{\pi^2 \cdot D^4 \cdot v_0^2} \cdot \frac{R \cdot T_0}{\rho_0} \cdot \left(\frac{P_0}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}} \cdot M \quad (2.9)$$

Vale observar que o torque M varia de acordo com a massa de ar admitida no cilindro, portanto, muda de acordo com a abertura de válvula que por sua vez depende do ângulo de manivela do virabrequim. Ou seja, o cálculo de *Swirl* representado pela equação 2.9 pode ser considerado como sendo do C_s pontual.

O importante não é saber o comportamento pontual do coeficiente de *Swirl*, mas, sim o seu valor médio, pois, este representa o comportamento aproximado do motor em todo seu ciclo de funcionamento. Considerando que é possível obter os valores de torque para cada abertura de válvula, o Coeficiente de *Swirl* médio (C_{sm}) pode ser calculado por:

$$C_{sm} = \left(\frac{n_D}{n} \right)_m = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^\pi \frac{n_D}{n} \cdot \left(\frac{c(\alpha)}{c_m} \right)^2 d\alpha \quad (2.10)$$

Onde:

α = Posição angular do eixo de manivelas medido a partir do PMS;

$C(\alpha)$ = Velocidade instantânea do pistão que varia de acordo com o ângulo de manivelas;

C_m = Velocidade média do pistão.

Através da avaliação dos componentes cinemáticos de um motor é possível calcular $C(\alpha)/C_m$ como sendo:

$$\frac{C(\alpha)}{C_m} = \frac{\pi}{2} \cdot \left[\frac{(1+\cos \alpha)}{\sqrt{1-\lambda^2 \cdot \sin^2 \alpha}} \right] \cdot \sin \alpha \quad (2.11)$$

Onde:

λ = Relação de comprimento da manivela/biela;

α = Posição angular do eixo de manivelas medido a partir do PMS.

Outra forma de se prever o número de *Swirl* é através de simulações numéricas pela técnica denominada CFD.

Para que o CFD possa realizar o cálculo de *Swirl* é necessário inserir as equações na fase de modelagem, portanto, os resultados obtidos dependerão do método selecionado pelo autor.

Especificamente neste estudo será adotado o mesmo método de cálculo descrito pela equação 2.10:

$$C_{sm} = \left(\frac{n_D}{n} \right)_m = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^\pi \frac{n_D}{n} \cdot \left(\frac{C(\alpha)}{C_m} \right)^2 d\alpha \quad (2.10)$$

A diferença é que ao invés de medir o torque será possível calcular a razão *Swirl* para cada abertura de válvula através do CFD.

Conhecendo-se a razão *Swirl* para cada abertura de válvula é necessário correlacionar com a posição angular do eixo de manivelas que pode ser definida através da equação 2.11:

$$\frac{C(\alpha)}{C_m} = \frac{\pi}{2} \cdot \left[\frac{(1+\cos \alpha)}{\sqrt{1-\lambda^2 \cdot \sin^2 \alpha}} \right] \cdot \sin \alpha \quad (2.11)$$

3. FUNDAMENTOS DE CFD

O objetivo principal desse estudo é a simulação através de CFD, o que torna importante o entendimento dessa técnica.

Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos básicos que permitem o posterior uso do CFD.

De acordo com VERSTEEG e MALALASEKERA (1995), a fluidodinâmica computacional ou CFD é uma análise de sistemas que envolve mecânica dos fluidos, transferência de calor e seus fenômenos químicos e físicos através de simulação computacional. É o ato de simular o comportamento de fluidos, sejam compressíveis ou incompressíveis, com o auxílio computacional em diversas áreas correlatas tais como:

- Avaliação de arrasto em veículos e aeronaves;
- Comportamento hidrodinâmico em embarcações;
- Combustão em motores de ignição interna;
- Passagem de ar em dutos;
- Distribuição de poluentes e efluentes;
- Comportamento da água em rios e oceanos;
- Meteorologia;
- E até mesmo análise de circulação sanguínea em veias e artérias.

Ainda de acordo com VERSTEEG e MALALASEKERA (1995), a simulação teve início na década de 1960 no estudo aeroespacial, com o intuito de avaliar o comportamento de fluidos e seus impactos em aeronaves.

As vantagens de se utilizar a simulação em CFD estão relacionadas ao projeto de sistemas fluidodinâmicos, pois, podem reduzir o tempo total de projeto e consequentemente seus custos. Permite avaliar sistemas de grandes dimensões com precisão, algo complexo ou inviável de se fazer através da confecção de protótipos. Permite também a criação de diversos cenários, o que pode ajudar a prever, inclusive, situações de risco e acidentes.

O uso de modelagem em CFD é considerado um tema amplo que tem como princípio básico a solução numérica, através de métodos computacionais, das equações de Navier-Stokes (conservação de momento), da continuidade (conservação de massa) e da conservação de energia (SHAW, 1992).

Essas equações quando envolvidas no mesmo sistema formam equações diferenciais não-lineares, tornando a solução analítica muito complexa, mas, que não podem ser negligenciadas em problemas de engenharia, sugerindo assim o uso de computadores para sua solução (ANDERSON, 1995).

Para que as equações não-lineares possam ser solucionadas por computadores, é necessário transformá-las em códigos que os computadores possam ler, afinal, a máquina consegue somente efetuar cálculos algébricos simples como soma, subtração, multiplicação e divisão através do uso de códigos binários (SHAW, 1992).

Existem três diferentes técnicas aplicadas à CFD para transformar equações diferenciais para a linguagem computacional (SHAW, 1992):

- Método das diferenças finitas, que utiliza séries de Taylor para construir uma biblioteca de equações que descrevam as derivadas de uma variável como sendo a diferença entre o valor da variável em vários pontos no espaço ou no tempo;
- Método dos elementos finitos, no qual as equações diferenciais são divididas sobre um número finito de subdomínios conhecidos como elementos;
- Método do volume finito, é um dos mais utilizados para CFD e possui características semelhantes as duas descritas acima. A grande diferença é que se aplica para solucionar equações de transferência de calor e mecânica dos fluidos.

O entendimento da solução numérica proposta por algoritmos é crucial. Diante desse fato três propriedades que uma modelagem em CFD devem ser apresentados para afirmar que os resultados se aproximam do fenômeno real (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995):

- Convergência, que é a propriedade que a modelagem possui de garantir que o tamanho da malha foi corretamente definido, ou seja, que as regiões que sofrerão maior influência do escoamento foram refinadas de tal modo que o tamanho de cada elemento da malha seja reduzido à zero (convergir para zero).
- Consistência é a propriedade que a modelagem possui de garantir que a modelagem criada produza sistemas algébricos que sejam equivalentes aos fenômenos físicos e químicos reais.
- Estabilidade, que é a propriedade que uma modelagem possui de repetir resultados estáveis, sem grandes oscilações ou ainda que apresentem erros.

Segundo METIN O. et al (200?) a solução de um problema em CFD envolve um procedimento típico, que pode ser descrito em alguns passos:

- Projetar o problema a ser solucionado;
- Dimensionar o objeto ou sistema no ambiente virtual de acordo com a realidade, no qual o objetivo é garantir que as condições projetadas no ambiente virtual sejam compatíveis com o que ocorre na prática;
- Discretizar o sistema através da criação de uma malha, sendo essa a fase mais importante para a solução numérica através de CFD na qual o objetivo é aplicar as equações diferenciais em cada elemento da malha. Quanto menor o elemento, maior a precisão dos resultados, porém maior é o tempo de simulação e a necessidade de recurso computacional;
- Processar o sistema. Fase na qual a máquina soluciona o problema através de iterações numéricas em cada um dos elementos da malha;
- Análise dos resultados obtidos.

O CFD é tipicamente dividido em três módulos nos quais as tarefas são executadas (SHAW, 1992):

- Pré-processador, no qual as tarefas de preparação da modelagem são realizadas. Neste módulo se determinam os parâmetros a serem observados, é onde se gera a malha e as condições iniciais;
- O processador, no qual o problema é solucionado através do método das diferenças finitas, elementos finitos ou volumes finitos;

- O pós-processador, no qual os resultados são apresentados através de imagens, gráficos e tabelas.

A tarefa de preparação da modelagem consiste em informar ao CFD qual é o problema a ser solucionado, nesta fase da modelagem se define as propriedades do fluido como a densidade e a viscosidade, se define quais são as variáveis a serem calculadas, se especifica quais são os contornos do objeto no qual o fluido escoar e se define as condições iniciais do problema como velocidade inicial do fluido, pressão e outros (SHAW, 1992).

A geração de malha pode ser considerada como sendo a discretização do espaço na qual o fluido escoará. Com base um aerofólio em formato de gota, por exemplo, nota-se que o ar, ao passar por sua superfície, assume um comportamento diferente em cada região do aerofólio, logo, a melhor forma de se observar o comportamento desse fluido é dividir a superfície do aerofólio em pequenas partes, ou seja, dividindo a superfície em pequenos elementos para posterior solução das equações (ANDERSON, 1995).

A malha deve ser modelada de forma a solucionar numericamente todos eventos possíveis de se ocorrer na vazão de um fluido, tais como a formação de vórtices, regiões de alta e baixa velocidade do fluido, mudanças de pressão, descolamentos e as condições nas regiões mais próximas e mais afastada da camada limite. Portanto, a escolha da malha é essencial para uma correta solução numérica (SHAW, 1992).

A solução em CFD e posterior análise dos resultados consiste em encontrar as variáveis previamente estabelecidas através da solução das equações diferenciais. Fase na qual os conceitos de convergência, consistência e estabilidade devem ser avaliados (SHAW, 1992).

VERSTEEG e MALALASEKERA (1995) abordam a lei da conservação dos fluidos e o conceito de condição de contorno em ambientes tridimensionais através de:

- Uma representação matemática da vazão e transferência de calor, ou seja, é descrito o comportamento tridimensional e macroscópico de propriedades como velocidade, pressão, densidade e temperatura;

- Equacionamento da conservação da massa em objetos tridimensionais;
- Equacionamento do momento através da segunda lei de Newton;
- Equacionamento da conservação da energia através de uma abordagem da primeira lei da termodinâmica em fluidos que atuam em ambiente tridimensional;
- Equacionamento de Navier-Stokes para um fluido newtoniano e seus diferentes comportamentos físicos (elípticos, parabólicos e hiperbólicos);
- Apresentação das diferentes condições de contorno (vazão interna e externa) e os respectivos problemas com o regime subsônico e supersônico em fluidos compressíveis.

O conceito de turbulência está diretamente relacionado ao do número de Reynolds. A maioria dos problemas de engenharia são considerados turbulentos e estudo desse escoamento é melhor representado através do auxílio computacional (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

VERSTEEG e MALALASEKERA (1995) defendem o método κ - ϵ , que é um conceito de solução numérica para Reynolds em regime turbulento, para a grande maioria das modelagens em CFD, pois, este corrige as equações fundamentais desenvolvidas para o regime laminar, nas condições do regime turbulento.

WESSELING (2000) explora os fenômenos relativos à mecânica dos fluidos e as leis que regem a termodinâmica através dos teoremas e equações que regem a dinâmica de um fluido, seja ele gás ou líquido.

Esses teoremas são apresentados com base nas clássicas leis da física, sendo elas a conservação da massa, do momento e da energia. Dentre os equacionamentos pode-se apresentar:

- Equação de Navier-Stokes
- Equação do número de Reynolds
- Equação de Stokes
- Equação da energia
- Equação dos gases perfeitos
- Entalpia e entropia
- Teorema de Bernoulli

WESSELING (2000) aborda também sobre as diferenças entre modelagem CFD feita com base no modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$ e feita com base em $\kappa - \omega$.

Cada um dos métodos tem suas vantagens e desvantagens que, em geral, consistem em tempo de simulação e precisão nos resultados obtidos.

Ainda segundo WESSELING (2000) com a técnica CFD pode-se prever fenômenos físicos reais, porém, com uma certa carga de erro, pois, em simulação ainda não é possível incluir agentes externos como, por exemplo, mudança de pressão e temperatura.

3.1 Simulação de *Swirl* através de CFD

A principal vantagem do uso do CFD é que essa técnica permite a predição do escoamento de fluidos e de processos térmicos, adiantando para os projetistas os efeitos gerados por modificações realizadas em seus projetos antes que tais modificações sejam colocadas em prática, reduzindo o tempo de implementação de projetos, custos com o desenvolvimento de protótipos e horas de teste (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

Por outro lado, os motores de combustão interna sofrem constante evolução e são foco de estudo de muitos pesquisadores para que possam se tornar cada vez mais eficazes, ou seja, com melhor desempenho e menores níveis de emissão de poluentes (KANG; REITZ, 1999).

Ainda de acordo com LEE et al (2008), MIC recebem uma maior atenção neste processo de evolução, pois, quando comparados com MIF, possuem melhor rendimento térmico e são mais robustos sob o ponto de vista de utilização, ou seja, possuem maior durabilidade.

Um dos métodos utilizados para melhora o desempenho de MIC é através da investigação sobre a forma como o ar é induzido ou como o combustível é injetado para dentro da câmara de combustão com o uso do CFD.

Em GAFOOR e GUPTA (2015), por exemplo, pôde-se prever, em suas simulações CFD, a variação de poluentes (NOx, MP, HC). Para isso foi modelado um motor de

um único cilindro completo, ou seja, com dutos de admissão, cilindro e pistão. Neste estudo foram induzidos valores iniciais para *Swirl* e variadas as dimensões da cavidade do pistão, portanto, a simulação não foi realizada com o intuito de avaliar a razão *Swirl* em si, mas, sim de avaliar seu efeito no processo de combustão. O código CFD utilizado foi o CFD AVL *Fire*.

Este código CFD foi desenvolvido especificamente para a modelagem de motores combustão interna e permite a simulação dos efeitos da combustão, portanto, avalia não somente escoamento do ar frio, mas, também os efeitos da transferência de calor (AVL *Fire*, 2016).

Para reduzir o tempo de simulação o experimento foi realizado em apenas um quarto do pistão. Foram mantidos constantes, a vazão mássica de combustível injetado, a velocidade do motor e a razão de compressão para que no resultado houvesse variações provenientes apenas devido à mudança da geometria da cavidade do pistão e da razão *Swirl* inicial assumida.

Para controle dos resultados a malha foi controlada na região do PMS e do PMI através de uma malha hexaédrica diferente para cada uma das regiões. O método de escoamento utilizado para avaliar a turbulência foi o K-zeta-f que tem como característica principal a avaliação da transferência de calor nas paredes e a modelagem do processo de combustão foi controlado pelo método *3-Zones Extended Coherent Flame Model* (ECFM-3Z).

O método ECFM-3Z é um modelo de combustão desenvolvido para códigos CFD, que tem como característica a capacidade de simulação das 3 zonas de mistura possíveis em um motor diesel, que são o combustível puro, o ar puro com possíveis gases residuais e a zona da mistura ar e combustível (COLIN; BENKENIDA, 2004).

A validação da simulação de GAFOOR e GUPTA (2015) foi feita através da comparação dos resultados obtidos com os experimentos práticos realizados por outros autores. A confiança no código e nos modelos de turbulência e de combustão foi estabelecida com base em resultados obtidos por autores que realizaram trabalhos semelhantes. Com relação aos resultados obtidos relacionados à razão *Swirl* as conclusões foram:

- O processo de combustão é melhorado quando há aumento da razão *Swirl* conjugada com aumento da energia cinética turbulenta, ou seja, para que o aumento da razão *Swirl* tenha efeitos positivos é necessário aumentar também a velocidade do ar induzido nos dutos de admissão.
- A razão *Swirl* inicial admitida teve efeitos menos significantes no processo de combustão em pistões com cavidades de grandes dimensões.
- Alta razão *Swirl* inicial em conjunto com pequenas cavidades no pistão bem como baixa razão *Swirl* inicial em conjunto com grandes cavidades resultaram em melhor desempenho do processo de combustão.

Já no estudo de H. SUSHMA e JAGADEESHA (2013) foi avaliado, através de simulações em CFD, o comportamento do ar dentro da câmara de combustão e as variações na eficiência volumétrica, turbulência, *Swirl* e *Tumble* de três diferentes formatos de cavidades de pistão durante as fases de admissão e compressão. Em tal experimento não foi avaliado o efeito da combustão, portanto, foi avaliado somente o escoamento do ar frio e sem o efeito da injeção de combustível, tornando o experimento mais próximo daquilo que é realizado no experimento de vazão estática.

Foi elaborado um domínio computacional composto de um motor genérico de dutos de admissão no formato espiro – helicoidal, válvula de admissão, pistão de 130 mm de diâmetro e cilindro de 150 mm de comprimento. A composição do domínio computacional e os diferentes formatos de cavidade de pistão podem ser visualizados na figura 9.

Figura 9 - Formatos de cavidade de pistão e domínio computacional

Fonte: Adaptado de H. Sushma e Jagadeesha (2013)

O código CFD ANSYS FLUENT 13.0 foi utilizado sendo adotado escoamento com base no modelo RNG k- ϵ que é um tipo modelagem comumente usados para avaliar somente escoamento de fluidos, ou seja, sem os efeitos de transferência de calor. É também uma modelagem que tende a reduzir o tempo de simulação.

O detalhamento da malha foi feito de modo que cada região do domínio computacional recebeu um tratamento diferente, com isso os autores puderam garantir os resultados da simulação para as diferentes fases avaliadas (admissão e compressão).

As conclusões do estudo foram:

- A maior razão *Swirl* foi encontrada no pistão B;
- A maior eficiência volumétrica foi encontrada no pistão C;
- O pistão B seria o que possui cavidade que promove melhor razão *Swirl* associada a uma eficiência volumétrica alta.

No estudo de BENNY PAUL e GANESAN (2015) o principal objetivo foi avaliar os efeitos de diferentes formatos de dutos de admissão no comportamento do ar de admissão. Tomaram como base três formatos de dutos de admissão (helicoidal, espiral, espiro-helicoidal) simularam somente o escoamento do ar em ciclo frio, ou seja, sem os efeitos da combustão através do código CFD Star-CD e compararam as variações dos resultados da eficiência volumétrica, turbulência do ar e número de *Swirl*. Os autores realizaram o experimento em um motor experimental com características similares a de um motor comercial existente. O modelo de turbulência adotado também foi o k- ϵ .

De acordo com VERSTEEG e MALALASEKERA (1995) o modelo de turbulência k- ϵ tem como característica principal a solução da equação de Reynolds, portanto, apenas os fenômenos físicos relativos ao escoamento do ar do frio podem ser avaliados.

Antes de validar os resultados iniciais os autores realizaram uma análise de sensibilidade de malha observando a variação dos resultados desejados. Após a

malha ideal ser escolhida os resultados foram validados por trabalhos publicados anteriormente.

Os resultados indicaram que o fluxo de ar adentra a câmara de combustão pelo seu centro e assume um movimento no sentido horário formando um vórtice no interior da câmara, independe do tipo de duto adotado. Foi concluído também que as maiores velocidades tangenciais estavam nas paredes do cilindro, sugerindo um movimento rotacional conforme desejado.

As conclusões do estudo:

- O duto de formato espiro-helicoidal tende a aumentar o número de *Swirl* dentro da câmara de combustão;
- O duto helicoidal gerou maior eficiência volumétrica;
- O duto de formato espiro-helicoidal gerou maiores velocidades tangenciais do ar após o ciclo de admissão, que permaneceu mesmo com o pistão na zona do PMS.

No estudo de ROLÉN (2014) o objetivo foi recriar o experimento de vazão estática através do uso de CFD. Isso permitiu o autor, inicialmente, validar seu experimento virtual e depois realizar experimentos modificando a geometria dos dutos de admissão para analisar as alterações no número de *Swirl*.

ROLÉN (2014) utilizou o código CFD AVL FAME Hexa que, de acordo com a AVL (2016), é um pré-processador específico para a geração automatizada de malhas, foi utilizado para a geração da malha volumétrica.

O código CFD AVL *Fire* foi usado para execução da simulação. Por se tratar de uma representação do experimento de vazão estática, o autor observou apenas o comportamento do escoamento do ar frio de admissão, ou seja, os efeitos da combustão não foram levados em consideração. O modelo de turbulência utilizado foi o $k-\epsilon-\zeta-f$ e o escoamento em regime estático seguiu o padrão *Reynolds-Average-Navier-Stokes* (RANS).

O modelo de turbulência $k-\epsilon-\zeta-f$ propõe a solução de equações adicionais em relação ao modelo de turbulência $k-\epsilon$, que em geral apresenta falhas nas regiões próximas

às paredes de cilindros, dutos e válvulas que possuem geometria relativamente complexa (ROLÉN, 2014).

A malha foi criada com diferentes volumes de controle, ou seja, cada região avaliada recebeu um tratamento de malha diferente. O maior refinamento da malha foi realizado na região do assentamento de válvula, devido à complexidade da geometria nessa região e também devido ao fato de que, de acordo com o autor, é nesta região que o coeficiente *Swirl* assume o padrão ao adentrar a câmara de combustão, portanto, o refinamento de malha nessa área é de suma importância, nas demais regiões o refinamento de malha foi menor, ou seja, o tamanho das células aumentado. Na figura 10 é possível observar a malha gerada por ROLÉN (2014).

Figura 10 - Refinamentos de malha de acordo com a complexidade da região

Fonte: Rolén (2014)

Como o objetivo de ROLÉN (2014) era observar somente os dutos de admissão, o pistão foi removido e o comprimento do cilindro mantido de acordo com o experimento de vazão estática. Cada simulação sofreu 5000 iterações para garantir a convergência do modelo e a medição do torque angular foi realizada na mesma região onde estaria localizado o sensor de torque do experimento de vazão estática.

A simulação apresentou resultados similares ao do experimento de vazão estática, indicando que uma previsão da realidade pode ser realizada através do CFD.

Foi possível também simular uma variação de formato do pórtico de admissão e comparar os resultados com o pórtico padrão. Tal alteração resultou em um número de *Swirl* médio menor do que o pórtico original, portanto, sua viabilidade pôde ser

questionada durante a fase de projeto evitando custos com desenvolvimento de ferramental.

Em JEBAMANI e KUMAR (2008) partiu-se da premissa de que em baixas velocidades o ar precisa de um fluxo rotacional maior do que em altas velocidades, propondo assim uma investigação sobre dutos de admissão que permitissem a variação da razão *Swirl*. O estudo foi realizado através de CFD e também através de experimentos práticos.

Para promover a variação de *Swirl* nos testes experimentais foi desenvolvida uma placa conectada a um eixo móvel dentro dos dutos de admissão. O eixo móvel permitia variar a posição da placa disposta internamente aos dutos.

O CFD tomou como base a geometria composta por pórticos de admissão, válvulas e cilindro, ou seja, representou-se no ambiente computacional do experimento de vazão estática.

A simulação foi realizada com o código CFD FLUENT-6 que exige que a geração de malha seja feita separadamente, a malha superficial foi gerada no pré-processador GAMBIT e a malha volumétrica foi gerada no pré-processador T Grid. A malha gerada foi feita com elementos tetraédricos em toda a geometria conforme apresentado pela figura 11.

Figura 11 - Malha representando o domínio computacional simulado

Fonte: Jebamani e Kumar (2008)

O modelo de turbulência adotado foi o $k-\epsilon$, esse tipo de modelo de turbulência simplifica alguns fenômenos que existem na realidade, porém, traz resultados confiáveis.

De acordo com JEBAMANI e KUMAR (2008) essas simplificações do modelo $k-\epsilon$ não permitem uma análise precisa do comportamento do ar nas regiões próximas as paredes, logo, fizeram uso de um recurso denominado função de parede y^+ . Tal recurso permite avaliação do número de Reynolds local, ou seja, por camadas nas regiões próximas às paredes colaborando para a convergência da simulação.

A simulação consistiu em variar a abertura da placa de *Swirl* variável em 100%, 70% e 50% mantendo a abertura da válvula constante em 5,74 mm, bem como os dados de entrada do fluido, ou seja, vazão, pressão e temperatura do ar.

Observou-se que a maior intensidade de *Swirl* foi atingida com a abertura da placa posicionada a 70% da origem, logo, essa abertura seria considerada como ideal para baixas velocidades do motor onde se exige uma melhor mistura de combustível para reduzir a formação de MP, dessa forma, mesmo com pouca vazão de ar haveria uma maior rotação do mesmo no interior do cilindro e suas velocidades tangenciais maiores poderiam promover uma melhor mistura do ar com o combustível.

Outras conclusões foram referentes ao fato de que é possível variar o número de *Swirl* e assim atender aos mais diferentes regimes de funcionamento do motor e também que o uso de CFD é uma ferramenta viável para a predição de fenômenos reais.

No estudo de BOTTONE et al (2011) o objetivo foi usar uma abordagem diferente na simulação CFD. A grande maioria dos trabalhos de CFD são realizados com base na abordagem RANS que, como o próprio nome diz, atua com a média das principais equações governantes da mecânica dos fluidos.

Para os autores essa abordagem permite efetuar uma avaliação estimada dos fenômenos físicos e químicos que ocorrem em um processo real como em um motor de combustão interna, porém, os detalhes se perdem sugerindo assim outro tipo de modelagem.

A abordagem do tipo *Large Eddy Simulation* (LES), sugerida no estudo de BOTTONE et al (2011) é um modelo de turbulência com a capacidade de avaliar as equações governantes da mecânica dos fluidos que são dependentes do tempo, possibilitando solucionar não apenas vazões turbulentas de médio porte como também as de altíssima turbulência que tendem a desordenar o fluxo do fluido (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

Os resultados da abordagem LES de BOTTONE et al. (2011) foram comparados com a abordagem híbrida LES/RANS e RANS para que as diferenças pudessem ser pontuadas. Os resultados foram validados por testes experimentais realizados em paralelo. A principal desvantagem do uso de LES é o recurso computacional (tempo e capacidade computacional) que este tipo de simulação exige devido ao alto nível de refinamento de malha.

Os autores realizaram a simulação de um motor em condições reais, ou seja, com inclusão do processo de combustão através do código CFD STAR-CD com o pacote es-ice. Este pacote foi desenvolvido para aplicações exclusivas de motores de combustão interna (CD-ADAPCO, 2016).

O motor considerado na simulação foi um Diesel mono cilindro com 4 válvulas, sendo duas de admissão e duas siamesas de exaustão e pistão com cavidade.

A malha foi feita considerando as diferentes regiões do motor, sendo que 1,45 milhões de células foram geradas na região do PMI e 0,65 milhões de células foram geradas na região do PMS.

Nas paredes da camada limite foi aplicado um refinamento de malha com duas camadas de 0,3 mm.

A malha foi mantida em todas as abordagens realizadas pelos autores (RANS, LES e híbrida) para que os resultados pudessem ser comparados em cada abordagem aplicada.

A figura 12 representa o resultado final do modelo tridimensional obtido pelos autores após o refinamento de malha.

Figura 12 - Malha volumétrica aplicada em motor completo

Fonte: Bottone et al (2011)

O processo de injeção de combustível realizado em dois pulsos sendo um pulso piloto realizado a $27,5^\circ$ do ângulo de manivela antes do PMS e outro principal realizado a $1,5^\circ$ do ângulo de manivela depois do PMS. A massa total de combustível simulada foi de 9,42 mg.

Em relação aos resultados de *Swirl* e *Tumble* apresentados ficou evidente que houve diferenças significativas nos valores e também no comportamento do ar independente do tipo de abordagem utilizada.

O *Swirl*, por exemplo, mostrou-se mais forte na fase de admissão com forte queda no final desta fase para RANS, LES e híbrida. Na abordagem RANS e híbrida o *Swirl* médio resultante foi de 2,5 e para LES ficou em 3, sendo que o sentido de giro do *Swirl* foi mantido na mesma direção em todas abordagens.

As diferenças de valores dos campos de velocidade foram atribuídas ao fato de que, na abordagem LES, o fenômeno é controlado com maior rigor.

Os perfis de velocidade obtidos na abordagem RANS podem ser observados na figura 13.

Figura 13 - Perfis de velocidades obtidos através da abordagem RANS

Fonte: Bottone et al (2011)

Os perfis de velocidade obtidos na abordagem LES podem ser observados na figura 14.

Figura 14 - Perfis de velocidade obtidos na abordagem LES

Fonte: Bottone et al (2011)

Os perfis de velocidade obtidos na abordagem híbrida podem ser observados na figura 15.

Figura 15 - Perfis de velocidade obtidos na abordagem híbrida

Fonte: Bottone et al (2011)

Comparando os perfis de velocidade apresentados pela figura é possível observar que a abordagem LES detalha com maior rigor os fenômenos envolvidos na simulação.

4. PROCEDIMENTO PARA MODELAGEM DO CABEÇOTE EM CFD

Este capítulo apresenta os procedimentos a serem realizados para a obtenção dos resultados, sendo que o objetivo principal será avaliar qualitativamente o movimento rotacional denominado *Swirl* negligenciando demais movimentos existentes como o *Squish* e o *Tumble*.

A validação da simulação em CFD será feita com base nos padrões aceitos pela montadora do motor e com base em dados de medições realizadas no experimento da vazão estática e ensaios do tipo PIV.

Os resultados do ensaio PIV, utilizados para a validação da simulação numérica, estão disponíveis no relatório emitido pela VSE à montadora.

A análise será feita em um único cilindro do motor, pois, o cabeçote é individualizado, ou seja, cada cabeçote atende um único cilindro.

Inicialmente será considerado o cabeçote com suas características de projeto, ou seja, sem as possíveis variações de posição dos dutos de admissão oriundas do processo de fabricação do cabeçote que, neste caso, é a fundição. Possíveis variações oriundas do processo de usinagem e montagem final do cabeçote não serão avaliadas.

O cabeçote será adaptado no ambiente virtual para análise do ar de admissão em regime permanente. Todas essas modificações serão feitas diretamente no CFD.

Depois serão realizadas simulações numéricas impondo variações hipotéticas de posição geométrica dos dutos acima das tolerâncias aceitas pelo projeto do cabeçote.

Nesta fase o objetivo será avaliar os impactos no comportamento do ar de admissão no interior do cilindro e realizar uma análise crítica sobre as tolerâncias do identificando possíveis melhorias e reduções no custo de fabricação da peça.

Por fim, as simulações serão realizadas com base nas tolerâncias de projeto para assim gerar informação suficiente que sirva de comparativo entre os resultados e também para avaliar se as tolerâncias dimensionais aceitas em projeto atendem as

variações permitidas no comportamento do fluxo de ar, ou seja, na variação de *Swirl* médio.

O cabeçote em estudo possui dois dutos de admissão tangenciais à câmara de combustão, sendo um deles totalmente paralelo à superfície da câmara, denominado duto reto e outro com uma curva, denominado duto curvo, que tem como função ajudar a promover a rotação do fluxo de ar de admissão conforme apresentado pela figura 16.

Figura 16 - Vista superior do volume interno dos dutos de admissão

Fonte: Autor (2016)

Mediante essas características o cabeçote produz, de acordo com medições da montadora, Csm igual a 2,1 que pode variar $\pm 9,52\%$ em relação ao seu valor nominal.

A tolerância de projeto do cabeçote permite variação de posição dos dutos de admissão no eixo x de $\pm 1,5\%$ e no eixo y de $\pm 1,2\%$ em relação ao diâmetro nominal da válvula de admissão.

Uma representação esquemática do cabeçote e suas tolerâncias são apresentadas na figura 17.

Figura 17 - Representação esquemática do projeto do cabeçote

Fonte: Autor (2016)

Essas variações foram impostas no ambiente virtual para análise do comportamento do ar no interior da câmara de admissão.

Para análise acima das tolerâncias admitidas pelo projeto foram adotadas as variações de $\pm 2,5\%$ em relação ao diâmetro nominal da válvula de admissão, tanto no eixo x quanto no eixo y.

Esse valor foi adotado, pois, é passível de acontecer sem que demais desvios como interferência da válvula nas paredes do cilindro, por exemplo, sejam notados no cabeçote montado. Esse desvio também é passível de acontecer, pois, eventuais desgastes no macho de fundição permitem que tal falha venha a ocorrer no processo de fabricação da peça bruta.

As simulações serão realizadas através do software Star CCM+ versão 9.06.009 desenvolvido pela empresa CD-Adapco que utiliza a plataforma JAVA para escrita dos códigos.

No total serão realizados 10 diferentes testes variando a posição geométrica dos dutos de admissão, conforme apresentado na tabela 1.

Tabela 1 - Variações de posição avaliadas no trabalho de pesquisa

	Duto reto		Duto curvo	
	X (%)	Y (%)	X (%)	Y (%)
Teste 1	0	0	0	0
Teste 2	2,5	0	-2,5	0
Teste 3	-2,5	0	2,5	0
Teste 4	0	2,5	0	-2,5
Teste 5	0	-2,5	0	2,5
Teste 6	-2,5	-2,5	2,5	2,5
Teste 7	1,5	0	-1,5	0
Teste 8	-1,5	0	1,5	0
Teste 9	0	1,2	0	-1,2
Teste 10	0	-1,2	0	1,2

Fonte: Autor (2016)

Para obtenção do número de *Swirl* médio do cabeçote em estudo é necessário avaliar as aberturas das válvulas de admissão milímetro a milímetro, pois, para cada abertura é possível obter um número de *Swirl* denominado pontual.

Para o cabeçote em estudo as aberturas de válvulas variam de 0 a 100%, totalizando 150 simulações.

Devido ao longo tempo de simulação requerido para cada uma das aberturas de válvula, foi admitida uma redução nessa quantidade, pois, as aberturas de válvula em 46,67%, 53,33%, 73,33%, 86,67%, 93,33% e 100% são as que mais influenciam no comportamento do número de *Swirl* médio, contribuindo por 89,71% de seu valor.

Com essa premissa, o número de simulações a serem realizadas reduziu para 60.

Para a realização da simulação foram admitidos os dados disponíveis na tabela 2 que são os mesmos utilizados no experimento da vazão estática.

Tabela 2 - Dados de entrada da simulação

Diâmetro do cilindro	130 mm	Pressão do ar de admissão (P_1)	250 mmHg
Curso do Pistão	160 mm	Temperatura do ar de admissão (T_1)	300 K
		Pressão do ar externo (P_0)	92,6 kPa

Fonte: Autor (2016)

4.1 Fluxo de processo para o desenvolvimento da simulação

Para a obtenção de resultados satisfatórios em uma simulação CFD ou ainda para que representem fenômenos reais é necessário um bom desenvolvimento das tarefas de pré-processamento.

A figura 18 apresenta, através de um fluxograma, as atividades realizadas neste estudo para a obtenção dos resultados.

Figura 18 - Fluxograma com as tarefas de pré-processamento

Fonte: Autor (2016)

Os passos apresentados serão posteriormente detalhados, dessa forma futuros trabalhos poderão utilizar como base o mesmo procedimento.

4.2 Extração do volume interno do cabeçote

Em geral, uma geometria ou modelo em 3D não é preparado para uma simulação em CFD, portanto, adaptações na geometria são necessárias para que o processo seja realizado.

Neste estudo em específico será necessário executar uma extração do volume interno do cabeçote e do cilindro. As válvulas de exaustão serão removidas, bem como o pistão do cilindro, dessa forma apenas o fluxo frio do ar de admissão poderá ser estudado, seguindo o mesmo padrão do experimento prático realizado em bancada e, por se tratar de uma simulação, detalhes como, por exemplo, a rugosidade dos dutos serão negligenciados.

A figura 19 mostra a representação geométrica do volume interno do cabeçote que é objeto de estudo deste trabalho. Nesta figura é possível observar que as válvulas e os dutos de exaustão foram removidos do cabeçote, bem como o pistão do cilindro.

Figura 19 - Geometria do volume interno do cabeçote sem os dutos de exaustão

Fonte: Autor (2016)

4.3 Geração de malha

Após a importação da geometria e suas devidas correções que pretendem, em geral, eliminar pequenas aberturas do corpo volumétrico garantindo a estanqueidade dos corpos, é necessário gerar a malha sobre o modelo geométrico.

Essa é uma das etapas mais importantes da simulação em CFD cujo principal objetivo é transformar o corpo tridimensional em modelo para simulação propriamente dito utilizando o conceito de volumes finitos.

Através de uma malha é possível avaliar matematicamente o que ocorre em pequenas frações do modelo. O tipo e tamanho de malha selecionados afetam diretamente os resultados de uma simulação.

Deve-se observar também que o tamanho da malha afeta diretamente o tempo de processamento de uma simulação, assim, em geral a malha costuma ser mais refinada em regiões onde se deseja avaliar com maior precisão os resultados e ser menos refinada em regiões menos relevantes. Essa premissa também será adotada neste estudo, ou seja, o refinamento da malha será maior em regiões mais críticas.

De acordo com o manual do usuário do Star CCM+ (2014), o software permite a criação de diferentes tipos de malhas, sendo divididas em superficiais e volumétricas. As possibilidades são:

- *Surface Wrapper*, que é um gerador de malha de superfície automático e tem como principal característica a capacidade de corrigir pequenas falhas da geometria.
- *Surface Remesher*, gerador de malha superficial manual, onde o usuário tem a possibilidade de controlar o tamanho da malha e pode controlar diferentes tamanhos para uma mesma superfície.
- *Trimmed Mesher*, gera malhas volumétricas em formatos de seções tetraédricas.
- *Polyhedral Mesher*, gera malhas volumétricas compostas por células de formatos poliédricos.

- *Tetrahedral Mesher*, gera malhas volumétricas compostas por células de formatos tetraédricos.
- *Prism layer Mesher*, adiciona camadas de espessura definidas pelo usuário próximas a parede da camada limite
- *Extruder Mesher*, gera pequenas regiões volumétricas próximas a camada limite de uma malha volumétrica principal gerada previamente.
- *Thin Mesher*, gerador de malha volumétrica em geometrias de pouca espessura.

Além do tipo de malha é necessário informar também o tamanho de referência de cada célula. É este tamanho de célula que define a precisão na qual as equações da mecânica dos fluidos serão realizadas e é este cálculo que exige recurso computacional das máquinas que rodam CFD.

Como a geometria do cabeçote em estudo, na qual o fluxo de ar passa, apresenta diversas concordâncias de raios nos dutos de admissão e também restrições na região próxima às válvulas de admissão e seu respectivo assento, foi necessário aplicar mais de um tipo de malha, pois, tais regiões afetam o direcionamento e velocidade do ar.

A figura 20 apresenta os dutos de admissão com suas respectivas concordâncias de raio e o sentido do fluxo de ar está representado por setas vermelhas.

Figura 20 - Geometria dos dutos de admissão

Fonte: Autor (2016)

A figura 21 indica a região próxima às válvulas onde é possível observar que devido, ao tipo de geometria em estudo, mais de um tipo de malha foi aplicada ao modelo. O sentido do fluxo de ar está indicado por setas vermelhas.

Figura 21 - Sombra da região próxima ao assento da válvula de admissão

Fonte: Autor (2016)

4.3.1 Malha superficial

A Malha superficial tem como objetivo principal discretizar a superfície do modelo geométrico em pequenas células conforme representado pela figura 22.

Figura 22 - Detalhe da malha superficial gerada automaticamente pelo Star CCM+

Fonte: Autor (2016)

Esse procedimento é necessário para a avaliação física do comportamento do ar em toda a região das paredes do modelo geométrico e neste caso em específico adotou-se células de formato triangular, pois, essa geração de malha foi selecionada automaticamente pelo Star CCM+.

Como o modelo geométrico desse estudo consiste em corpo volumétrico apenas esse tipo de malha não é o suficiente para avaliar com exatidão o comportamento do ar no interior do corpo volumétrico sendo necessário a criação de uma malha volumétrica.

4.3.2 Malha volumétrica

A malha volumétrica consiste em preencher o volume interno do modelo geométrico que, neste caso, são os dutos de admissão e o cilindro do pistão.

As malhas volumétricas podem ser compostas por células de diferentes formatos. O formato das células depende do tipo de resultado que se espera obter. Quanto menor e mais densa for o tamanho da célula, maior será o tempo de simulação e maior será a necessidade de recurso computacional (SHAW, 1992).

Neste estudo em específico foi adotada uma malha volumétrica com células de formato poliédrico.

Para uma otimização de recurso computacional o tamanho de cada célula foi variado de acordo com a região do objeto de estudo.

Como nas regiões próximas aos dutos de admissão de ar e também próximas às válvulas o comportamento do ar tende a sofrer grande influência e variação de sentido, as células foram feitas com arestas de 1 mm.

Na região próxima ao final do cilindro, onde as restrições ao fluxo de ar são menores, as células ficaram com arestas de 8 mm.

Essa diferenciação de tamanho das células ao longo de um corpo volumétrico pode ser feita através de controles volumétricos que é um recurso disponível no Star CCM+.

A figura 23, que é um corte longitudinal realizado no modelo, apresenta a malha volumétrica com sua respectiva diferença de tamanho celular.

Figura 23 - Malha volumétrica com diferentes regiões de controle

Fonte: Autor (2016)

É possível observar que as células nas regiões críticas do modelo geométrico são menores quando comparadas com a região do cilindro, que oferece menor restrição ao fluxo de ar.

No total, o objeto de estudo ficou com mais de 2 milhões de células e esse refinamento de malha foi mantido em todos os testes realizados.

O refinamento de malha desse estudo foi comparado com outros estudos apresentados anteriormente e foi considerado adequado, pois, houve convergência dos resultados.

4.3.3 Malha nas regiões da camada limite

Nas regiões próximas às paredes internas dos dutos, válvulas e cilindro foram geradas camadas prismáticas para que o escoamento próximo a esta região pudesse ser avaliado devido ao baixo número de Reynolds.

Sobre essas camadas prismáticas foram feitos corpos volumétricos para garantir a observação de uma possível recirculação do ar.

Assim como feito na malha volumétrica, aqui também foi feito uma diferenciação de malha de acordo com as restrições oferecidas pelo modelo geométrico.

Nas regiões próximas a parede dos dutos foram geradas três camadas prismáticas, pois, as velocidades do ar são mais altas nesta região, logo, baixo número de Reynolds tendem a surgir nas camadas limites mais próximas às paredes dos dutos.

Na região próxima ao final do cilindro foram geradas seis camadas prismáticas, pois, a velocidade do ar reduz significativamente nessa região e o efeito de baixo número de Reynolds pode ser observado mesmo em regiões mais afastadas das paredes do cilindro.

A figura 24 apresenta a malha na região dos dutos.

Figura 24 - Três camadas prismáticas geradas na região próxima às paredes do duto

Fonte: Autor (2016)

A figura 25 apresenta a malha na região próxima à parede do cilindro.

Figura 25 - Seis camadas prismáticas geradas na região próxima às paredes do cilindro

Fonte: Autor (2016)

4.4 Definição da modelagem física

A definição da modelagem física é também uma das etapas mais importantes em uma simulação CFD. É nesta etapa que são definidas as equações físicas que se deseja solucionar, ou seja, é nesta fase que se define a mecânica dos fluidos a ser observada.

Dentro dos mais diferentes softwares de simulação CFD são informações que atuarão nos módulos denominados *Solvers*.

Para este estudo em específico foi definida a seguinte modelagem física:

- Selecionado o modelo de turbulência κ - ϵ (*K-Epsilon turbulence*), pois, este visa a avaliação somente do comportamento do ar, sem a necessidade de observação de demais fenômenos como a combustão, por exemplo. Além disso, o modelo matemático κ - ϵ consegue resolver as equações de RANS do fenômeno em estudo bem como permite obter a estabilidade do modelo com maior rapidez considerando regime permanente;

- Por se tratar de simulação, o ar a ser admitido na entrada do duto de admissão foi considerado nas condições padrões de temperatura e pressão, ou seja, ar ideal;
- Definido vazão em regime permanente;
- Selecionado equacionamento de modelos tridimensionais;
- Definido que o sistema atual em regime turbulento;
- Definido o tratamento de paredes através do comando *TwoLayerAll y+ Treatment*. Este tipo de tratamento atua com uma solução das regiões próximas às paredes do modelo e ajudam na solução de sistemas não lineares onde o modelo de turbulência $\kappa\text{-}\epsilon$ não consegue convergir os resultados.

Para que o sistema como um todo possa ser solucionado pelo CFD é necessário impor algumas condições iniciais. A velocidade inicial do fluido, por exemplo, deve ser maior que 0, caso contrário, o software entende que o sistema está parado.

Neste caso em específico foi definido o valor de -1×10^{-4} m/s no sentido do eixo z para que o software interprete que o ar necessita ser admitido pelos dutos.

Além disso foi necessário ajustar a temperatura estática do sistema para 300 K, dessa forma o software conseguiu estabelecer as condições físicas do fluido.

Demais parâmetros que definem as condições iniciais do fluido foram mantidos inalterados no software.

4.5 Condições de contorno

O último passo de preparação da simulação consiste em definir as condições de contorno do objeto em estudo.

No caso deste estudo foram definidas as seguintes condições de contorno:

- A entrada – que são os dois dutos de admissão e onde ocorre a pressão de estagnação de entrada.
- A saída – que é a parte de baixo do cilindro e onde é possível medir a velocidade do fluido, a pressão de saída e intensidade de turbulência.

- As paredes do cilindro – onde é possível definir se há ou não deslizamento do fluido nessa região bem como as características de permeabilidade.

A figura 26 apresenta as condições de contorno definidas neste trabalho.

Figura 26 - Condições de contorno

Fonte: Autor (2016)

4.6 Avaliações preliminares

As simulações numéricas são realizadas com base em iterações matemáticas que são realizadas sobre o modelo em estudo sendo que uma simulação, para ser considerada robusta, e com certo índice de confiança precisa atingir uma estabilização dos resultados, denominada de convergência.

Com o intuito de testar os dados admitidos na simulação e também avaliar a robustez da malha, algumas simulações preliminares foram executadas para que assim, fosse possível determinar a quantidade de iterações necessárias para a obtenção de resultados confiáveis.

Nos testes preliminares foi verificado que as simulações numéricas tendem a convergir os resultados após 2000 iterações numéricas. Isso indica que o modelo numérico possui consistência e que tanto a malha quanto o modelo de turbulência adotados estão solucionando o problema.

Com base nos resultados dos testes que indicaram que 2000 iterações numéricas eram necessárias para a convergência dos resultados e assumindo um coeficiente de segurança ficou definido que cada simulação deveria conter 4000 iterações numéricas garantindo assim que a solução numérica fosse confiável.

A figura 27 apresenta a curva de convergência do *Swirl* instantâneo. Esse padrão foi obtido após a realização de alguns testes preliminares e ajustes de malha realizados ao longo das simulações.

Figura 27 - Gráfico indicando convergência dos resultados

Fonte: Autor (2016)

Além da convergência é possível observar na figura que os resultados variam de acordo com a face de medição observada.

As faces de medição correspondem a uma determinada distância do topo do cilindro e a distância é mensurada através de uma correlação com o diâmetro do mesmo.

O diâmetro do cilindro corresponde a 160 mm, portanto as faces de medição correspondem a:

- $0,50 D = 80 \text{ mm}$;
- $0,75 D = 120 \text{ mm}$;
- $1,00 D = 160 \text{ mm}$;
- $1,20 D = 192 \text{ mm}$;
- $1,75 D = 280 \text{ mm}$.

A face $1,75 D$ é uma face de medição utilizada para permitir o comparativo dos resultados obtidos pelo CFD com os resultados obtidos pelo experimento da vazão estática, portanto, não será utilizada neste estudo.

A figura 28 apresenta as respectivas faces de medição obtidas no CFD.

Figura 28 - Faces de medição

Fonte: Autor (2016)

4.7 Automação do modelo numérico

Após os testes preliminares e a confirmação de que o modelo numérico apresenta convergência iniciou-se um estudo de automação do modelo numérico.

O objetivo foi promover a mudança da abertura de válvula e do posicionamento dos dutos de admissão de forma automatizada e, principalmente, sem a necessidade de criação de diversos modelos matemáticos.

Dessa forma, diversos estudos podem ser realizados futuramente permitindo, inclusive, a substituição dos atuais dutos por outros de diferentes formatos ou até mesmo do cilindro sem que a capacidade de solução da simulação seja afetada.

O Star CCM+ permite a automação desses parâmetros de geometria através de um comando.

Para que esse comando pudesse ser aplicado foi necessário separar todos os corpos do modelo em estudo e oferecer a cada um deles os graus de liberdade nos eixos do sistema de coordenadas cartesiana (x, y e z). Conforme indicado na figura 29.

Figura 29 - Vista explodida dos diferentes corpos do modelo

Fonte: Autor (2016)

A possibilidade de movimento foi dada aos seguintes corpos:

- Translação em x e y no duto reto;
- Translação em x e y no duto curvo;
- Translação em z nas válvulas.

Após a automação das translações dos corpos foram realizadas mais 2 simulações com 4000 iterações numéricas cada para verificar se a malha havia sido afetada e os resultados dessas simulações também convergiram comprovando que a automação não havia afetado a malha previamente definida.

Vale ressaltar que não foi permitido ao modelo a rotação em torno dos eixos x y e z e nem a translação do eixo z, portanto, não há como avaliar o impacto no fluxo de ar, caso falhas desse tipo ocorram no processo de fabricação da peça.

Por fim, foram geradas macros no software onde foram gravados os procedimentos de translação das válvulas, dutos e geração da malha.

4.8 Obtenção do número de *Swirl* médio

Conforme apresentado na revisão bibliográfica para a obtenção do número de *Swirl*, através do experimento da vazão estática, é necessário conhecer as seguintes grandezas:

- Momento gerado no favo;
- Curso do pistão;
- Vazão mássica de ar medida na saída da câmara de combustão.

Na simulação CFD a obtenção dessas grandezas é obtida de forma similar, porém, sem a existência de um favo instalado no final da câmara de combustão.

O momento, por exemplo, é obtido através dos vórtices gerados no final da câmara de combustão.

O curso do pistão é dado e a vazão pode ser medida na face de saída do ar, no final da câmara de combustão.

O *Swirl* de cada abertura de válvula, denominado instantâneo, pôde ser calculado dentro do próprio Star CCM+ através da criação de uma função suporte feita com base nas variáveis acima citadas.

O cálculo do *Swirl* médio foi feito com base em tabelas que foram anexadas entre os apêndices A e J e que consiste em integrar os valores de *Swirl* instantâneos obtidos em cada abertura de válvula, seguindo as equações descritas no capítulo 2.4.

5. RESULTADOS

Ao longo deste capítulo o objetivo principal será o de apresentar os resultados obtidos pelas simulações, mas, antes de iniciar a apresentação dos resultados em si é importante lembrar da relação causa e efeito, ou seja, neste estudo cada alteração de posição dos dutos de admissão, tanto o reto quanto o curvo, ocasionou um efeito que foi mudança no fluxo de ar no interior da câmara de combustão.

Em alguns casos foi observado aumento na velocidade do ar e em outros a redução, tudo isso devido a restrições gerada por válvulas ou seu respectivo assento.

Ao longo dos próximos parágrafos essa relação causa/efeito será apresentada teste a teste e ao final do capítulo um quadro resumo será anexado com o intuito de facilitar o entendimento dos resultados.

O teste 1 consistiu em simular um cabeçote em sua condição de projeto, sem deslocamentos nos dutos reto e curvo e o objetivo foi desenvolver uma documentação que possa ser usada tanto para validação da simulação em CFD quanto base de comparativo para os demais testes.

Na figura 30 é apresentado a condição dos dutos simulada no teste 1.

Figura 30 - Cabeçote sem deslocamento dos dutos

Fonte: Autor (2016)

O teste 1, cujo cálculo completo pode ser visto no apêndice A, apresentou o resultado do *Swirl* médio $\frac{n_D}{n} = 2,16$, tendo sido considerado o cabeçote nas

condições de projeto, ou seja, sem possíveis desvios oriundos do processo de fabricação.

O resultado obtido pela simulação em CFD é um valor admitido pela montadora, apresentando indícios de que a simulação está validada e que a preparação do modelo, descrita previamente no capítulo anterior, atende as necessidades desse estudo.

A segunda forma de validação das simulações foi feita através da comparação de imagens dos vetores de velocidade obtidos na simulação CFD com os resultados obtidos pela VSE através da medição realizada por PIV em um cabeçote idêntico ao utilizado na simulação e que foi considerado aprovado pela montadora.

As medições realizadas pelo ensaio PIV apresentam o comportamento do ar em diferentes faces assim como os resultados apresentados pelo CFD e as comparações foram realizadas em faces correspondentes.

A figura 31 apresenta o resultado obtido pelo ensaio PIV, de um cabeçote real, na face 1,2 D para a abertura de válvula de 46,67%.

Figura 31 - Resultado obtido pelo ensaio PIV para a abertura de válvula de 46,67% na face 1,2 D

Fonte: VSE (2013)

A figura 32 apresenta o resultado obtido na simulação CFD, de um cabeçote na condição de projeto, na face 1,2 D para a abertura de válvula de 46,67%.

Figura 32 - Vetores de velocidades na face 1,2 D obtido na simulação em CFD para abertura de válvula de 46,67%

Fonte: Autor (2016)

Comparando-se as figuras 31 e 32, que correspondem à face de 1,2 D do cilindro, é possível observar em ambas:

- Aumento de velocidade do ar nas regiões próximas à parede do cilindro, pois, é para onde o fluxo de ar é direcionado devido ao posicionamento dos dutos de admissão em relação ao cilindro e à pequena abertura de válvula;
- A formação de dois vórtices principais na região central do cilindro e;
- Baixas velocidades do ar na região central do cilindro devido à distância em relação à face de medição e a pequena abertura de válvula (46,67%).

A comparação de imagens pode ser feita para todas as aberturas de válvulas e o comportamento do ar pode ser avaliado em todos eles.

A figura 33 apresenta o resultado obtido no ensaio PIV na face 1,2 D e abertura de válvula em 100%.

Figura 33 - Resultado obtido pelo PIV para abertura de válvula = 100% na face 1,2 D

Fonte: VSE (2013)

A figura 34 apresenta o resultado obtido na simulação CFD para a face 1,2 D e abertura de válvula em 100%.

Figura 34 - Vetores de velocidades na face 1,2 D obtido na simulação em CFD para a abertura de válvula de 100%

Fonte: Autor (2016)

Comparando o comportamento do ar apresentado nas figuras 33 e 34 é possível observar em ambas:

- Um único vórtice na região central;
- Baixa velocidade do ar na região central devido distância entre a face de medição e a válvula de admissão;
- Maiores velocidades do ar na região das paredes do cilindro devido posição dos dutos de admissão em relação ao cilindro;

Observa-se também que no ensaio PIV o fluxo do ar se encontra no sentido horário e na simulação em CFD no sentido anti-horário.

Isso se deve ao fato de a imagem extraída da simulação é posicionando-se na direção do cabeçote para o cilindro e no ensaio PIV a imagem foi extraída posicionando-se do fundo do cilindro para o cabeçote.

Portanto, através da comparação entre o ensaio PIV e a simulação em CFD e dos valores obtidos no cálculo do *Swirl* médio com a documentação que define os valores de *Swirl* médio aceitos pela montadora, pode-se afirmar que a simulação em CFD está validada e confiável o suficiente para as demais avaliações.

Na figura 35 é possível verificar graficamente o incremento do *Swirl* pontual proporcional à abertura de válvula. Cada um dos pontos avaliados tem uma contribuição para o cálculo do *Swirl* médio.

Figura 35 - Gráfico do *Swirl* pontual no teste 1

Fonte: Autor (2016)

Além da razão *Swirl* o teste 1 permitiu a visualização do comportamento esperado do ar no interior da câmara de combustão e com isso será possível avaliar, nos demais testes, as possíveis mudanças neste comportamento que possam vir a ocorrer devido a desvios de fabricação do cabeçote.

O escoamento do ar, obtido como resultado da simulação em CFD para o teste 1, no interior do cilindro para todas as aberturas de válvula pode ser visto na figura 36.

Figura 36 - Velocidades do ar dentro da câmara de admissão obtidos no teste 1

Fonte: Autor (2016)

Nota-se que o movimento do ar apresenta um padrão em todas as aberturas de válvula e que o mesmo é direcionado para as paredes do cilindro formando um

espiral conforme esperado pelo projeto dos dutos do cabeçote. Observa-se também, para a abertura de válvula igual a 73,33% ocorre um aumento na velocidade do ar na região do assento da válvula.

Possivelmente tal fenômeno ocorre devido ao turbilhonamento do ar associado à restrição gerada pelo assento da válvula nesta determinada abertura. Tal comportamento será observado nos demais testes para verificar se sofre alteração caso o duto de admissão esteja deslocado.

Com base nos resultados obtidos, inicia-se aqui a comparação com os demais resultados com o objetivo e compreender o impacto das tolerâncias no *Swirl* médio o que pode vir a afetar o comportamento do motor, principalmente na potência e emissão de poluentes de acordo com as revisões bibliográficas descritas no capítulo 3.

O teste 2 consistiu em deslocar os dutos reto e curvo em direções opostas um ao outro somente no eixo x em 2,5% em relação a sua condição de projeto.

Ao simular esta condição observa-se que os dutos estão ligeiramente mais afastados um do outro. Na figura 37 é apresentado o deslocamento dos dutos.

Figura 37 - Deslocamento em $x = 2,5\%$ nos dutos curvo e reto

Curvo

Reto

Fonte: Autor (2016)

O cálculo do *Swirl* médio do teste 2, cuja planilha de cálculo pode ser vista no apêndice B, apresentou variação de *Swirl* médio de 16,7%, ou seja, acima dos padrões aceitos pela montadora.

Este resultado indica também que este deslocamento deve ser evitado, pois, na prática este aumento no número de *Swirl* tende a aquecer a mistura ar-combustível mais rápido do que o desejado podendo vir a gerar pré-ignição que, além de aumentar as emissões de poluentes para a atmosfera, reduz a vida útil do motor.

Comparando os vetores de velocidade obtidos no teste 2 com o padrão do teste 1 é possível observar as diferenças e avaliar o que influencia diretamente neste aumento do *Swirl* médio.

A figura 38 indica os resultados apresentados pelo teste 2.

Figura 38 - Vetores de velocidade obtidos no teste 2 para abertura de 46,67% na face 1,2 D

Fonte: Autor (2016)

Comparando o resultado do teste 2 com o teste 1 apresentado na figura 32, nota-se:

- Aumento de velocidade na parede do cilindro próxima ao duto curvo;
- Redução de velocidade na parede do cilindro próxima ao duto reto;
- Comportamento similar em ambas as situações na região central do cilindro;
- Formação de vórtice central único desde a primeira abertura de válvula simulada (46,67%).

O aumento de velocidade vetorial na parede do cilindro próxima ao duto curvo promove um movimento rotacional mais elevado do que o esperado pelo projeto do cabeçote e essa diferença já se mostrou clara desde a primeira abertura de válvula

avaliada. Logo se conclui que o deslocamento de 2,5% no eixo x permitiu aumento na turbulência do ar que por sua vez aumentou a magnitude da velocidade e contribuiu para aumento da razão *Swirl*.

Na observação gráfica do aumento do *Swirl* pontual do teste 2 nota-se um comportamento bem diferente do obtido no teste 1, pois, a curva apresenta um crescimento muito mais linear e com valores pontuais acima de $\frac{n_D}{n} = 2,5$, conforme apresentado na figura 39.

Figura 39 - Gráfico do *Swirl* pontual do teste 2

Fonte: Autor (2016)

Nota-se também que entre aberturas de 46,67% e 53,33% os valores de *Swirl* pontal são muito similares tanto no teste 1 quanto no teste 2, porém, há um grande salto do *Swirl* pontual comparando a abertura de válvula de 73,33%.

No teste 1, o *Swirl* pontual foi, para a abertura de 73,33%, $\frac{n_D}{n} = 2,01$ e no teste 2, foi $\frac{n_D}{n} = 2,30$.

Ou seja, os efeitos do deslocamento do duto mostraram-se mais visíveis a partir deste ponto em diante, indicando que essa mudança no comportamento do ar influenciou no resultado final do *Swirl*.

É possível observar, através da figura 40, que o deslocamento do duto reduziu a restrição na passagem do ar na região do assento da válvula, que aumenta sua velocidade e que por sua vez favorece um acréscimo à turbulência do ar no interior da câmara de combustão.

Dessa forma, é possível atribuir os valores de *Swirl* médio acima do limite especificado pela montadora devido a esta restrição gerada pelo deslocamento do duto.

Figura 40 - Comparação entre o teste 1 e 2 do fluxo do ar na região do assento da válvula para abertura de válvula igual a 73,33%

Fonte: Autor (2016)

O escoamento do ar, obtido como resultado da simulação em CFD para o teste 2, no interior do cilindro para todas as aberturas de válvula pode ser visto na figura 41.

Figura 41 - Velocidades do ar dentro da câmara de admissão obtidos no teste 2

Fonte: Gerada pela simulação CFD no Star CCM+ (2016)

Observa-se que as demais aberturas de válvula do teste 2, acima de 73,33%, também apresentaram um direcionamento do ar diferente do apresentado no teste 1 se realizada uma comparação entre as figuras 36 e 41, indicando que o deslocamento no eixo x promove mudanças no comportamento do ar no interior da câmara afetando a razão *Swirl* esperada pelo cabeçote durante seu ciclo de funcionamento.

O teste 3, assim como o teste 2, consistiu em deslocar os dutos no eixo x em 2,5%, porém, dessa vez os dutos foram aproximados um do outro conforme demonstrado na figura 42.

Figura 42 - Deslocamento nos dutos curvo e reto avaliado pelo teste 3

Fonte: Autor (2016)

O resultado do *Swirl* médio do teste 3, cujo cálculo está disponível no apêndice C, indicou um desvio de - 4,76%, ou seja, nota-se uma redução do *Swirl* médio em comparação ao padrão obtido no teste 1, porém, com valores ainda dentro das tolerâncias aceitas pelo projeto do cabeçote indicando que a alteração nos dutos avaliada pelo teste 3 não modificou tanto o comportamento do ar quanto a observada no teste 2.

Nota-se também que o gráfico do *Swirl* pontual é muito similar ao obtido pelo teste 1, apresentando, inclusive, todos índices abaixo de $\frac{n_D}{n} = 2,50$ conforme apresentado pela figura 43.

Figura 43 - Gráfico do *Swirl* pontual do teste 3

Fonte: Autor (2016)

Detalhe relevante observado no teste 3 é que o *Swirl* pontual na abertura de 100% da válvula apresenta uma queda, diferente do observado nos testes anteriores. Tal detalhe também pode ser visto na figura 43.

Comparando o campo de velocidades do teste 3 com o teste 1 na abertura de 100% da válvula, nota-se que o fluxo de ar do duto curvo sofre uma maior interferência da válvula situada à sua esquerda (duto reto) ocasionando uma redução do fluxo de ar no interior da câmara de combustão e consequentemente a redução do *Swirl* pontual. Tal fenômeno pode ser observado na figura 44.

Figura 44 - Comparação entre o teste 1 e 3 do fluxo do ar na região do assento da válvula para abertura de 100%

Fonte: Autor (2016)

Ainda avaliando o campo de velocidades outra observação relevante é que, em todas as aberturas do teste 3, o fluxo de ar é direcionado para a parede do cilindro de tal forma que na região final da câmara de combustão (próxima ao PMI) há uma leve redução na circulação ar, justificando a redução no *Swirl* médio conforme apresentado pela figura 45.

Figura 45 - Velocidades do ar dentro da câmara de admissão obtidos no teste 3

Fonte: Autor (2016)

Em relação à observação das velocidades vetoriais na face 1,2 D foi verificado o mesmo comportamento obtido no teste 1, tornando irrelevante sua representação neste material.

O teste 4 avaliou alterações no número de *Swirl* médio considerando os seguintes deslocamentos:

- Duto reto = 2,5%;
- Duto curvo = - 2,5%.

O sentido de deslocamento é apresentado pela figura 46.

Figura 46 - Deslocamento nos dutos curvo e reto avaliados pelo teste 4

Fonte: Autor (2016)

O teste 5 avaliou alterações no número de *Swirl* médio considerando os deslocamentos opostos em relação ao teste 4, ou seja:

- Duto reto = - 2,5%;
- Duto curvo = 2,5%.

O sentido de deslocamento é apresentado pela figura 47.

Figura 47 - Deslocamento nos dutos curvo e reto avaliados pelo teste 5

Fonte: Autor (2016)

Em ambos os testes o *Swirl* médio, cujos cálculos estão disponíveis nos apêndices D e E, apresentaram resultados muito similares.

O teste 4 indicou um desvio de 8,09% em relação ao *Swirl* médio nominal enquanto o teste 5 apresentou um desvio de 9,04%, indicando que o cabeçote se mostra menos sensível a mudanças no eixo y, pois, o número de *Swirl* médio está dentro das tolerâncias aceitas pelo projeto da montadora.

A figura 48 apresenta o gráfico do *Swirl* pontual obtido no teste 1.

Figura 48 - Gráfico do *Swirl* pontual do teste 1

Fonte: Autor (2016)

A figura 49 apresenta o gráfico do *Swirl* pontual obtido no teste 4.

Figura 49 - Gráfico do *Swirl* pontual do teste 4

Fonte: Autor (2016)

A figura 50 apresenta o gráfico do *Swirl* pontual obtido no teste 5.

Figura 50 - Gráfico do *Swirl* pontual do teste 5

Fonte: Autor (2016)

Comparando o comportamento da evolução do *Swirl* pontual entre os testes 1, 4 e 5, nota-se uma similaridade entre as curvas, reforçando a hipótese de que o cabeçote é menos sensível a mudanças no eixo y.

Conforme mencionado no capítulo 4 a tolerância de projeto do cabeçote no eixo y é de 1,2% e mediante os resultados é possível sugerir uma alteração na tolerância de fabricação do cabeçote desde que uma investigação no projeto como um todo fosse realizada.

Medidas desse gênero tendem a simplificar o processo de fabricação, pois, exigem um menor controle da cadeia produtiva e, em alguns casos, é possível reduzir o custo de manufatura da peça.

Através da avaliação dos vetores de velocidades gerados pelo CFD na face 1,2 D não fica visível a razão pela qual deslocamentos no eixo y são menos relevantes do que no eixo x, pois, há diferentes velocidades na parede do cilindro quando comparados os resultados do teste 4 e 5 com o teste 1 representado pela figura 32.

A figura 51 apresenta o resultado obtido no teste 4.

Figura 51 - Vetores de velocidade do teste 4 para abertura em 100% na face 1,2 D

Fonte: Autor (2016)

A figura 52 apresenta o resultado obtido no teste 5.

Figura 52 - Vetores de velocidade do teste 4 para abertura em 100% na face 1,2 D

Fonte: Autor (2016)

Por outro lado, nota-se que o comportamento do ar é muito similar, com ênfase para:

- Vórtice central único com velocidades muito similares;
- Velocidades mais altas nas paredes do lado esquerdo da câmara de combustão;
- Velocidades mais baixas nas paredes do lado esquerdo da câmara de combustão;

No teste 6 foi simulada a hipótese de deslocamento tanto no eixo x quanto no eixo y, da seguinte forma:

- Duto reto deslocado em $x = - 2,5\%$ e $y = - 2,5\%$;
- Duto curvo deslocado em $x = 2,5\%$ e $y = 2,5\%$.

A representação dos referidos é apresentada pela figura 53.

Figura 53 - Deslocamentos nos dutos curvo e reto avaliado pelo teste 6

Fonte: Autor (2016)

Esta hipótese de deslocamentos idênticos em ambos os eixos reposiciona os dutos em condições similares às avaliadas no teste 1, ou seja, sem deslocamento. Neste teste o cálculo do *Swirl* médio comprovou que as condições foram similares ao teste 1, pois apresentou desvio de 0%.

A análise dos vetores de velocidade também demonstra que o comportamento do ar é muito similar quando comparados os testes 1 e 6, provando que o teste avaliado não teve efeitos significativos.

A figura 54 apresenta os resultados obtidos no teste 6 que podem ser comparados com os resultados do teste 1 apresentado anteriormente na figura 32.

Figura 54 - Vetores de velocidade do teste 6 para abertura de válvula em 100% na face 1,2 D

Fonte: Autor (2016)

Na prática, deslocamentos combinados dos eixos x e y são mais comuns do que somente em um único eixo como foi apresentado até o teste 5, portanto, mais testes poderiam ser realizados para avaliar o impacto de deslocamentos combinados, porém, de magnitude diferente em cada eixo, dessa forma, mudanças mais significativas no comportamento do ar seriam encontradas.

A partir do teste 7 foram realizadas simulações com deslocamentos dentro da tolerância de projeto do cabeçote.

O objetivo foi avaliar se as tolerâncias de projeto garantem um comportamento adequado do *Swirl* médio caso o cabeçote produzido se enquadre em seus limites de posição geométrica.

O deslocamento proposto foi apenas no eixo x de 1,5% no duto reto e de - 1,5% no duto curvo. O eixo y foi mantido sem deslocamento.

A figura 55 apresenta o deslocamento avaliado pelo teste 7.

Figura 55 - Deslocamentos nos dutos curvo e reto avaliados pelo teste 7

Fonte: Autor (2016)

O resultado do *Swirl* médio do teste 7, cujo cálculo está disponível no apêndice D, apresentou um desvio de 10% do valor nominal de projeto, ou seja, houve aumento em comparação ao padrão obtido no teste 1 e também acima da tolerância admitida.

Comparando os vetores de velocidade dentro da câmara de combustão entre os testes 1 representado pela figura 32 e 7 para abertura de 100% da válvula de admissão na face 1,2 D, nota-se no teste 7 uma distribuição mais uniforme em toda a parede do cilindro conforme apresentado pela figura 56, indicando um fluxo rotacional de ar maior do que observado no teste 1.

Figura 56 - Vetores de velocidade obtidos no teste 7 para abertura de 100% na face 1,2 D

Fonte: Autor (2016)

Tal fenômeno já havia sido observado no teste 2 e indica que a tendência permanece mesmo reduzindo o deslocamento dos dutos para dentro da tolerância de projeto, comprovando que deslocamentos no eixo x influenciam diretamente no número de *Swirl* médio.

O teste 2 havia apresentado uma maior diferença no comportamento do ar a partir da abertura de 73,33%, pois, o ar admitido pelo duto curvo sofria uma menor interferência da válvula do duto reto que tendia a aumentar a velocidade do ar e alterar seu direcionamento no interior da câmara de combustão.

Este mesmo fenômeno foi observado no teste 7, porém, com menor intensidade.

Na figura 57 é possível observar que o teste 7 apresentou resultados com características similares tanto ao teste 2, cujos deslocamentos foram de 2,5% no duto reto e -25% no duto curvo, quanto ao teste 1 que não possui deslocamento dos dutos em relação à condição de projeto.

Figura 57 - Comparação entre o teste 1, 2 e 7 do fluxo do ar na região do assento da válvula para abertura da válvula em 73,33%

O teste 8 simulou condições similares às do teste 3, porém, deslocando os dutos dentro da tolerância de projeto.

Os deslocamentos foram somente no eixo x, sendo de -1,5% no duto reto e de 1,5% no duto curvo conforme apresentado pela figura 58.

Figura 58 - Deslocamentos nos dutos curvo e reto avaliado pelo teste 8

Fonte: Autor (2016)

Essa simulação apresentou desvio no *Swirl* médio de -3,33%, ou seja, dentro da tolerância admitida e com características muito similares às apresentadas pelo teste 3.

A figura 59 apresenta o resultado obtido no teste 3 para abertura de válvula em 73,33%.

Figura 59 - Vetores de velocidade do teste 3 para abertura da válvula em 73,33% na face 1,2 D

Fonte: Autor (2016)

A figura 60 apresenta o resultado obtido no teste 8 para abertura de válvula em 73,33%.

Figura 60 - Vetores de velocidade do teste 8 para abertura da válvula em 73,33% na face 1,2 D

Fonte: Autor (2016)

A comparação entre os testes indica que o comportamento do ar é semelhante entre ambos.

A figura 61 apresenta o gráfico da evolução do *Swirl* pontual do teste 8.

Figura 61 - Gráfico do *Swirl* pontual do teste 8

Fonte: Autor (2016)

Comparando as figuras 43 e 61 é possível concluir que a evolução do *Swirl* pontual também é similar para ambos os testes.

Por fim, os testes 9 e 10 simularam condições semelhantes às do teste 4 e 5, ou seja, apenas deslocamentos no eixo y, porém, dentro das tolerâncias de projeto.

Portanto, o teste 9 considerou deslocamento de 1,2% no duto reto e - 1,2% no duto curvo conforme apresentado pela figura 62.

Figura 62 - Deslocamento nos dutos curvo e reto avaliado pelo teste 9

Fonte: Autor (2016)

O teste 10 considerou deslocamento de - 1,2% no duto reto e 1,2% no duto curvo conforme apresentado pela figura 63.

Figura 63 - Deslocamento nos dutos curvo e reto avaliado pelo teste 10

Fonte: Autor (2016)

No teste 9 o cálculo do *Swirl* médio, cujo cálculo está disponível no apêndice I, apresentou desvio de 9,04% em relação ao valor nominal e no teste 10, cujo cálculo está disponível no apêndice J, observou-se desvio de 3,33% em relação ao valor nominal.

Ambos os resultados reforçam a hipótese de que o cabeçote é menos sensível a mudanças que venham a ocorrer somente no eixo y, pois, tal comportamento já havia sido identificado nos testes 4 e 5.

Um resumo dos resultados obtidos é apresentado na tabela 3 onde é possível verificar que o *Swirl* sofre maiores desvios quando os dutos são deslocados somente no eixo x.

Tabela 3 - Resumo dos resultados obtidos

	Duto reto		Duto curvo		<i>Swirl</i> pontual						Desvio <i>Swirl</i> médio (%)	Resultado
	X (%)	Y (%)	X (%)	Y (%)	46,67%	53,33%	73,33%	86,67%	93,33%	100%		
Teste 1	0	0	0	0	1,67	1,42	2,01	2,27	2,23	2,33	0	Padrão
Teste 2	2,5	0	-2,5	0	1,48	1,62	2,3	2,52	2,58	2,67	16,7	Fora da tolerância
Teste 3	-2,5	0	2,5	0	1,23	1,46	1,96	2,03	2,12	2,08	- 4,76	Dentro da tolerância
Teste 4	0	2,5	0	-2,5	1,38	1,62	2,28	2,36	2,35	2,4	8,09	Dentro da tolerância
Teste 5	0	-2,5	0	2,5	1,57	1,73	2,15	2,33	2,37	2,52	9,04	Dentro da tolerância
Teste 6	-2,5	-2,5	2,5	2,5	1,42	1,59	2,09	2,16	2,24	2,31	0	Dentro da tolerância
Teste 7	1,5	0	-1,5	0	1,43	1,55	2,15	2,37	2,44	2,5	10	Fora da tolerância
Teste 8	-1,5	0	1,5	0	1,18	1,42	1,96	2,06	2,17	2,14	- 3,33	Dentro da tolerância
Teste 9	0	1,2	0	-1,2	1,27	1,51	2,14	2,36	2,48	2,34	9,04	Dentro da tolerância
Teste 10	0	-1,2	0	1,2	1,46	1,54	2,12	2,18	2,27	2,34	3,33	Dentro da tolerância

Fonte: Autor (2016)

Com o objetivo de complementar as informações apresentadas na tabela acima foi desenvolvida a tabela 4, onde se apresenta de forma resumida, os testes com maior e menor relevância bem como um comentário que antecipa as conclusões extraídas por este estudo.

Tabela 4 - Grau de relevância de cada teste avaliado

Teste	Relevância	Comentário
1	Alta	Teste definiu o padrão para avaliação dos demais testes. A validação dos resultados foi feita com outras medições realizadas por experimento da vazão estática e medições no ensaio do tipo PIV.
2	Alta	Teste apontou que deslocamentos no sentido avaliado tendem a elevar sensivelmente o número de <i>Swirl</i> , oferecendo riscos aos padrões estabelecidos no projeto do cabeçote.
3	Baixa	Teste apontou que mesmo deslocando os dutos acima da tolerância de projeto o impacto no número de <i>Swirl</i> é relativamente baixo.
4	Alta	Teste apontou que deslocamentos apenas no eixo y não alteram o número de <i>Swirl</i> a níveis acima do especificado
5	Baixa	Teste confirmou a hipótese de que deslocamentos no eixo y acima da tolerância de projeto não alteram o número de <i>Swirl</i> a níveis acima do especificado
6	Alta	Teste indicou que deslocamentos idênticos nos eixos x e y não influenciam o comportamento do número de <i>Swirl</i> . Além disso, sugere a necessidade de mais testes com alteração em ambos eixos cartesianos, porém, com deslocamentos diferentes em cada eixo. Por fim, os resultados obtidos no teste 1 foram confirmados.
7	Alta	Teste confirmou a hipótese de que o comportamento do número de <i>Swirl</i> é sensivelmente alterado quando ocorre deslocamentos no eixo x mesmo quando o deslocamento dos dutos é feito dentro da tolerância de projeto. Além disso, teste levanta um alerta às tolerâncias do cabeçote, sugerindo um controle no referido deslocamento do duto
8	Baixa	Teste comprovou hipótese levantada no teste 3.
9	Baixa	Teste apresentou resultados similares aos obtidos no teste 4 e 5, indicando que o referido deslocamento dos dutos não prejudica o comportamento do número de <i>Swirl</i> .
10	Baixa	Teste apresentou resultados similares aos obtidos no teste 4 e 5, indicando que o referido deslocamento dos dutos não prejudica o comportamento do número de <i>Swirl</i> .

5.1 Análise dos resultados

Através da observação dos resultados apresentados é possível analisar alguns comportamentos característicos do cabeçote. Essas características serão descritas nos parágrafos abaixo para que posteriormente uma aplicabilidade do estudo seja efetuada.

O deslocamento dos dutos de admissão tem influência direta no comportamento do *Swirl* no interior da câmara de combustão. Tal fato pôde ser observado mais claramente após abertura de 73,33% da válvula, pois, o fluxo de ar é melhor direcionado para o interior da câmara de combustão.

Em aberturas de válvula inferiores a 73,33% o movimento do ar sofre grande influência da válvula que se encontra quase fechada, logo, observou-se em todos os testes um forte turbilhonamento do ar na região da sede e comportamento muito semelhante em todos os testes independente do deslocamento dos dutos.

Para o cabeçote e as condições avaliadas por este trabalho, os deslocamentos no eixo x promoveram uma alteração maior no número de *Swirl* do que os deslocamentos no eixo y, indicando que tal deslocamento é mais prejudicial e que, portanto, deve ser melhor controlado no processo de fabricação.

Em todos os casos, devido o tipo de geometria dos dutos de admissão, o ar gira no sentido anti-horário tendendo a formar um único vórtice na região central da câmara de combustão que ganha forma em aberturas de válvula superiores a 73,33%.

As velocidades do ar na região da parede da câmara de combustão são bem maiores do que as observadas na região central. Isso se deve ao formato dos dutos de admissão que direcionam o ar para a parede da câmara.

5.2 Aplicabilidade do estudo

O estudo realizado consegue identificar o impacto que um deslocamento de duto pode provocar no fluxo de ar sem a necessidade de testes práticos e/ou destrutivos. Uma base qualitativa de dados foi formada e foi provado que deslocamentos no eixo x afetam diretamente o número de *Swirl* para condições não aceitas por projeto, o

que pode vir a ocasionar alterações no comportamento do motor em funcionamento, seja em seu desempenho ou nos níveis de emissão de poluentes.

As informações obtidas por este estudo associada a tecnologias de controle de qualidade podem vir a se tornar uma ferramenta para aprovação ou rejeição de cabeçotes antes de sua montagem final colaborando para uma melhor eficiência de processo.

Um exemplo de tecnologia de medição rápida de peças é a célula automatizada de medição denominada ATOS Scanbox®. Essa célula de medição possui como princípio de funcionamento a medição de peças através de sua digitalização e comparação com o 3D geométrico da peça de projeto previamente carregado no software. O relatório aponta as áreas de desvios em relação ao projeto e dessa forma é possível aprovar ou rejeitar a peça (GOM, 2016).

A figura 64 mostra um exemplo de célula automatizada que, de acordo, com a GOM (2016) tem se mostrado eficiente na medição de peças fundidas como é o caso do cabeçote avaliado por este estudo.

Figura 64 - Ilustração de uma célula de medição

Fonte: GOM MBH (2016)

Supondo a tecnologia acima e a criação de um mapa como o representado pela tabela 5, que foi originado através das simulações elaboradas por este estudo, seria possível desenvolver não apenas um controle de processo como também a

compreensão de possíveis eventos no processo de fundição que originam desvios nos dutos.

Tabela 5 - Mapa de variação do *Swirl* conforme deslocamento dos dutos

	Duto Reto		Duto Curvo		Desvio <i>Swirl</i> Médio	Resultado	Ação
	X (%)	Y (%)	X (%)	Y (%)			
Teste 1	0	0	0	0	0%	Padrão	Aprova cabeçote
Teste 2	2,5	0	-2,5	0	16,7%	Fora da tolerância	Rejeita cabeçote
Teste 3	-2,5	0	2,5	0	4,76%	Dentro da tolerância	Aprova cabeçote
Teste 4	0	2,5	0	-2,5	8,09%	Dentro da tolerância	Aprova cabeçote
Teste 5	0	-2,5	0	2,5	9,04%	Dentro da tolerância	Aprova cabeçote
Teste 6	-2,5	-2,5	2,5	2,5	0%	Dentro da tolerância	Aprova cabeçote
Teste 7	1,5	0	-1,5	0	10%	Fora da tolerância	Rejeita cabeçote
Teste 8	-1,5	0	1,5	0	3,33%	Dentro da tolerância	Aprova cabeçote
Teste 9	0	1,2	0	-1,2	9,04%	Dentro da tolerância	Aprova cabeçote
Teste 10	0	-1,2	0	1,2	0%	Dentro da tolerância	Aprova cabeçote

Fonte: Autor (2016)

6. CONCLUSÕES

O trabalho demonstra que a simulação em CFD ajuda a compreender melhor o comportamento do ar com uma certa independência em relação ao número de *Swirl* calculado. Isso contribuiu para uma análise mais detalhada do comportamento do ar no interior da câmara.

Foi observado em alguns casos, por exemplo, que apesar do *Swirl* pontual calculado ser diferente entre um teste e outro o comportamento do ar em si era muito semelhante, ou seja, a ferramenta demonstra que somente a observação numérica não dá uma dimensão completa do que pode vir a ocorrer na prática sugerindo um uso simultâneo com os testes práticos para a obtenção de melhores resultados.

O software de CFD Star CCM+ se mostrou confiável, de interface fácil de utilizar e com diversas ferramentas que facilitam a análise dos resultados.

A malha necessitou de ajustes e avaliações preliminares até que o resultado esperado fosse atingido, o que colaborou para a convergência de todos os testes de modo similar em com número de iterações semelhantes em todos os modelos.

Outro ponto forte neste estudo é a automação realizada no Star CCM+ para simular diferentes deslocamentos. Essa automação permite que muitos outros testes possam ser realizados sem grandes esforços para ajuste em malhas e correção do modelo 3D.

O trabalho colabora também para a formação de uma base de dados que pode vir a ser usada para aprovar ou até mesmo rejeitar um determinado cabeçote oriundo do processo de fundição. Antecipando dessa forma possíveis desvios que hoje são encontrados após a montagem final do cabeçote e trazendo vantagens ao processo produtivo no quesito redução de desperdícios.

Por outro lado, poucos testes foram realizados mediante a imensidão de probabilidade de falhas que possam a vir ocorrer no processo de fundição do cabeçote físico. Isso fez com que a quantidade de amostra não permitisse um estudo estatístico detalhado, mas sim, uma avaliação qualitativa do comportamento do ar.

A comparação dos resultados obtidos na simulação CFD com o ensaio PIV que fora realizado em um cabeçote real comprova que a simulação apresenta resultados corretos, porém, uma validação com uma terceira fonte de resultados que seria o experimento da vazão estática não foi feita, o que traria ainda mais confiança nos resultados apresentados pela simulação.

O tempo para simulação dos testes foi relativamente longo, o que demonstra que a ferramenta CFD ainda está muito mais voltada para a área de pesquisa e desenvolvimento do que para auxílio no processo de produção apesar de sua constante evolução.

Ainda sobre a simulação em CFD, pode-se afirmar que, apesar de ter sido extensamente estudada, ela pode ser melhorada se considerado fatores construtivos que ocorrem em uma peça real como, por exemplo, a rugosidade das paredes do duto de admissão.

Por fim, vale reforçar que este trabalho não teve como objetivo central avaliar a emissão de poluentes, mas o que se espera é que ele auxilie na busca de motores mais eficientes e com menores índices de emissão para que as gerações futuras possam usufruir de um mundo mais limpo e saudável.

7. TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento deste trabalho mostrou que há a possibilidade de continuação do tema.

Uma das possibilidades seria testar diferentes modelos de turbulência, pois, podem apontar mudanças no comportamento do ar, principalmente em regiões próximas às paredes do duto onde o modelo κ - ϵ simplifica, em partes, a solução numérica.

Avaliar, através de simulação em CFD, o efeito da compressão no *Swirl*. O estágio de compressão do pistão dentro da câmara de combustão altera significativamente o comportamento do ar. Esse efeito é o que ocorre na prática e nem mesmo o experimento da vazão estática pode prever essas mudanças. Uma simulação CFD pode colaborar no entendimento dos efeitos de todos os estágios de funcionamento do motor.

Testar diferentes defeitos de fabricação como, por exemplo, a rotação dos dutos em torno dos eixos x, y e z, bem como translação dos dutos no eixo z. Na prática, os desvios de fabricação de uma peça podem ser diferentes dos simulados neste estudo. Efeitos como rotação dos dutos podem alterar os resultados obtidos. Novos testes com a inclusão dessas falhas aumentariam a base de dados para um possível controle de processo e desenvolvimento de novos produtos.

Simular mais testes incluindo deslocamentos entre x e y simultaneamente aumentando assim a quantidade de amostras e formando uma base para estudo estatístico para o processo de fabricação da peça.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, J. D., “Computational Fluid Dynamics – The Basics With Applications”. McGraw-Hill Inc., Primeira edição, Nova Iorque, 1995.

AVL *Fire Engine*. Apresentação do produto. Disponível em: <<https://www.avl.com/-/avl-fire-engine>>. Acesso em: 16 de Jul. 2016.

BOTTONE, F. et al., “Large Eddy Simulation of Diesel Engine In-cylinder Flow”, *Flow Turbulence Combust*, pg 233-253, 2012.

COLIN, O.; BENKENIDA A., “The 3-Zones extended coherent flame model (ECFM3Z) for computing premixed/diffusion combustion”, *Oil & Gas Science Technology – Rev. IFP*, vol. 59, pg 593–609, 2004.

GOM, MBH.; Apresentação do produto. Disponível em: <<https://http://www.gom.com/metrology-systems/atos-scanbox.html>>. Acesso em: 24 de Julho, 2016.

GAFOOR, C. P. A.; GUPTA R. “Numerical Investigation of piston bowl geometry and swirl ratio on emission from diesel engines”, *Energy Conversion and Management*, vol. 101, pg 541-551, 2015.

GRANDQUIST, D. “Avaliação de parâmetros geométricos e seus efeitos na turbulência de um cabeçote XPI, através de uma análise estática”, tese de graduação, KTH Industriell Teknik och management, Suécia, 2010.

HANJALIC, K.; POPOVAC, M.; HADZIABDIC, M., “A robust near-wall elliptic-relaxation-eddy-viscosity turbulence model for CFD”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 25, pg 1047-1051, 2004.

HEYWOOD, J.B., “Internal Combustion Engine Fundamentals”, McGraw-Hill Inc., Segunda edição, Nova Iorque, 1989.

H. SUSHMA, JAGADEESHA K.B., “CFD modeling of the in-cylinder flow in Direct-Injection Diesel Engine”, *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol 3, Issue 12, India, 2013.

JEBAMANI, D. R; KUMAR, T. M. N, “Studies on variable swirl intake system for DI diesel engine using computational fluid dynamics”, Thermal Science, vol.12, pg 25-32, 2008.

JÚNIOR, F. V. Z., “Simulação Numérica do Escoamento Turbulento em Motores de Combustão Interna”, tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

KANG, K. Y.; REITZ, R. D., “The Effect of intake valve alignment on swirl generation in a DI diesel engine”, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 20, pg 94-103, 1999.

LAVISION; Apresentação do produto. Disponível em: <<http://www.lavision.de/en/products/spraymaster/spraymaster.php>>. Acesso em: 06 de Novembro, 2016.

LEE, K. H; CHO W. J.; KIM, H. M., “Effect of injection condition and swirl on D.I diesel combustion in a transparent engine system”, International Journal of Automotive Technology, vol.9, pg 535-541, 2008.

LINDGREN, B. “DM 503/531 – BESKRIVNING”. Documento interno da montadora, Suécia 2003.

METIN, O.; ASHOK D.; PARNELL, K., “CFD Fundamentals and Applications”, Workshop, 200?.

PAUL, B.; GANESAN, V., “Flow field development in direct injection diesel engine with different manifolds”, International Journal of Engineering, Science and Technology, vol. 2, pg 80-91, 2010.

PRASAD, B. V. V. S. U.; SHARMA C. S, “High swirl-inducing piston bowls in a small diesel engines for emission reduction”, journal Applied Energy, 2010.

PULKRABEK, W. W., “Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine”, Prentice Hall, Primeira Edição, New Jersey, 1997.

ROLÉN, J., “Towards Intake Port Optimization and Swirl Variation Prediction”, tese de Mestrado. Universidade de Linköping, Suécia, 2014.

SEMINÁRIO SOBRE EMISSÕES DE VEÍCULOS DIESEL, 1., 2009, São Paulo, PRONCOVE – As Fases Passadas e Futuras: ANFAVEA, 2009. Disponível em <<http://www.anfavea.com.br/documentos/SeminarioItem1.pdf>>. Acesso em: 04 Jul. 2016.

SHAW, C.T., “Using Computational Fluid Dynamics”, Editora Prentice Hall, 1992.

STAR CCM+ versão 9.06: User Guide, CD-adapco, 2014.

STAR CCM+ versão 9.06: tutorials, CD-adapco, 2014.

STAR CD e es-ice. Apresentação do produto CD-adapco. Disponível em: <<http://www.cd-adapco.com/products/star-cd%C2%AE>>. Acesso em: 16 de Jul. 2016.

SREENIVASULU M., “Influence of *swirl* on spray characteristics and combustion, a numerical investigation of a Caterpillar diesel engine”, International Journal of Engineering Science and Technology, 2012.

VALE Soluções em Energia, “REL05643 RELATÓRIO DE ENSAIO”. Data de aprovação: 13/12/2013. Tipo de Ensaio: flow coefficient and flow field characteristic numbers, São Paulo, 2013.

VEIGA, M. F., “Avaliação do efeito da variação da razão ar-combustível por cilindro em motores de combustão interna de ignição por centelha”, tese de graduação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

VERSTEEG H. K; MALALASEKERA, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics", Primeira edição, 1995.

WESSELING P., “Principles of Computational Fluid Dynamics”, Primeira Edição, 2000.

APÊNDICE A – PLANILHA DE CÁLCULO DO SWIRL MÉDIO DO TESTE 1

Este apêndice apresenta o método de cálculo do *Swirl* médio do teste 1.

A equação solucionada na tabela pode ser descrita da seguinte forma:

$$(c(\alpha))/c_m = \pi/2 (1 + (\lambda \cdot \cos(\alpha)) / \sqrt{(1 - \lambda^2 \cdot \sin^2(\alpha))}) \sin(\alpha)$$

Tabela 6 - Cálculo do *Swirl* médio do teste 1

(Continua)

IVO		IVC						
336	588				$(\mu\sigma)_m$	Com Peso de 89,71%	$(n_D/n)_m$	
Cam Profile						2,1663	1,9434	
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$		$n_D/n(\alpha)$	
395	6,10	6,89	0,01745	1,1364	0,0477	11,2500	0,16700	0,003763751
396	6,32	6,91	0,01745	1,1617	0,1527	1,1739	0,53440	0,012587702
397	6,54	6,93	0,01745	1,1865	0,2576	0,4392	0,90180	0,022158406
398	6,76	6,95	0,01745	1,2107	0,3626	0,2356	1,26920	0,032472415
399	6,99	6,96	0,01745	1,2344	0,4700	0,1486	1,64495	0,043745543
400	7,21	6,98	0,01745	1,2574	0,5046	0,1363	1,61792	0,044648303
401	7,44	7,00	0,01745	1,2799	0,5340	0,1283	1,56212	0,044660847
402	7,66	7,02	0,01745	1,3017	0,5634	0,1213	1,50632	0,04454694
403	7,88	7,03	0,01745	1,3229	0,5922	0,1152	1,45176	0,044343574
404	8,10	7,05	0,01745	1,3435	0,5471	0,1414	1,27980	0,040316459
405	8,32	7,07	0,01745	1,3634	0,4133	0,2589	0,96696	0,031372051
406	8,54	7,09	0,01745	1,3827	0,2796	0,5902	0,65412	0,021827037
407	8,75	7,10	0,01745	1,4013	0,1504	2,1222	0,35194	0,012062623
408	8,97	7,12	0,01745	1,4193	0,0213	110,2578	0,04977	0,001749877
409	9,18	7,14	0,01745	1,4366	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
410	9,39	7,16	0,01745	1,4533	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
411	9,59	7,17	0,01745	1,4693	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
412	9,79	7,19	0,01745	1,4845	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
413	9,98	7,21	0,01745	1,4992	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
414	10,18	7,23	0,01745	1,5131	0,1133	4,7111	0,36180	0,014456605
415	10,36	7,24	0,01745	1,5263	0,2266	1,2089	0,72360	0,029421171
416	10,54	7,26	0,01745	1,5388	0,3399	0,5507	1,08540	0,044860022
417	10,72	7,28	0,01745	1,5507	0,4531	0,3170	1,44720	0,060738034
418	10,90	7,30	0,01745	1,5619	0,5664	0,2073	1,80900	0,077018765
419	11,06	7,31	0,01745	1,5723	0,5900	0,1949	1,88438	0,081306075
420	11,23	7,33	0,01745	1,5821	0,4877	0,2905	1,55775	0,068050463

(Continuação)

IVO		IVC							
336	588					$(\mu\sigma)_m$	Com Peso de 89,71%	$(n_D/n)_m$	
Cam Profile							2,1663	1,9434	
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$		$n_D/n(\alpha)$		
421	11,39	7,35	0,01745	1,5911	0,3855	0,4732	1,23113	0,054400241	
422	11,55	7,37	0,01745	1,5995	0,2832	0,8905	0,90450	0,040389416	
423	11,70	7,38	0,01745	1,6072	0,1904	1,9992	0,60802	0,027412124	
424	11,85	7,40	0,01745	1,6142	0,0975	7,7143	0,31155	0,014168365	
425	11,99	7,42	0,01745	1,6205	0,0047	3333,6077	0,01508	0,000690931	
426	12,14	7,44	0,01745	1,6261	0,0911	9,0384	0,31780	0,014666876	
427	12,27	7,45	0,01745	1,6311	0,1774	2,4075	0,61858	0,028721607	
428	12,41	7,47	0,01745	1,6353	0,2636	1,0985	0,91935	0,042910315	
429	12,54	7,49	0,01745	1,6389	0,3498	0,6278	1,22013	0,057198755	
430	12,67	7,50	0,01745	1,6418	0,4361	0,4062	1,52090	0,071552733	
431	12,79	7,52	0,01745	1,6441	0,5109	0,2971	1,78195	0,084064181	
432	12,90	7,54	0,01745	1,6457	0,5858	0,2267	2,04300	0,096566131	
433	13,02	7,56	0,01745	1,6466	0,6510	0,1838	2,26940	0,107390007	
434	13,13	7,57	0,01745	1,6469	0,6523	0,1832	2,26480	0,107210792	
435	13,23	7,59	0,01745	1,6466	0,6533	0,1825	2,26090	0,106981631	
436	13,33	7,61	0,01745	1,6456	0,6544	0,1816	2,25700	0,106670852	
437	13,42	7,63	0,01745	1,6440	0,6554	0,1805	2,25310	0,106280047	
438	13,52	7,64	0,01745	1,6418	0,6565	0,1792	2,24920	0,105810936	
439	13,60	7,66	0,01745	1,6390	0,6574	0,1778	2,24590	0,105293492	
440	13,69	7,68	0,01745	1,6355	0,6582	0,1762	2,24260	0,104701312	
441	13,77	7,70	0,01745	1,6315	0,6591	0,1745	2,23930	0,104036402	
442	13,85	7,71	0,01745	1,6270	0,6600	0,1725	2,23600	0,103300873	
443	13,92	7,73	0,01745	1,6218	0,6607	0,1706	2,23340	0,102529063	
444	13,98	7,75	0,01745	1,6161	0,6614	0,1684	2,23080	0,101690676	
445	14,05	7,77	0,01745	1,6099	0,6619	0,1662	2,23450	0,101072984	
446	14,11	7,78	0,01745	1,6031	0,6622	0,1640	2,24100	0,10051419	
447	14,16	7,80	0,01745	1,5958	0,6625	0,1616	2,24575	0,099810565	
448	14,21	7,82	0,01745	1,5879	0,6627	0,1591	2,25050	0,099043188	
449	14,25	7,84	0,01745	1,5796	0,6630	0,1565	2,25525	0,09821406	
450	14,30	7,85	0,01745	1,5708	0,6632	0,1538	2,26000	0,097325257	
451	14,34	7,87	0,01745	1,5615	0,6634	0,1510	2,26350	0,096325725	
452	14,37	7,89	0,01745	1,5517	0,6636	0,1481	2,26700	0,095272184	
453	14,41	7,91	0,01745	1,5415	0,6638	0,1451	2,27050	0,094166968	
454	14,44	7,92	0,01745	1,5309	0,6640	0,1420	2,27400	0,093012445	
455	14,46	7,94	0,01745	1,5198	0,6641	0,1389	2,27550	0,091730397	

IVO	IVC								
336	588						$(\mu\sigma)_m$	Com Peso de 89,71%	$(n_D/n)_m$
Cam Profile							2,1663	1,9434	
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$		$n_D/n(\alpha)$		
456	14,47	7,96	0,01745	1,5083	0,6642	0,1358	2,27700	0,090406309	
457	14,49	7,98	0,01745	1,4964	0,6642	0,1325	2,27850	0,089042729	
458	14,50	7,99	0,01745	1,4841	0,6643	0,1293	2,28000	0,087642207	
459	14,50	8,01	0,01745	1,4714	0,6643	0,1260	2,28000	0,086150614	
460	14,50	8,03	0,01745	1,4583	0,6643	0,1227	2,28000	0,084629167	
461	14,50	8,05	0,01745	1,4449	0,6643	0,1193	2,28000	0,083080446	
462	14,50	8,06	0,01745	1,4312	0,6643	0,1159	2,28000	0,081507	
463	14,50	8,08	0,01745	1,4171	0,6643	0,1125	2,28000	0,079911348	
464	14,50	8,10	0,01745	1,4027	0,6643	0,1091	2,28000	0,07829597	
465	14,50	8,12	0,01745	1,3880	0,6643	0,1058	2,28000	0,076663308	
466	14,50	8,13	0,01745	1,3730	0,6643	0,1024	2,28000	0,075015753	
467	14,49	8,15	0,01745	1,3577	0,6642	0,0990	2,27850	0,073307391	
468	14,47	8,17	0,01745	1,3422	0,6642	0,0957	2,27700	0,071590969	
469	14,46	8,19	0,01745	1,3264	0,6641	0,0923	2,27550	0,069868738	
470	14,44	8,20	0,01745	1,3103	0,6640	0,0891	2,27400	0,068142883	
471	14,41	8,22	0,01745	1,2940	0,6638	0,0858	2,27050	0,066357071	
472	14,37	8,24	0,01745	1,2775	0,6636	0,0826	2,26700	0,064574763	
473	14,34	8,26	0,01745	1,2608	0,6634	0,0795	2,26350	0,062797938	
474	14,30	8,27	0,01745	1,2439	0,6632	0,0764	2,26000	0,061028492	
475	14,25	8,29	0,01745	1,2267	0,6630	0,0733	2,25525	0,059235408	
476	14,21	8,31	0,01745	1,2094	0,6627	0,0703	2,25050	0,057455096	
477	14,16	8,33	0,01745	1,1920	0,6625	0,0673	2,24575	0,055689196	
478	14,11	8,34	0,01745	1,1743	0,6622	0,0645	2,24100	0,053939269	
479	14,05	8,36	0,01745	1,1566	0,6619	0,0616	2,23450	0,052165933	
480	13,98	8,38	0,01745	1,1386	0,6614	0,0589	2,23080	0,050477307	
481	13,92	8,40	0,01745	1,1206	0,6607	0,0563	2,23340	0,048945388	
482	13,85	8,41	0,01745	1,1024	0,6600	0,0537	2,23600	0,047424467	
483	13,77	8,43	0,01745	1,0841	0,6591	0,0512	2,23930	0,045930209	
484	13,69	8,45	0,01745	1,0656	0,6582	0,0487	2,24260	0,044448532	
485	13,60	8,46	0,01745	1,0471	0,6574	0,0464	2,24590	0,042980636	
486	13,52	8,48	0,01745	1,0285	0,6565	0,0441	2,24920	0,04152766	
487	13,42	8,50	0,01745	1,0098	0,6554	0,0418	2,25310	0,040101364	
488	13,33	8,52	0,01745	0,9911	0,6544	0,0397	2,25700	0,038691306	
489	13,23	8,53	0,01745	0,9722	0,6533	0,0376	2,26090	0,03729847	
490	13,13	8,55	0,01745	0,9533	0,6523	0,0355	2,26480	0,035923784	
491	13,02	8,57	0,01745	0,9344	0,6510	0,0336	2,26940	0,034578793	

IVO	IVC							
336	588						Com Peso de 89,71%	$(n_D/n)_m$
Cam Profile							2,1663	1,9434
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$	$(\mu\sigma)_m$	$n_D/n(\alpha)$	
492	12,90	8,59	0,01745	0,9153	0,5858	0,0390	2,04300	0,029874871
493	12,79	8,60	0,01745	0,8963	0,5109	0,0481	1,78195	0,024983417
494	12,67	8,62	0,01745	0,8772	0,4361	0,0619	1,52090	0,020424046
495	12,54	8,64	0,01745	0,8580	0,3498	0,0901	1,22013	0,015677674
496	12,41	8,66	0,01745	0,8389	0,2636	0,1483	0,91935	0,011290933
497	12,27	8,67	0,01745	0,8197	0,1774	0,3055	0,61858	0,007253224
498	12,14	8,69	0,01745	0,8004	0,0911	1,0780	0,31780	0,003553709
499	11,99	8,71	0,01745	0,7812	0,0047	373,4589	0,01508	0,000160566
500	11,85	8,73	0,01745	0,7619	0,0975	0,8113	0,31155	0,003156819
501	11,70	8,74	0,01745	0,7427	0,1904	0,1973	0,60802	0,005853317
502	11,55	8,76	0,01745	0,7234	0,2832	0,0824	0,90450	0,008261426
503	11,39	8,78	0,01745	0,7041	0,3855	0,0410	1,23113	0,010653525
504	11,23	8,80	0,01745	0,6849	0,4877	0,0236	1,55775	0,012752096
505	11,06	8,81	0,01745	0,6656	0,5900	0,0148	1,88438	0,014569948
506	10,90	8,83	0,01745	0,6463	0,5664	0,0147	1,80900	0,013189047
507	10,72	8,85	0,01745	0,6271	0,4531	0,0210	1,44720	0,00993172
508	10,54	8,87	0,01745	0,6078	0,3399	0,0339	1,08540	0,006998408
509	10,36	8,88	0,01745	0,5886	0,2266	0,0693	0,72360	0,00437487
510	10,18	8,90	0,01745	0,5693	0,1133	0,2510	0,36180	0,002046831
511	9,98	8,92	0,01745	0,5501	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
512	9,79	8,94	0,01745	0,5309	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
513	9,59	8,95	0,01745	0,5117	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
514	9,39	8,97	0,01745	0,4926	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
515	9,18	8,99	0,01745	0,4734	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
516	8,97	9,01	0,01745	0,4543	0,0213	3,6153	0,04977	0,000179264
517	8,75	9,02	0,01745	0,4352	0,1504	0,0636	0,35194	0,001163227
518	8,54	9,04	0,01745	0,4161	0,2796	0,0161	0,65412	0,001976394
519	8,32	9,06	0,01745	0,3970	0,4133	0,0064	0,96696	0,002659878
520	8,10	9,08	0,01745	0,3779	0,5471	0,0031	1,27980	0,003190577
521	7,88	9,09	0,01745	0,3589	0,5922	0,0023	1,45176	0,003263859
522	7,66	9,11	0,01745	0,3399	0,5634	0,0022	1,50632	0,003037139
523	7,44	9,13	0,01745	0,3209	0,5340	0,0020	1,56212	0,002807369
524	7,21	9,15	0,01745	0,3019	0,5046	0,0019	1,61792	0,002573842
525	6,99	9,16	0,01745	0,2829	0,4700	0,0018	1,64495	0,002298431
526	6,76	9,18	0,01745	0,2640	0,3626	0,0024	1,26920	0,001543861
527	6,54	9,20	0,01745	0,2451	0,2576	0,0039	0,90180	0,00094528

IVO		IVC						
336	588				$(\mu\sigma)_m$	Com Peso de 89,71%	$(n_D/n)_m$	
Cam Profile						2,1663	1,9434	
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$		$n_D/n(\alpha)$	
528	6,32	9,22	0,01745	0,2262	0,1527	0,0087	0,53440	0,000477035
529	6,10	9,23	0,01745	0,2073	0,0477	0,0683	0,16700	0,000125198
530	5,88	9,25	0,01745	0,1884	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
531	5,67	9,27	0,01745	0,1695	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
532	5,45	9,29	0,01745	0,1506	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
533	5,24	9,30	0,01745	0,1318	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
534	5,02	9,32	0,01745	0,1129	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
535	4,82	9,34	0,01745	0,0941	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
536	4,62	9,35	0,01745	0,0753	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
537	4,42	9,37	0,01745	0,0564	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
538	4,22	9,39	0,01745	0,0376	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
539	4,03	9,41	0,01745	0,0188	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0

Fonte: Autor (2016)

APÊNDICE B – PLANILHA DE CÁLCULO DO SWIRL MÉDIO DO TESTE 2

Este apêndice apresenta o método de cálculo do *Swirl* médio do teste 2.

A equação solucionada na tabela pode ser descrita da seguinte forma:

$$(c(\alpha))/c_m = \pi/2 (1 + (\lambda \cdot \cos(\alpha)) / \sqrt{(1 - \lambda^2 \cdot \sin^2(\alpha))}) \sin(\alpha)$$

Tabela 7 - Cálculo do *Swirl* médio do teste 2

(Continua)

IVO	IVC						Com peso de 89,71%	(n _D /n) _m
336	588				(μσ) _m			
Cam Profile							2,4559	2,2031
CAD	Lift (mm)	α	dα	c(α)/c _m	μσ (α)		n _D /n(α)	
395	6,10	6,89	0,01745	1,1364	0,4822	0,1101	0,14800	0,00333554
396	6,32	6,91	0,01745	1,1617	0,4996	0,1096	0,47360	0,011155568
397	6,54	6,93	0,01745	1,1865	0,5170	0,1091	0,79920	0,01963739
398	6,76	6,95	0,01745	1,2107	0,5344	0,1085	1,12480	0,028777949
399	6,99	6,96	0,01745	1,2344	0,5522	0,1077	1,45780	0,038768505
400	7,21	6,98	0,01745	1,2574	0,5589	0,1111	1,50940	0,041653573
401	7,44	7,00	0,01745	1,2799	0,5649	0,1147	1,54090	0,04405417
402	7,66	7,02	0,01745	1,3017	0,5709	0,1181	1,57240	0,046501148
403	7,88	7,03	0,01745	1,3229	0,5768	0,1215	1,60320	0,048969263
404	8,10	7,05	0,01745	1,3435	0,5807	0,1255	1,45800	0,045930143
405	8,32	7,07	0,01745	1,3634	0,5822	0,1305	1,10160	0,035740311
406	8,54	7,09	0,01745	1,3827	0,5838	0,1354	0,74520	0,024866244
407	8,75	7,10	0,01745	1,4013	0,5853	0,1402	0,40095	0,013742229
408	8,97	7,12	0,01745	1,4193	0,5868	0,1449	0,05670	0,001993531
409	9,18	7,14	0,01745	1,4366	0,5883	0,1495	0,00000	0
410	9,39	7,16	0,01745	1,4533	0,5898	0,1540	0,00000	0
411	9,59	7,17	0,01745	1,4693	0,5912	0,1584	0,00000	0
412	9,79	7,19	0,01745	1,4845	0,5926	0,1626	0,00000	0
413	9,98	7,21	0,01745	1,4992	0,5940	0,1667	0,00000	0
414	10,18	7,23	0,01745	1,5131	0,5954	0,1705	0,41400	0,016542384
415	10,36	7,24	0,01745	1,5263	0,5967	0,1743	0,82800	0,033666016
416	10,54	7,26	0,01745	1,5388	0,5980	0,1779	1,24200	0,051332363
417	10,72	7,28	0,01745	1,5507	0,5993	0,1812	1,65600	0,069501233
418	10,90	7,30	0,01745	1,5619	0,6005	0,1844	2,07000	0,088130925
419	11,06	7,31	0,01745	1,5723	0,6016	0,1875	2,15625	0,093036802

(Continuação)

IVO		IVC						
336	588					$(\mu\sigma)_m$	Com peso de 89,71%	$(n_D/n)_m$
Cam Profile							2,4559	2,2031
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$	$n_D/n(\alpha)$		
420	11,23	7,33	0,01745	1,5821	0,6024	0,1904	1,78250	0,077868689
421	11,39	7,35	0,01745	1,5911	0,6033	0,1932	1,40875	0,062249032
422	11,55	7,37	0,01745	1,5995	0,6042	0,1957	1,03500	0,046216745
423	11,70	7,38	0,01745	1,6072	0,6049	0,1980	0,69575	0,031367107
424	11,85	7,40	0,01745	1,6142	0,6057	0,2001	0,35650	0,016212557
425	11,99	7,42	0,01745	1,6205	0,6065	0,2019	0,01725	0,000790618
426	12,14	7,44	0,01745	1,6261	0,6073	0,2035	0,35280	0,016282171
427	12,27	7,45	0,01745	1,6311	0,6080	0,2049	0,68670	0,03188478
428	12,41	7,47	0,01745	1,6353	0,6087	0,2060	1,02060	0,047636121
429	12,54	7,49	0,01745	1,6389	0,6094	0,2069	1,35450	0,063498177
430	12,67	7,50	0,01745	1,6418	0,6101	0,2075	1,68840	0,07943299
431	12,79	7,52	0,01745	1,6441	0,6107	0,2079	1,97820	0,093322351
432	12,90	7,54	0,01745	1,6457	0,6113	0,2081	2,26800	0,107201167
433	13,02	7,56	0,01745	1,6466	0,6120	0,2080	2,52090	0,119291209
434	13,13	7,57	0,01745	1,6469	0,6133	0,2073	2,52780	0,11966065
435	13,23	7,59	0,01745	1,6466	0,6143	0,2065	2,53365	0,119887659
436	13,33	7,61	0,01745	1,6456	0,6153	0,2054	2,53950	0,120022432
437	13,42	7,63	0,01745	1,6440	0,6164	0,2041	2,54535	0,120065651
438	13,52	7,64	0,01745	1,6418	0,6174	0,2026	2,55120	0,120018167
439	13,60	7,66	0,01745	1,6390	0,6183	0,2010	2,55615	0,1198388
440	13,69	7,68	0,01745	1,6355	0,6192	0,1992	2,56110	0,11957127
441	13,77	7,70	0,01745	1,6315	0,6200	0,1972	2,56605	0,119216992
442	13,85	7,71	0,01745	1,6270	0,6209	0,1950	2,57100	0,118777525
443	13,92	7,73	0,01745	1,6218	0,6216	0,1927	2,57490	0,11820636
444	13,98	7,75	0,01745	1,6161	0,6223	0,1902	2,57880	0,117554202
445	14,05	7,77	0,01745	1,6099	0,6230	0,1876	2,58405	0,116884155
446	14,11	7,78	0,01745	1,6031	0,6237	0,1848	2,58990	0,116163186
447	14,16	7,80	0,01745	1,5958	0,6242	0,1820	2,59418	0,115296036
448	14,21	7,82	0,01745	1,5879	0,6247	0,1791	2,59845	0,114356264
449	14,25	7,84	0,01745	1,5796	0,6252	0,1760	2,60273	0,113346276
450	14,30	7,85	0,01745	1,5708	0,6257	0,1728	2,60700	0,11226856
451	14,34	7,87	0,01745	1,5615	0,6261	0,1695	2,61015	0,111077796
452	14,37	7,89	0,01745	1,5517	0,6265	0,1662	2,61330	0,109825673
453	14,41	7,91	0,01745	1,5415	0,6268	0,1627	2,61645	0,108514936
454	14,44	7,92	0,01745	1,5309	0,6272	0,1592	2,61960	0,107148374

(Continuação)

IVO		IVC						
336	588					$(\mu\sigma)_m$	Com peso de 89,71%	$(n_D/n)_m$
Cam Profile							2,4559	2,2031
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$	$n_D/n(\alpha)$		
455	14,46	7,94	0,01745	1,5198	0,6274	0,1557	2,62095	0,105656245
456	14,47	7,96	0,01745	1,5083	0,6275	0,1521	2,62230	0,104116146
457	14,49	7,98	0,01745	1,4964	0,6277	0,1484	2,62365	0,102531032
458	14,50	7,99	0,01745	1,4841	0,6278	0,1447	2,62500	0,100903857
459	14,50	8,01	0,01745	1,4714	0,6278	0,1410	2,62500	0,099186562
460	14,50	8,03	0,01745	1,4583	0,6278	0,1373	2,62500	0,097434897
461	14,50	8,05	0,01745	1,4449	0,6278	0,1336	2,62500	0,095651829
462	14,50	8,06	0,01745	1,4312	0,6278	0,1298	2,62500	0,093840296
463	14,50	8,08	0,01745	1,4171	0,6278	0,1260	2,62500	0,092003196
464	14,50	8,10	0,01745	1,4027	0,6278	0,1222	2,62500	0,090143387
465	14,50	8,12	0,01745	1,3880	0,6278	0,1184	2,62500	0,088263677
466	14,50	8,13	0,01745	1,3730	0,6278	0,1146	2,62500	0,086366821
467	14,49	8,15	0,01745	1,3577	0,6277	0,1109	2,62365	0,084412085
468	14,47	8,17	0,01745	1,3422	0,6275	0,1072	2,62230	0,082447518
469	14,46	8,19	0,01745	1,3264	0,6274	0,1035	2,62095	0,080475706
470	14,44	8,20	0,01745	1,3103	0,6272	0,0998	2,61960	0,078499163
471	14,41	8,22	0,01745	1,2940	0,6268	0,0963	2,61645	0,076467719
472	14,37	8,24	0,01745	1,2775	0,6265	0,0927	2,61330	0,074439007
473	14,34	8,26	0,01745	1,2608	0,6261	0,0892	2,61015	0,072415303
474	14,30	8,27	0,01745	1,2439	0,6257	0,0858	2,60700	0,070398795
475	14,25	8,29	0,01745	1,2267	0,6252	0,0824	2,60273	0,068362035
476	14,21	8,31	0,01745	1,2094	0,6247	0,0791	2,59845	0,066338233
477	14,16	8,33	0,01745	1,1920	0,6242	0,0759	2,59418	0,064329298
478	14,11	8,34	0,01745	1,1743	0,6237	0,0727	2,58990	0,062337043
479	14,05	8,36	0,01745	1,1566	0,6230	0,0696	2,58405	0,060326418
480	13,98	8,38	0,01745	1,1386	0,6223	0,0665	2,57880	0,058351658
481	13,92	8,40	0,01745	1,1206	0,6216	0,0636	2,57490	0,056429425
482	13,85	8,41	0,01745	1,1024	0,6209	0,0606	2,57100	0,054529653
483	13,77	8,43	0,01745	1,0841	0,6200	0,0578	2,56605	0,052632167
484	13,69	8,45	0,01745	1,0656	0,6192	0,0551	2,56110	0,05076123
485	13,60	8,46	0,01745	1,0471	0,6183	0,0524	2,55615	0,048918007
486	13,52	8,48	0,01745	1,0285	0,6174	0,0498	2,55120	0,047103577
487	13,42	8,50	0,01745	1,0098	0,6164	0,0473	2,54535	0,045302919
488	13,33	8,52	0,01745	0,9911	0,6153	0,0449	2,53950	0,043534148
489	13,23	8,53	0,01745	0,9722	0,6143	0,0425	2,53365	0,041798075

(Continuação)

IVO		IVC							
336		588				$(\mu\sigma)_m$		Com peso de 89,71%	
Cam Profile								2,4559	
								2,2031	
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$	$n_D/n(\alpha)$			
490	13,13	8,55	0,01745	0,9533	0,6133	0,0402		2,52780	
491	13,02	8,57	0,01745	0,9344	0,6120	0,0380		2,52090	
492	12,90	8,59	0,01745	0,9153	0,6113	0,0358		2,26800	
493	12,79	8,60	0,01745	0,8963	0,6107	0,0337		1,97820	
494	12,67	8,62	0,01745	0,8772	0,6101	0,0316		1,68840	
495	12,54	8,64	0,01745	0,8580	0,6094	0,0297		1,35450	
496	12,41	8,66	0,01745	0,8389	0,6087	0,0278		1,02060	
497	12,27	8,67	0,01745	0,8197	0,6080	0,0260		0,68670	
498	12,14	8,69	0,01745	0,8004	0,6073	0,0243		0,35280	
499	11,99	8,71	0,01745	0,7812	0,6065	0,0226		0,01725	
500	11,85	8,73	0,01745	0,7619	0,6057	0,0210		0,35650	
501	11,70	8,74	0,01745	0,7427	0,6049	0,0195		0,69575	
502	11,55	8,76	0,01745	0,7234	0,6042	0,0181		1,03500	
503	11,39	8,78	0,01745	0,7041	0,6033	0,0167		1,40875	
504	11,23	8,80	0,01745	0,6849	0,6024	0,0154		1,78250	
505	11,06	8,81	0,01745	0,6656	0,6016	0,0142		2,15625	
506	10,90	8,83	0,01745	0,6463	0,6005	0,0131		2,07000	
507	10,72	8,85	0,01745	0,6271	0,5993	0,0120		1,65600	
508	10,54	8,87	0,01745	0,6078	0,5980	0,0110		1,24200	
509	10,36	8,88	0,01745	0,5886	0,5967	0,0100		0,82800	
510	10,18	8,90	0,01745	0,5693	0,5954	0,0091		0,41400	
511	9,98	8,92	0,01745	0,5501	0,5940	0,0082		0,00000	
512	9,79	8,94	0,01745	0,5309	0,5926	0,0074		0,00000	
513	9,59	8,95	0,01745	0,5117	0,5912	0,0067		0,00000	
514	9,39	8,97	0,01745	0,4926	0,5898	0,0060		0,00000	
515	9,18	8,99	0,01745	0,4734	0,5883	0,0054		0,00000	
516	8,97	9,01	0,01745	0,4543	0,5868	0,0048		0,05670	
517	8,75	9,02	0,01745	0,4352	0,5853	0,0042		0,40095	
518	8,54	9,04	0,01745	0,4161	0,5838	0,0037		0,74520	
519	8,32	9,06	0,01745	0,3970	0,5822	0,0032		1,10160	
520	8,10	9,08	0,01745	0,3779	0,5807	0,0028		1,45800	
521	7,88	9,09	0,01745	0,3589	0,5768	0,0024		1,60320	
522	7,66	9,11	0,01745	0,3399	0,5709	0,0021		1,57240	
523	7,44	9,13	0,01745	0,3209	0,5649	0,0018		1,54090	
524	7,21	9,15	0,01745	0,3019	0,5589	0,0015		1,50940	

(Conclusão)

IVO		IVC							
336		588				$(\mu\sigma)_m$		Com peso de 89,71%	
Cam Profile								$(n_D/n)_m$	
								2,4559	
								2,2031	
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$	$n_D/n(\alpha)$			
525	6,99	9,16	0,01745	0,2829	0,5522	0,0013	1,45780	0,002036933	
526	6,76	9,18	0,01745	0,2640	0,5344	0,0011	1,12480	0,001368213	
527	6,54	9,20	0,01745	0,2451	0,5170	0,0010	0,79920	0,000837733	
528	6,32	9,22	0,01745	0,2262	0,4996	0,0008	0,47360	0,000422761	
529	6,10	9,23	0,01745	0,2073	0,4822	0,0007	0,14800	0,000110954	
530	5,88	9,25	0,01745	0,1884	0,4648	0,0005	0,00000	0	
531	5,67	9,27	0,01745	0,1695	0,4478	0,0004	0,00000	0	
532	5,45	9,29	0,01745	0,1506	0,4308	0,0003	0,00000	0	
533	5,24	9,30	0,01745	0,1318	0,4138	0,0002	0,00000	0	
534	5,02	9,32	0,01745	0,1129	0,3968	0,0002	0,00000	0	
535	4,82	9,34	0,01745	0,0941	0,3810	0,0001	0,00000	0	
536	4,62	9,35	0,01745	0,0753	0,3652	0,0001	0,00000	0	
537	4,42	9,37	0,01745	0,0564	0,3494	0,0000	0,00000	0	
538	4,22	9,39	0,01745	0,0376	0,3336	0,0000	0,00000	0	
539	4,03	9,41	0,01745	0,0188	0,3188	0,0000	0,00000	0	

Fonte: Autor (2016)

APÊNDICE C – PLANILHA DE CÁLCULO DO SWIRL MÉDIO DO TESTE 3

Este apêndice apresenta o método de cálculo do *Swirl* médio do teste 3.

A equação solucionada na tabela pode ser descrita da seguinte forma:

$$(c(\alpha))/c_m = \pi/2 (1 + (\lambda \cdot \cos(\alpha)) / \sqrt{(1 - \lambda^2 \cdot [\sin(\alpha)]^2)}) \sin(\alpha)$$

Tabela 8 - Cálculo de *Swirl* médio do teste 3

(Continua)

(Continued)								
IVO		IVC						
						Com peso de 89,71%		(n _D /n) _m
336	588			(μσ) _m				
Cam Profile						2,0066		1,8001
CAD	Lift (mm)	α	dα	c(α)/c _m	μσ (α)	n _D /n(α)		
395	6,10	6,89	0,017453293	1,1364	0,4921	0,1058	0,12300	0,002772104
396	6,32	6,91	0,017453293	1,1617	0,5112	0,1047	0,39360	0,009271181
397	6,54	6,93	0,017453293	1,1865	0,5303	0,1037	0,66420	0,016320263
398	6,76	6,95	0,017453293	1,2107	0,5494	0,1026	0,93480	0,023916809
399	6,99	6,96	0,017453293	1,2344	0,5689	0,1014	1,21155	0,032219771
400	7,21	6,98	0,017453293	1,2574	0,5758	0,1047	1,27830	0,035276111
401	7,44	7,00	0,017453293	1,2799	0,5819	0,1081	1,33005	0,03802599
402	7,66	7,02	0,017453293	1,3017	0,5879	0,1114	1,38180	0,040864466
403	7,88	7,03	0,017453293	1,3229	0,5939	0,1146	1,43240	0,043752228
404	8,10	7,05	0,017453293	1,3435	0,5374	0,1466	1,31400	0,041393833
405	8,32	7,07	0,017453293	1,3634	0,4060	0,2683	0,99280	0,032210404
406	8,54	7,09	0,017453293	1,3827	0,2747	0,6116	0,67160	0,022410319
407	8,75	7,10	0,017453293	1,4013	0,1478	2,1994	0,36135	0,012384972
408	8,97	7,12	0,017453293	1,4193	0,0209	114,2669	0,05110	0,001796639
409	9,18	7,14	0,017453293	1,4366	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
410	9,39	7,16	0,017453293	1,4533	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
411	9,59	7,17	0,017453293	1,4693	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
412	9,79	7,19	0,017453293	1,4845	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
413	9,98	7,21	0,017453293	1,4992	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
414	10,18	7,23	0,017453293	1,5131	0,1123	4,7927	0,35280	0,014096988
415	10,36	7,24	0,017453293	1,5263	0,2246	1,2299	0,70560	0,028689301
416	10,54	7,26	0,017453293	1,5388	0,3369	0,5602	1,05840	0,043744101
417	10,72	7,28	0,017453293	1,5507	0,4493	0,3224	1,41120	0,059227138
418	10,90	7,30	0,017453293	1,5619	0,5616	0,2109	1,76400	0,075102875
419	11,06	7,31	0,017453293	1,5723	0,5850	0,1983	1,83750	0,079283535

(Continuação)

IVO		IVC						
						Com peso de 89,71%		
336		588				$(\mu\sigma)_m$	$(n_D/n)_m$	
Cam Profile							2,0066	1,8001
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$		$n_D/n(\alpha)$	
420	11,23	7,33	0,017453293	1,5821	0,4836	0,2955	1,51900	0,066357665
421	11,39	7,35	0,017453293	1,5911	0,3822	0,4814	1,20050	0,053047001
422	11,55	7,37	0,017453293	1,5995	0,2808	0,9059	0,88200	0,039384704
423	11,70	7,38	0,017453293	1,6072	0,1888	2,0338	0,59290	0,02673023
424	11,85	7,40	0,017453293	1,6142	0,0967	7,8479	0,30380	0,013815918
425	11,99	7,42	0,017453293	1,6205	0,0047	3391,3314	0,01470	0,000673744
426	12,14	7,44	0,017453293	1,6261	0,0904	9,1897	0,28420	0,013116193
427	12,27	7,45	0,017453293	1,6311	0,1759	2,4478	0,55318	0,025684962
428	12,41	7,47	0,017453293	1,6353	0,2614	1,1168	0,82215	0,038373542
429	12,54	7,49	0,017453293	1,6389	0,3470	0,6383	1,09113	0,051151309
430	12,67	7,50	0,017453293	1,6418	0,4325	0,4130	1,36010	0,063987686
431	12,79	7,52	0,017453293	1,6441	0,5067	0,3021	1,59355	0,075176338
432	12,90	7,54	0,017453293	1,6457	0,5809	0,2305	1,82700	0,086356496
433	13,02	7,56	0,017453293	1,6466	0,6456	0,1870	2,03135	0,096125271
434	13,13	7,57	0,017453293	1,6469	0,6462	0,1867	2,04170	0,096649714
435	13,23	7,59	0,017453293	1,6466	0,6467	0,1863	2,05048	0,097024707
436	13,33	7,61	0,017453293	1,6456	0,6472	0,1857	2,05925	0,097324746
437	13,42	7,63	0,017453293	1,6440	0,6478	0,1848	2,06803	0,097549951
438	13,52	7,64	0,017453293	1,6418	0,6483	0,1838	2,07680	0,097700583
439	13,60	7,66	0,017453293	1,6390	0,6487	0,1826	2,08423	0,097713758
440	13,69	7,68	0,017453293	1,6355	0,6492	0,1812	2,09165	0,097653839
441	13,77	7,70	0,017453293	1,6315	0,6496	0,1796	2,09908	0,097521641
442	13,85	7,71	0,017453293	1,6270	0,6501	0,1779	2,10650	0,097318108
443	13,92	7,73	0,017453293	1,6218	0,6504	0,1760	2,11235	0,096972001
444	13,98	7,75	0,017453293	1,6161	0,6508	0,1740	2,11820	0,096557822
445	14,05	7,77	0,017453293	1,6099	0,6514	0,1716	2,11820	0,095812394
446	14,11	7,78	0,017453293	1,6031	0,6521	0,1691	2,11560	0,094889701
447	14,16	7,80	0,017453293	1,5958	0,6526	0,1665	2,11370	0,093941708
448	14,21	7,82	0,017453293	1,5879	0,6531	0,1639	2,11180	0,092939082
449	14,25	7,84	0,017453293	1,5796	0,6536	0,1610	2,10990	0,091884202
450	14,30	7,85	0,017453293	1,5708	0,6541	0,1581	2,10800	0,090779488
451	14,34	7,87	0,017453293	1,5615	0,6545	0,1551	2,10660	0,089648673
452	14,37	7,89	0,017453293	1,5517	0,6549	0,1521	2,10520	0,088472432
453	14,41	7,91	0,017453293	1,5415	0,6552	0,1489	2,10380	0,087253233

(Continuação)

IVO		IVC						
						Com peso de 89,71%		
336		588				$(\mu\sigma)_m$	$(n_D/n)_m$	
Cam Profile							2,0066	1,8001
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$		$n_D/n(\alpha)$	
454	14,44	7,92	0,017453293	1,5309	0,6556	0,1457	2,10240	0,085993564
455	14,46	7,94	0,017453293	1,5198	0,6558	0,1425	2,10180	0,084728169
456	14,47	7,96	0,017453293	1,5083	0,6559	0,1392	2,10120	0,083426323
457	14,49	7,98	0,017453293	1,4964	0,6561	0,1359	2,10060	0,082090479
458	14,50	7,99	0,017453293	1,4841	0,6562	0,1325	2,10000	0,080723086
459	14,50	8,01	0,017453293	1,4714	0,6562	0,1291	2,10000	0,079349249
460	14,50	8,03	0,017453293	1,4583	0,6562	0,1257	2,10000	0,077947917
461	14,50	8,05	0,017453293	1,4449	0,6562	0,1223	2,10000	0,076521463
462	14,50	8,06	0,017453293	1,4312	0,6562	0,1188	2,10000	0,075072237
463	14,50	8,08	0,017453293	1,4171	0,6562	0,1153	2,10000	0,073602557
464	14,50	8,10	0,017453293	1,4027	0,6562	0,1118	2,10000	0,07211471
465	14,50	8,12	0,017453293	1,3880	0,6562	0,1084	2,10000	0,070610941
466	14,50	8,13	0,017453293	1,3730	0,6562	0,1049	2,10000	0,069093457
467	14,49	8,15	0,017453293	1,3577	0,6561	0,1015	2,10060	0,067583719
468	14,47	8,17	0,017453293	1,3422	0,6559	0,0981	2,10120	0,066063656
469	14,46	8,19	0,017453293	1,3264	0,6558	0,0947	2,10180	0,064535317
470	14,44	8,20	0,017453293	1,3103	0,6556	0,0914	2,10240	0,063000703
471	14,41	8,22	0,017453293	1,2940	0,6552	0,0881	2,10380	0,061485138
472	14,37	8,24	0,017453293	1,2775	0,6549	0,0849	2,10520	0,059965943
473	14,34	8,26	0,017453293	1,2608	0,6545	0,0817	2,10660	0,058444947
474	14,30	8,27	0,017453293	1,2439	0,6541	0,0785	2,10800	0,056923921
475	14,25	8,29	0,017453293	1,2267	0,6536	0,0754	2,10990	0,055417709
476	14,21	8,31	0,017453293	1,2094	0,6531	0,0724	2,11180	0,053914095
477	14,16	8,33	0,017453293	1,1920	0,6526	0,0694	2,11370	0,052414674
478	14,11	8,34	0,017453293	1,1743	0,6521	0,0665	2,11560	0,050920981
479	14,05	8,36	0,017453293	1,1566	0,6514	0,0636	2,11820	0,04945083
480	13,98	8,38	0,017453293	1,1386	0,6508	0,0608	2,11820	0,047929456
481	13,92	8,40	0,017453293	1,1206	0,6504	0,0580	2,11235	0,046292554
482	13,85	8,41	0,017453293	1,1024	0,6501	0,0553	2,10650	0,044677835
483	13,77	8,43	0,017453293	1,0841	0,6496	0,0527	2,09908	0,043054058
484	13,69	8,45	0,017453293	1,0656	0,6492	0,0501	2,09165	0,04145669
485	13,60	8,46	0,017453293	1,0471	0,6487	0,0476	2,08423	0,0398866
486	13,52	8,48	0,017453293	1,0285	0,6483	0,0452	2,07680	0,038344587
487	13,42	8,50	0,017453293	1,0098	0,6478	0,0428	2,06803	0,036807343

(Continuação)

IVO		IVC						
						Com peso de 89,71%		
336		588				$(\mu\sigma)_m$		$(n_D/n)_m$
Cam Profile							2,0066	1,8001
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$		$n_D/n(\alpha)$	
488	13,33	8,52	0,017453293	0,9911	0,6472	0,0406	2,05925	0,035301317
489	13,23	8,53	0,017453293	0,9722	0,6467	0,0383	2,05048	0,033827051
490	13,13	8,55	0,017453293	0,9533	0,6462	0,0362	2,04170	0,032385019
491	13,02	8,57	0,017453293	0,9344	0,6456	0,0342	2,03135	0,030951631
492	12,90	8,59	0,017453293	0,9153	0,5809	0,0397	1,82700	0,026716294
493	12,79	8,60	0,017453293	0,8963	0,5067	0,0489	1,59355	0,022341999
494	12,67	8,62	0,017453293	0,8772	0,4325	0,0630	1,36010	0,018264676
495	12,54	8,64	0,017453293	0,8580	0,3470	0,0916	1,09113	0,014020123
496	12,41	8,66	0,017453293	0,8389	0,2614	0,1507	0,82215	0,010097178
497	12,27	8,67	0,017453293	0,8197	0,1759	0,3106	0,55318	0,006486364
498	12,14	8,69	0,017453293	0,8004	0,0904	1,0960	0,28420	0,003177987
499	11,99	8,71	0,017453293	0,7812	0,0047	379,9256	0,01470	0,000156572
500	11,85	8,73	0,017453293	0,7619	0,0967	0,8254	0,30380	0,003078291
501	11,70	8,74	0,017453293	0,7427	0,1888	0,2007	0,59290	0,005707712
502	11,55	8,76	0,017453293	0,7234	0,2808	0,0838	0,88200	0,008055918
503	11,39	8,78	0,017453293	0,7041	0,3822	0,0417	1,20050	0,010388512
504	11,23	8,80	0,017453293	0,6849	0,4836	0,0240	1,51900	0,01243488
505	11,06	8,81	0,017453293	0,6656	0,5850	0,0150	1,83750	0,014207512
506	10,90	8,83	0,017453293	0,6463	0,5616	0,0149	1,76400	0,012860962
507	10,72	8,85	0,017453293	0,6271	0,4493	0,0213	1,41120	0,009684662
508	10,54	8,87	0,017453293	0,6078	0,3369	0,0345	1,05840	0,006824318
509	10,36	8,88	0,017453293	0,5886	0,2246	0,0705	0,70560	0,004266043
510	10,18	8,90	0,017453293	0,5693	0,1123	0,2553	0,35280	0,001995915
511	9,98	8,92	0,017453293	0,5501	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
512	9,79	8,94	0,017453293	0,5309	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
513	9,59	8,95	0,017453293	0,5117	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
514	9,39	8,97	0,017453293	0,4926	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
515	9,18	8,99	0,017453293	0,4734	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
516	8,97	9,01	0,017453293	0,4543	0,0209	3,7467	0,05110	0,000184055
517	8,75	9,02	0,017453293	0,4352	0,1478	0,0659	0,36135	0,001194312
518	8,54	9,04	0,017453293	0,4161	0,2747	0,0167	0,67160	0,002029209
519	8,32	9,06	0,017453293	0,3970	0,4060	0,0066	0,99280	0,002730958
520	8,10	9,08	0,017453293	0,3779	0,5374	0,0033	1,31400	0,003275839
521	7,88	9,09	0,017453293	0,3589	0,5939	0,0023	1,43240	0,003220334

(Conclusão)

IVO	IVC		Com peso de	
336	588	$(\mu\sigma)_m$	89,71%	$(n_D/n)_m$
Cam Profile			2,0066	1,8001

CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$		$n_D/n(\alpha)$	
522	7,66	9,11	0,017453293	0,3399	0,5879	0,0020	1,38180	0,002786074
523	7,44	9,13	0,017453293	0,3209	0,5819	0,0017	1,33005	0,002390304
524	7,21	9,15	0,017453293	0,3019	0,5758	0,0014	1,27830	0,002033563
525	6,99	9,16	0,017453293	0,2829	0,5689	0,0012	1,21155	0,001692856
526	6,76	9,18	0,017453293	0,2640	0,5494	0,0011	0,93480	0,001137096
527	6,54	9,20	0,017453293	0,2451	0,5303	0,0009	0,66420	0,000696224
528	6,32	9,22	0,017453293	0,2262	0,5112	0,0008	0,39360	0,000351349
529	6,10	9,23	0,017453293	0,2073	0,4921	0,0006	0,12300	9,22116E-05
530	5,88	9,25	0,017453293	0,1884	0,4738	0,0005	0,00000	0
531	5,67	9,27	0,017453293	0,1695	0,4564	0,0004	0,00000	0
532	5,45	9,29	0,017453293	0,1506	0,4391	0,0003	0,00000	0
533	5,24	9,30	0,017453293	0,1318	0,4218	0,0002	0,00000	0
534	5,02	9,32	0,017453293	0,1129	0,4045	0,0002	0,00000	0
535	4,82	9,34	0,017453293	0,0941	0,3883	0,0001	0,00000	0
536	4,62	9,35	0,017453293	0,0753	0,3722	0,0001	0,00000	0
537	4,42	9,37	0,017453293	0,0564	0,3561	0,0000	0,00000	0
538	4,22	9,39	0,017453293	0,0376	0,3400	0,0000	0,00000	0
539	4,03	9,41	0,017453293	0,0188	0,3249	0,0000	0,00000	0
540	3,85	9,42	0,017453293	0,0000	0,3098	0,0000 ##	0,00000	0

Fonte: Autor (2016)

APÊNDICE D – PLANILHA DE CÁLCULO DO SWIRL MÉDIO DO TESTE 4

Este apêndice apresenta o método de cálculo do *Swirl* médio do teste 4.

A equação solucionada na tabela pode ser descrita da seguinte forma:

$$(c(\alpha))/c_m = \pi/2 (1 + (\lambda \cdot \cos(\alpha)) / \sqrt{(1 - \lambda^2 \cdot \sin^2(\alpha))}) \sin(\alpha)$$

Tabela 9 - Cálculo do *Swirl* médio do teste 4

(Continua)

IVO	IVC							Com Peso de 90%	(n _D /n) _m
336	588	(μσ) _m						2,2742	2,0402
Cam Profile									
CAD	Lift (mm)	α	dα	c(α)/c _m	μσ (α)		n _D /n(α)		
395	6,10	6,89	0,01745	1,1364	0,0559	8,1834	0,13800	0,003110166	
396	6,32	6,91	0,01745	1,1617	0,1790	0,8539	0,44160	0,010401813	
397	6,54	6,93	0,01745	1,1865	0,3021	0,3195	0,74520	0,018310539	
398	6,76	6,95	0,01745	1,2107	0,4252	0,1714	1,04880	0,026833493	
399	6,99	6,96	0,01745	1,2344	0,5510	0,1081	1,35930	0,036149011	
400	7,21	6,98	0,01745	1,2574	0,5651	0,1087	1,43040	0,03947348	
401	7,44	7,00	0,01745	1,2799	0,5711	0,1122	1,48440	0,042438841	
402	7,66	7,02	0,01745	1,3017	0,5772	0,1156	1,53840	0,045495654	
403	7,88	7,03	0,01745	1,3229	0,5831	0,1188	1,59120	0,048602726	
404	8,10	7,05	0,01745	1,3435	0,5277	0,1520	1,45800	0,045930143	
405	8,32	7,07	0,01745	1,3634	0,3987	0,2783	1,10160	0,035740311	
406	8,54	7,09	0,01745	1,3827	0,2697	0,6343	0,74520	0,024866244	
407	8,75	7,10	0,01745	1,4013	0,1451	2,2808	0,40095	0,013742229	
408	8,97	7,12	0,01745	1,4193	0,0205	118,4986	0,05670	0,001993531	
409	9,18	7,14	0,01745	1,4366	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
410	9,39	7,16	0,01745	1,4533	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
411	9,59	7,17	0,01745	1,4693	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
412	9,79	7,19	0,01745	1,4845	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
413	9,98	7,21	0,01745	1,4992	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
414	10,18	7,23	0,01745	1,5131	0,1084	5,1411	0,41040	0,016398538	
415	10,36	7,24	0,01745	1,5263	0,2169	1,3193	0,82080	0,033373268	
416	10,54	7,26	0,01745	1,5388	0,3253	0,6009	1,23120	0,050885995	
417	10,72	7,28	0,01745	1,5507	0,4338	0,3459	1,64160	0,068896874	
418	10,90	7,30	0,01745	1,5619	0,5422	0,2262	2,05200	0,087364569	
419	11,06	7,31	0,01745	1,5723	0,5648	0,2127	2,13750	0,092227786	
420	11,23	7,33	0,01745	1,5821	0,4669	0,3170	1,76700	0,07719157	

IVO IVC								
336	588						Com Peso de 90%	$(n_D/n)_m$
Cam Profile							2,2742	2,0402
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$	$(\mu\sigma)_m$	$n_D/n(\alpha)$	
421	11,39	7,35	0,01745	1,5911	0,3690	0,5163	1,39650	0,061707736
422	11,55	7,37	0,01745	1,5995	0,2711	0,9718	1,02600	0,04581486
423	11,70	7,38	0,01745	1,6072	0,1822	2,1817	0,68970	0,031094349
424	11,85	7,40	0,01745	1,6142	0,0934	8,4184	0,35340	0,016071579
425	11,99	7,42	0,01745	1,6205	0,0045	3637,8950	0,01710	0,000783743
426	12,14	7,44	0,01745	1,6261	0,0874	9,8344	0,33040	0,015248382
427	12,27	7,45	0,01745	1,6311	0,1700	2,6195	0,64310	0,029860349
428	12,41	7,47	0,01745	1,6353	0,2527	1,1952	0,95580	0,044611605
429	12,54	7,49	0,01745	1,6389	0,3354	0,6830	1,26850	0,059466547
430	12,67	7,50	0,01745	1,6418	0,4181	0,4419	1,58120	0,074389625
431	12,79	7,52	0,01745	1,6441	0,4898	0,3233	1,85260	0,087397122
432	12,90	7,54	0,01745	1,6457	0,5616	0,2466	2,12400	0,100394744
433	13,02	7,56	0,01745	1,6466	0,6241	0,2001	2,35985	0,111670181
434	13,13	7,57	0,01745	1,6469	0,6247	0,1998	2,35870	0,111655817
435	13,23	7,59	0,01745	1,6466	0,6252	0,1993	2,35773	0,111563212
436	13,33	7,61	0,01745	1,6456	0,6257	0,1986	2,35675	0,11138526
437	13,42	7,63	0,01745	1,6440	0,6262	0,1977	2,35578	0,111123287
438	13,52	7,64	0,01745	1,6418	0,6268	0,1966	2,35480	0,110778762
439	13,60	7,66	0,01745	1,6390	0,6272	0,1953	2,35398	0,110360323
440	13,69	7,68	0,01745	1,6355	0,6277	0,1938	2,35315	0,109862611
441	13,77	7,70	0,01745	1,6315	0,6281	0,1921	2,35233	0,109287469
442	13,85	7,71	0,01745	1,6270	0,6285	0,1903	2,35150	0,108636853
443	13,92	7,73	0,01745	1,6218	0,6289	0,1882	2,35085	0,10792086
444	13,98	7,75	0,01745	1,6161	0,6292	0,1861	2,35020	0,107133506
445	14,05	7,77	0,01745	1,6099	0,6298	0,1836	2,35225	0,106399161
446	14,11	7,78	0,01745	1,6031	0,6305	0,1808	2,35550	0,105649788
447	14,16	7,80	0,01745	1,5958	0,6310	0,1781	2,35788	0,104793871
448	14,21	7,82	0,01745	1,5879	0,6316	0,1752	2,36025	0,103873221
449	14,25	7,84	0,01745	1,5796	0,6321	0,1722	2,36263	0,102890143
450	14,30	7,85	0,01745	1,5708	0,6326	0,1690	2,36500	0,101847006
451	14,34	7,87	0,01745	1,5615	0,6330	0,1659	2,36675	0,100719642
452	14,37	7,89	0,01745	1,5517	0,6333	0,1626	2,36850	0,09953779
453	14,41	7,91	0,01745	1,5415	0,6337	0,1592	2,37025	0,09830401
454	14,44	7,92	0,01745	1,5309	0,6341	0,1557	2,37200	0,097020897
455	14,46	7,94	0,01745	1,5198	0,6342	0,1523	2,37275	0,095650758
456	14,47	7,96	0,01745	1,5083	0,6344	0,1488	2,37350	0,094237758

IVO	IVC							
336	588						Com Peso de 90%	$(n_D/n)_m$
Cam Profile							2,2742	2,0402
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$	$(\mu\sigma)_m$	$n_D/n(\alpha)$	
457	14,49	7,98	0,01745	1,4964	0,6346	0,1452	2,37425	0,092784595
458	14,50	7,99	0,01745	1,4841	0,6347	0,1416	2,37500	0,091293966
459	14,50	8,01	0,01745	1,4714	0,6347	0,1380	2,37500	0,089740223
460	14,50	8,03	0,01745	1,4583	0,6347	0,1344	2,37500	0,088155383
461	14,50	8,05	0,01745	1,4449	0,6347	0,1307	2,37500	0,086542131
462	14,50	8,06	0,01745	1,4312	0,6347	0,1270	2,37500	0,084903125
463	14,50	8,08	0,01745	1,4171	0,6347	0,1233	2,37500	0,083240987
464	14,50	8,10	0,01745	1,4027	0,6347	0,1196	2,37500	0,081558302
465	14,50	8,12	0,01745	1,3880	0,6347	0,1158	2,37500	0,079857612
466	14,50	8,13	0,01745	1,3730	0,6347	0,1121	2,37500	0,07814141
467	14,49	8,15	0,01745	1,3577	0,6346	0,1085	2,37425	0,076388006
468	14,47	8,17	0,01745	1,3422	0,6344	0,1048	2,37350	0,074625018
469	14,46	8,19	0,01745	1,3264	0,6342	0,1012	2,37275	0,072854779
470	14,44	8,20	0,01745	1,3103	0,6341	0,0977	2,37200	0,07107956
471	14,41	8,22	0,01745	1,2940	0,6337	0,0942	2,37025	0,069272339
472	14,37	8,24	0,01745	1,2775	0,6333	0,0907	2,36850	0,067465958
473	14,34	8,26	0,01745	1,2608	0,6330	0,0873	2,36675	0,065662479
474	14,30	8,27	0,01745	1,2439	0,6326	0,0839	2,36500	0,063863886
475	14,25	8,29	0,01745	1,2267	0,6321	0,0807	2,36263	0,062055673
476	14,21	8,31	0,01745	1,2094	0,6316	0,0774	2,36025	0,060257005
477	14,16	8,33	0,01745	1,1920	0,6310	0,0742	2,35788	0,058469627
478	14,11	8,34	0,01745	1,1743	0,6305	0,0711	2,35550	0,056695202
479	14,05	8,36	0,01745	1,1566	0,6298	0,0681	2,35225	0,054914888
480	13,98	8,38	0,01745	1,1386	0,6292	0,0651	2,35020	0,053179024
481	13,92	8,40	0,01745	1,1206	0,6289	0,0621	2,35085	0,051519327
482	13,85	8,41	0,01745	1,1024	0,6285	0,0592	2,35150	0,049874166
483	13,77	8,43	0,01745	1,0841	0,6281	0,0564	2,35233	0,048248461
484	13,69	8,45	0,01745	1,0656	0,6277	0,0536	2,35315	0,046639643
485	13,60	8,46	0,01745	1,0471	0,6272	0,0509	2,35398	0,045048908
486	13,52	8,48	0,01745	1,0285	0,6268	0,0483	2,35480	0,043477385
487	13,42	8,50	0,01745	1,0098	0,6262	0,0458	2,35578	0,041928805
488	13,33	8,52	0,01745	0,9911	0,6257	0,0434	2,35675	0,040401301
489	13,23	8,53	0,01745	0,9722	0,6252	0,0410	2,35773	0,038895809
490	13,13	8,55	0,01745	0,9533	0,6247	0,0388	2,35870	0,037413207
491	13,02	8,57	0,01745	0,9344	0,6241	0,0366	2,35985	0,035956977
492	12,90	8,59	0,01745	0,9153	0,5616	0,0424	2,12400	0,031059337

IVO	IVC							
336	588						Com Peso de 90%	$(n_D/n)_m$
Cam Profile							2,2742	2,0402
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$	$(\mu\sigma)_m$	$n_D/n(\alpha)$	
493	12,79	8,60	0,01745	0,8963	0,4898	0,0524	1,85260	0,025973949
494	12,67	8,62	0,01745	0,8772	0,4181	0,0674	1,58120	0,02123381
495	12,54	8,64	0,01745	0,8580	0,3354	0,0980	1,26850	0,016299256
496	12,41	8,66	0,01745	0,8389	0,2527	0,1613	0,95580	0,011738591
497	12,27	8,67	0,01745	0,8197	0,1700	0,3324	0,64310	0,007540797
498	12,14	8,69	0,01745	0,8004	0,0874	1,1729	0,33040	0,003694605
499	11,99	8,71	0,01745	0,7812	0,0045	407,5477	0,01710	0,000182135
500	11,85	8,73	0,01745	0,7619	0,0934	0,8854	0,35340	0,003580869
501	11,70	8,74	0,01745	0,7427	0,1822	0,2153	0,68970	0,006639583
502	11,55	8,76	0,01745	0,7234	0,2711	0,0899	1,02600	0,00937117
503	11,39	8,78	0,01745	0,7041	0,3690	0,0447	1,39650	0,012084595
504	11,23	8,80	0,01745	0,6849	0,4669	0,0257	1,76700	0,014465064
505	11,06	8,81	0,01745	0,6656	0,5648	0,0161	2,13750	0,016527106
506	10,90	8,83	0,01745	0,6463	0,5422	0,0160	2,05200	0,01496071
507	10,72	8,85	0,01745	0,6271	0,4338	0,0229	1,64160	0,011265832
508	10,54	8,87	0,01745	0,6078	0,3253	0,0370	1,23120	0,007938493
509	10,36	8,88	0,01745	0,5886	0,2169	0,0756	0,82080	0,004962539
510	10,18	8,90	0,01745	0,5693	0,1084	0,2739	0,41040	0,002321779
511	9,98	8,92	0,01745	0,5501	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
512	9,79	8,94	0,01745	0,5309	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
513	9,59	8,95	0,01745	0,5117	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
514	9,39	8,97	0,01745	0,4926	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
515	9,18	8,99	0,01745	0,4734	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
516	8,97	9,01	0,01745	0,4543	0,0205	3,8855	0,05670	0,000204225
517	8,75	9,02	0,01745	0,4352	0,1451	0,0683	0,40095	0,001325196
518	8,54	9,04	0,01745	0,4161	0,2697	0,0173	0,74520	0,002251588
519	8,32	9,06	0,01745	0,3970	0,3987	0,0069	1,10160	0,003030241
520	8,10	9,08	0,01745	0,3779	0,5277	0,0034	1,45800	0,003634835
521	7,88	9,09	0,01745	0,3589	0,5831	0,0024	1,59120	0,00357735
522	7,66	9,11	0,01745	0,3399	0,5772	0,0021	1,53840	0,003101821
523	7,44	9,13	0,01745	0,3209	0,5711	0,0018	1,48440	0,002667694
524	7,21	9,15	0,01745	0,3019	0,5651	0,0015	1,43040	0,002275529
525	6,99	9,16	0,01745	0,2829	0,5510	0,0013	1,35930	0,001899302
526	6,76	9,18	0,01745	0,2640	0,4252	0,0018	1,04880	0,001275766
527	6,54	9,20	0,01745	0,2451	0,3021	0,0028	0,74520	0,00078113
528	6,32	9,22	0,01745	0,2262	0,1790	0,0063	0,44160	0,000394196

IVO IVC								
							Com Peso de 90%	$(n_D/n)_m$
336	588	$(\mu\sigma)_m$						
Cam Profile							2,2742	2,0402
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$		$n_D/n(\alpha)$	
529	6,10	9,23	0,01745	0,2073	0,0559	0,0496	0,13800	0,000103457
530	5,88	9,25	0,01745	0,1884	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
531	5,67	9,27	0,01745	0,1695	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
532	5,45	9,29	0,01745	0,1506	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
533	5,24	9,30	0,01745	0,1318	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
534	5,02	9,32	0,01745	0,1129	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
535	4,82	9,34	0,01745	0,0941	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
536	4,62	9,35	0,01745	0,0753	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
537	4,42	9,37	0,01745	0,0564	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
538	4,22	9,39	0,01745	0,0376	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
539	4,03	9,41	0,01745	0,0188	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
540	3,85	9,42	0,01745	0,0000	0,0000	#DIV/0!	# 0,00000	0

Fonte: Autor (2016)

APÊNDICE E – PLANILHA DE CÁLCULO DO SWIRL MÉDIO DO TESTE 5

Este apêndice apresenta o método de cálculo do *Swirl* médio do teste 5.

A equação solucionada na tabela pode ser descrita da seguinte forma:

$$(c(\alpha))/c_m = \pi/2 \cdot (1 + (\lambda \cdot \cos(\alpha)) / \sqrt{(1 - \lambda^2 \cdot \sin^2(\alpha))}) \cdot \sin(\alpha)$$

Tabela 10 - Cálculo do *Swirl* médio do teste 5

(Continua)

IVO		IVC				Com		
						Peso de		
336		588				$(\mu\sigma)_m$ 90% $(n_D/n)_m$		
Cam Profile						2,2961 2,0598		
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$	$n_D/n(\alpha)$		
395	6,10	6,89	0,017	1,1364	0,0554	8,3430	0,15700	0,003538
396	6,32	6,91	0,017	1,1617	0,1773	0,8705	0,50240	0,011834
397	6,54	6,93	0,017	1,1865	0,2992	0,3257	0,84780	0,020832
398	6,76	6,95	0,017	1,2107	0,4211	0,1747	1,19320	0,030528
399	6,99	6,96	0,017	1,2344	0,5457	0,1102	1,54645	0,041126
400	7,21	6,98	0,017	1,2574	0,5608	0,1103	1,60360	0,044253
401	7,44	7,00	0,017	1,2799	0,5681	0,1134	1,63960	0,046876
402	7,66	7,02	0,017	1,3017	0,5753	0,1163	1,67560	0,049553
403	7,88	7,03	0,017	1,3229	0,5824	0,1191	1,71080	0,052256
404	8,10	7,05	0,017	1,3435	0,5277	0,1520	1,55700	0,049049
405	8,32	7,07	0,017	1,3634	0,3987	0,2783	1,17640	0,038167
406	8,54	7,09	0,017	1,3827	0,2697	0,6343	0,79580	0,026555
407	8,75	7,10	0,017	1,4013	0,1451	2,2808	0,42817	0,014675
408	8,97	7,12	0,017	1,4193	0,0205	118,4986	0,06055	0,002129
409	9,18	7,14	0,017	1,4366	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
410	9,39	7,16	0,017	1,4533	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
411	9,59	7,17	0,017	1,4693	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0

(Continuação)

IVO		IVC							

(Continuação)

IVO		IVC							
336		588							
						$(\mu\sigma)_m$		Com Peso de 90%	$(n_D/n)_m$
Cam Profile								2,2961	2,0598
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$		$n_D/n(\alpha)$		
434	13,13	7,57	0,017	1,6469	0,6308	0,1960	2,33520	0,110543	
435	13,23	7,59	0,017	1,6466	0,6318	0,1952	2,33910	0,110682	
436	13,33	7,61	0,017	1,6456	0,6329	0,1942	2,34300	0,110735	
437	13,42	7,63	0,017	1,6440	0,6339	0,1930	2,34690	0,110705	
438	13,52	7,64	0,017	1,6418	0,6349	0,1916	2,35080	0,110591	
439	13,60	7,66	0,017	1,6390	0,6358	0,1901	2,35410	0,110366	
440	13,69	7,68	0,017	1,6355	0,6367	0,1883	2,35740	0,110061	
441	13,77	7,70	0,017	1,6315	0,6376	0,1864	2,36070	0,109677	
442	13,85	7,71	0,017	1,6270	0,6385	0,1844	2,36400	0,109214	
443	13,92	7,73	0,017	1,6218	0,6392	0,1822	2,36660	0,108644	
444	13,98	7,75	0,017	1,6161	0,6399	0,1799	2,36920	0,108	
445	14,05	7,77	0,017	1,6099	0,6404	0,1776	2,37675	0,107507	
446	14,11	7,78	0,017	1,6031	0,6407	0,1752	2,38650	0,10704	
447	14,16	7,80	0,017	1,5958	0,6410	0,1726	2,39363	0,106383	
448	14,21	7,82	0,017	1,5879	0,6412	0,1700	2,40075	0,105656	
449	14,25	7,84	0,017	1,5796	0,6415	0,1672	2,40788	0,104861	
450	14,30	7,85	0,017	1,5708	0,6417	0,1643	2,41500	0,104	
451	14,34	7,87	0,017	1,5615	0,6419	0,1613	2,42025	0,102996	
452	14,37	7,89	0,017	1,5517	0,6421	0,1582	2,42550	0,101933	
453	14,41	7,91	0,017	1,5415	0,6423	0,1550	2,43075	0,100813	
454	14,44	7,92	0,017	1,5309	0,6425	0,1517	2,43600	0,099639	
455	14,46	7,94	0,017	1,5198	0,6426	0,1484	2,43825	0,098291	
456	14,47	7,96	0,017	1,5083	0,6426	0,1450	2,44050	0,096898	

IVO		IVC							
336		588							
				Com Peso					
				$(\mu\sigma)_m$		de 90%		$(n_D/n)_m$	
Cam Profile				2,2961 2,0598					
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$		$n_D/n(\alpha)$		
457	14,49	7,98	0,017	1,4964	0,6427	0,1416	2,44275	0,095462	
458	14,50	7,99	0,017	1,4841	0,6428	0,1381	2,44500	0,093985	
459	14,50	8,01	0,017	1,4714	0,6428	0,1346	2,44500	0,092385	
460	14,50	8,03	0,017	1,4583	0,6428	0,1310	2,44500	0,090754	
461	14,50	8,05	0,017	1,4449	0,6428	0,1274	2,44500	0,089093	
462	14,50	8,06	0,017	1,4312	0,6428	0,1238	2,44500	0,087406	
463	14,50	8,08	0,017	1,4171	0,6428	0,1202	2,44500	0,085694	
464	14,50	8,10	0,017	1,4027	0,6428	0,1166	2,44500	0,083962	
465	14,50	8,12	0,017	1,3880	0,6428	0,1129	2,44500	0,082211	
466	14,50	8,13	0,017	1,3730	0,6428	0,1093	2,44500	0,080445	
467	14,49	8,15	0,017	1,3577	0,6427	0,1057	2,44275	0,078592	
468	14,47	8,17	0,017	1,3422	0,6426	0,1022	2,44050	0,076732	
469	14,46	8,19	0,017	1,3264	0,6426	0,0986	2,43825	0,074866	
470	14,44	8,20	0,017	1,3103	0,6425	0,0951	2,43600	0,072997	
471	14,41	8,22	0,017	1,2940	0,6423	0,0917	2,43075	0,07104	
472	14,37	8,24	0,017	1,2775	0,6421	0,0883	2,42550	0,06909	
473	14,34	8,26	0,017	1,2608	0,6419	0,0849	2,42025	0,067147	
474	14,30	8,27	0,017	1,2439	0,6417	0,0816	2,41500	0,065214	
475	14,25	8,29	0,017	1,2267	0,6415	0,0783	2,40788	0,063244	
476	14,21	8,31	0,017	1,2094	0,6412	0,0751	2,40075	0,061291	
477	14,16	8,33	0,017	1,1920	0,6410	0,0719	2,39363	0,059356	
478	14,11	8,34	0,017	1,1743	0,6407	0,0689	2,38650	0,057441	
479	14,05	8,36	0,017	1,1566	0,6404	0,0658	2,37675	0,055487	
480	13,98	8,38	0,017	1,1386	0,6399	0,0629	2,36920	0,053609	

IVO	IVC								
336	588								
Cam Profile									
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$	$(\mu\sigma)_m$	Com Peso de 90%	$(n_D/n)_m$	
481	13,92	8,40	0,017	1,1206	0,6392	0,0601	2,36660	0,051864	
482	13,85	8,41	0,017	1,1024	0,6385	0,0574	2,36400	0,050139	
483	13,77	8,43	0,017	1,0841	0,6376	0,0547	2,36070	0,04842	
484	13,69	8,45	0,017	1,0656	0,6367	0,0521	2,35740	0,046724	
485	13,60	8,46	0,017	1,0471	0,6358	0,0496	2,35410	0,045051	
486	13,52	8,48	0,017	1,0285	0,6349	0,0471	2,35080	0,043404	
487	13,42	8,50	0,017	1,0098	0,6339	0,0447	2,34690	0,041771	
488	13,33	8,52	0,017	0,9911	0,6329	0,0424	2,34300	0,040166	
489	13,23	8,53	0,017	0,9722	0,6318	0,0402	2,33910	0,038589	
490	13,13	8,55	0,017	0,9533	0,6308	0,0380	2,33520	0,03704	
491	13,02	8,57	0,017	0,9344	0,6295	0,0359	2,33060	0,035511	
492	12,90	8,59	0,017	0,9153	0,5664	0,0417	2,09700	0,030665	
493	12,79	8,60	0,017	0,8963	0,4940	0,0515	1,82905	0,025644	
494	12,67	8,62	0,017	0,8772	0,4217	0,0662	1,56110	0,020964	
495	12,54	8,64	0,017	0,8580	0,3383	0,0963	1,25238	0,016092	
496	12,41	8,66	0,017	0,8389	0,2549	0,1586	0,94365	0,011589	
497	12,27	8,67	0,017	0,8197	0,1715	0,3268	0,63493	0,007445	
498	12,14	8,69	0,017	0,8004	0,0881	1,1529	0,32620	0,003648	
499	11,99	8,71	0,017	0,7812	0,0046	400,3664	0,01613	0,000172	
500	11,85	8,73	0,017	0,7619	0,0942	0,8698	0,33325	0,003377	
501	11,70	8,74	0,017	0,7427	0,1839	0,2115	0,65037	0,006261	
502	11,55	8,76	0,017	0,7234	0,2735	0,0883	0,96750	0,008837	
503	11,39	8,78	0,017	0,7041	0,3723	0,0440	1,31688	0,011396	
504	11,23	8,80	0,017	0,6849	0,4711	0,0253	1,66625	0,01364	

IVO		IVC							
336		588							
Cam Profile									

IVO	IVC								
336	588								
Cam Profile									
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$		$n_D/n(\alpha)$		
529	6,10	9,23	0,017	0,2073	0,0554	0,0506	0,15700	0,000118	
530	5,88	9,25	0,017	0,1884	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
531	5,67	9,27	0,017	0,1695	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
532	5,45	9,29	0,017	0,1506	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
533	5,24	9,30	0,017	0,1318	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
534	5,02	9,32	0,017	0,1129	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
535	4,82	9,34	0,017	0,0941	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
536	4,62	9,35	0,017	0,0753	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
537	4,42	9,37	0,017	0,0564	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
538	4,22	9,39	0,017	0,0376	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
539	4,03	9,41	0,017	0,0188	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
540	3,85	9,42	0,017	0,0000	0,0000	#DIV/0!	#0,00000	0	

Fonte: Autor (2016)

APÊNDICE F – PLANILHA DE CÁLCULO DO SWIRL MÉDIO DO TESTE 6

Este apêndice apresenta o método de cálculo do *Swirl* médio do teste 6.

A equação solucionada na tabela pode ser descrita da seguinte forma:

$$(c(\alpha))/c_m = \pi/2 (1 + (\lambda \cdot \cos(\alpha)) / \sqrt{(1 - \lambda^2 \cdot \sin^2(\alpha))}) \sin(\alpha)$$

Tabela 11 - Cálculo do *Swirl* médio do teste 6

(Continua)

IVO		IVC						
						Com Peso		
						$(\mu\sigma)_m$	de 90%	$(n_D/n)_m$
336		588						
Cam Profile							2,1510	1,9297
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$	$n_D/n(\alpha)$		
395	6,10	6,89	0,01745	1,1364	0,0554	8,3430	0,14200	0,0032003
396	6,32	6,91	0,01745	1,1617	0,1773	0,8705	0,45440	0,0107033
397	6,54	6,93	0,01745	1,1865	0,2992	0,3257	0,76680	0,0188413
398	6,76	6,95	0,01745	1,2107	0,4211	0,1747	1,07920	0,0276113
399	6,99	6,96	0,01745	1,2344	0,5457	0,1102	1,39870	0,0371968
400	7,21	6,98	0,01745	1,2574	0,5608	0,1103	1,45570	0,0401717
401	7,44	7,00	0,01745	1,2799	0,5681	0,1134	1,49395	0,0427119
402	7,66	7,02	0,01745	1,3017	0,5753	0,1163	1,53220	0,0453123
403	7,88	7,03	0,01745	1,3229	0,5824	0,1191	1,56960	0,047943
404	8,10	7,05	0,01745	1,3435	0,5277	0,1520	1,43100	0,0450796
405	8,32	7,07	0,01745	1,3634	0,3987	0,2783	1,08120	0,0350785
406	8,54	7,09	0,01745	1,3827	0,2697	0,6343	0,73140	0,0244058
407	8,75	7,10	0,01745	1,4013	0,1451	2,2808	0,39352	0,0134877
408	8,97	7,12	0,01745	1,4193	0,0205	118,4986	0,05565	0,0019566
409	9,18	7,14	0,01745	1,4366	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
410	9,39	7,16	0,01745	1,4533	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
411	9,59	7,17	0,01745	1,4693	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0

IVO		IVC						

IVO		IVC						
		Com Peso						
336	588			$(\mu\sigma)_m$		de 90%		$(n_D/n)_m$
Cam Profile						2,1510		1,9297
CAD	Lift (mm)	α	d α	c(α)/c _m	$\mu\sigma$ (α)	n _D /n(α)		
436	13,33	7,61	0,01745	1,6456	0,6275	0,1975	2,18600	0,1033152
437	13,42	7,63	0,01745	1,6440	0,6285	0,1963	2,19380	0,1034828
438	13,52	7,64	0,01745	1,6418	0,6296	0,1949	2,20160	0,1035717
439	13,60	7,66	0,01745	1,6390	0,6305	0,1933	2,20820	0,103526
440	13,69	7,68	0,01745	1,6355	0,6313	0,1916	2,21480	0,1034034
441	13,77	7,70	0,01745	1,6315	0,6322	0,1896	2,22140	0,1032048
442	13,85	7,71	0,01745	1,6270	0,6331	0,1875	2,22800	0,1029313
443	13,92	7,73	0,01745	1,6218	0,6338	0,1853	2,23320	0,1025199
444	13,98	7,75	0,01745	1,6161	0,6345	0,1830	2,23840	0,1020371
445	14,05	7,77	0,01745	1,6099	0,6350	0,1806	2,24315	0,1014642
446	14,11	7,78	0,01745	1,6031	0,6353	0,1781	2,24770	0,1008147
447	14,16	7,80	0,01745	1,5958	0,6356	0,1756	2,25103	0,100045
448	14,21	7,82	0,01745	1,5879	0,6358	0,1729	2,25435	0,0992126
449	14,25	7,84	0,01745	1,5796	0,6361	0,1700	2,25768	0,0983197
450	14,30	7,85	0,01745	1,5708	0,6363	0,1671	2,26100	0,0973683
451	14,34	7,87	0,01745	1,5615	0,6365	0,1640	2,26345	0,0963236
452	14,37	7,89	0,01745	1,5517	0,6367	0,1609	2,26590	0,095226
453	14,41	7,91	0,01745	1,5415	0,6369	0,1576	2,26835	0,0940778
454	14,44	7,92	0,01745	1,5309	0,6371	0,1543	2,27080	0,0928816
455	14,46	7,94	0,01745	1,5198	0,6372	0,1509	2,27185	0,0915833
456	14,47	7,96	0,01745	1,5083	0,6373	0,1475	2,27290	0,0902435
457	14,49	7,98	0,01745	1,4964	0,6373	0,1440	2,27395	0,0888649
458	14,50	7,99	0,01745	1,4841	0,6374	0,1404	2,27500	0,08745
459	14,50	8,01	0,01745	1,4714	0,6374	0,1368	2,27500	0,0859617

IVO		IVC						
		Com Peso						
336	588			$(\mu\sigma)_m$		de 90%		$(n_D/n)_m$
Cam Profile						2,1510		1,9297
CAD	Lift (mm)	α	d α	c(α)/c _m	$\mu\sigma$ (α)	n _D /n(α)		
460	14,50	8,03	0,01745	1,4583	0,6374	0,1332	2,27500	0,0844436
461	14,50	8,05	0,01745	1,4449	0,6374	0,1296	2,27500	0,0828983
462	14,50	8,06	0,01745	1,4312	0,6374	0,1259	2,27500	0,0813283
463	14,50	8,08	0,01745	1,4171	0,6374	0,1222	2,27500	0,0797361
464	14,50	8,10	0,01745	1,4027	0,6374	0,1186	2,27500	0,0781243
465	14,50	8,12	0,01745	1,3880	0,6374	0,1149	2,27500	0,0764952
466	14,50	8,13	0,01745	1,3730	0,6374	0,1112	2,27500	0,0748512
467	14,49	8,15	0,01745	1,3577	0,6373	0,1075	2,27395	0,073161
468	14,47	8,17	0,01745	1,3422	0,6373	0,1039	2,27290	0,0714621
469	14,46	8,19	0,01745	1,3264	0,6372	0,1003	2,27185	0,0697567
470	14,44	8,20	0,01745	1,3103	0,6371	0,0967	2,27080	0,068047
471	14,41	8,22	0,01745	1,2940	0,6369	0,0932	2,26835	0,0662942
472	14,37	8,24	0,01745	1,2775	0,6367	0,0898	2,26590	0,0645434
473	14,34	8,26	0,01745	1,2608	0,6365	0,0863	2,26345	0,0627966
474	14,30	8,27	0,01745	1,2439	0,6363	0,0829	2,26100	0,0610555
475	14,25	8,29	0,01745	1,2267	0,6361	0,0796	2,25768	0,0592991
476	14,21	8,31	0,01745	1,2094	0,6358	0,0764	2,25435	0,0575534
477	14,16	8,33	0,01745	1,1920	0,6356	0,0732	2,25103	0,05582
478	14,11	8,34	0,01745	1,1743	0,6353	0,0700	2,24770	0,0541005
479	14,05	8,36	0,01745	1,1566	0,6350	0,0670	2,24315	0,0523679
480	13,98	8,38	0,01745	1,1386	0,6345	0,0640	2,23840	0,0506493
481	13,92	8,40	0,01745	1,1206	0,6338	0,0611	2,23320	0,048941
482	13,85	8,41	0,01745	1,1024	0,6331	0,0583	2,22800	0,0472548
483	13,77	8,43	0,01745	1,0841	0,6322	0,0556	2,22140	0,0455631

IVO		IVC						

IVO IVC								
336	588	Com Peso						
		$(\mu\sigma)_m$ de 90% $(n_D/n)_m$						
Cam Profile		2,1510 1,9297						
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$	$n_D/n(\alpha)$		
508	10,54	8,87	0,01745	0,6078	0,3253	0,0370	1,12860	0,007277
509	10,36	8,88	0,01745	0,5886	0,2169	0,0756	0,75240	0,004549
510	10,18	8,90	0,01745	0,5693	0,1084	0,2739	0,37620	0,0021283
511	9,98	8,92	0,01745	0,5501	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
512	9,79	8,94	0,01745	0,5309	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
513	9,59	8,95	0,01745	0,5117	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
514	9,39	8,97	0,01745	0,4926	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
515	9,18	8,99	0,01745	0,4734	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
516	8,97	9,01	0,01745	0,4543	0,0205	3,8855	0,05565	0,0002004
517	8,75	9,02	0,01745	0,4352	0,1451	0,0683	0,39352	0,0013007
518	8,54	9,04	0,01745	0,4161	0,2697	0,0173	0,73140	0,0022099
519	8,32	9,06	0,01745	0,3970	0,3987	0,0069	1,08120	0,0029741
520	8,10	9,08	0,01745	0,3779	0,5277	0,0034	1,43100	0,0035675
521	7,88	9,09	0,01745	0,3589	0,5824	0,0024	1,56960	0,0035288
522	7,66	9,11	0,01745	0,3399	0,5753	0,0021	1,53220	0,0030893
523	7,44	9,13	0,01745	0,3209	0,5681	0,0018	1,49395	0,0026849
524	7,21	9,15	0,01745	0,3019	0,5608	0,0015	1,45570	0,0023158
525	6,99	9,16	0,01745	0,2829	0,5457	0,0013	1,39870	0,0019544
526	6,76	9,18	0,01745	0,2640	0,4211	0,0018	1,07920	0,0013127
527	6,54	9,20	0,01745	0,2451	0,2992	0,0029	0,76680	0,0008038
528	6,32	9,22	0,01745	0,2262	0,1773	0,0064	0,45440	0,0004056
529	6,10	9,23	0,01745	0,2073	0,0554	0,0506	0,14200	0,0001065
530	5,88	9,25	0,01745	0,1884	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
531	5,67	9,27	0,01745	0,1695	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0

IVO IVC								
		Com Peso						
336	588	$(\mu\sigma)_m$ de 90% $(n_D/n)_m$						
Cam Profile		2,1510 1,9297						
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$	$n_D/n(\alpha)$		
532	5,45	9,29	0,01745	0,1506	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
533	5,24	9,30	0,01745	0,1318	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
534	5,02	9,32	0,01745	0,1129	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
535	4,82	9,34	0,01745	0,0941	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
536	4,62	9,35	0,01745	0,0753	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
537	4,42	9,37	0,01745	0,0564	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
538	4,22	9,39	0,01745	0,0376	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
539	4,03	9,41	0,01745	0,0188	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
540	3,85	9,42	0,01745	0,0000	0,0000	#DIV/0! #	0,00000	0

Fonte: Autor (2016)

APÊNDICE G – PLANILHA DE CÁLCULO DO *SWIRL* MÉDIO DO TESTE 7

Este apêndice apresenta o método de cálculo do *Swirl* médio do teste 7.

A equação solucionada na tabela pode ser descrita da seguinte forma:

$$(c(\alpha))/c_m = \pi/2 (1 + (\lambda \cdot \cos(\alpha)) / \sqrt{(1 - \lambda^2 \cdot \sin^2(\alpha))}) \sin(\alpha)$$

Tabela 12 - Cálculo do *Swirl* médio do teste 7

(Continua)

(Continuação)								
IVO		IVC						
						(μσ) _m	Com Peso de 90%	(n _D /n) _m
336	588							
Cam Profile							2,3155	2,0773
CAD	Lift (mm)	α	dα	c(α)/c _m	μσ (α)		n _D /n(α)	
395	6,10	6,89	0,017453293	1,1364	0,0565	8,0282	0,14300	0,003222853
396	6,32	6,91	0,017453293	1,1617	0,1807	0,8377	0,45760	0,010778691
397	6,54	6,93	0,017453293	1,1865	0,3050	0,3134	0,77220	0,018973964
398	6,76	6,95	0,017453293	1,2107	0,4293	0,1681	1,08680	0,027805721
399	6,99	6,96	0,017453293	1,2344	0,5563	0,1061	1,40855	0,037458758
400	7,21	6,98	0,017453293	1,2574	0,5716	0,1062	1,45520	0,040157863
401	7,44	7,00	0,017453293	1,2799	0,5788	0,1092	1,48220	0,042375943
402	7,66	7,02	0,017453293	1,3017	0,5861	0,1121	1,50920	0,044632112
403	7,88	7,03	0,017453293	1,3229	0,5932	0,1148	1,53560	0,046904441
404	8,10	7,05	0,017453293	1,3435	0,5374	0,1466	1,39500	0,043945508
405	8,32	7,07	0,017453293	1,3634	0,4060	0,2683	1,05400	0,034195977
406	8,54	7,09	0,017453293	1,3827	0,2747	0,6116	0,71300	0,023791777
407	8,75	7,10	0,017453293	1,4013	0,1478	2,1994	0,38362	0,013148429
408	8,97	7,12	0,017453293	1,4193	0,0209	114,2669	0,05425	0,001907391
409	9,18	7,14	0,017453293	1,4366	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
410	9,39	7,16	0,017453293	1,4533	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
411	9,59	7,17	0,017453293	1,4693	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
412	9,79	7,19	0,017453293	1,4845	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
413	9,98	7,21	0,017453293	1,4992	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
414	10,18	7,23	0,017453293	1,5131	0,1104	4,9623	0,38700	0,015463533
415	10,36	7,24	0,017453293	1,5263	0,2208	1,2734	0,77400	0,031470406
416	10,54	7,26	0,017453293	1,5388	0,3311	0,5800	1,16100	0,047984601
417	10,72	7,28	0,017453293	1,5507	0,4415	0,3339	1,54800	0,064968544
418	10,90	7,30	0,017453293	1,5619	0,5519	0,2183	1,93500	0,082383256
419	11,06	7,31	0,017453293	1,5723	0,5749	0,2053	2,01563	0,086969184
420	11,23	7,33	0,017453293	1,5821	0,4752	0,3060	1,66625	0,072790296

IVO		IVC						
336	588				$(\mu\sigma)_m$	Com Peso de 90%	$(n_D/n)_m$	
Cam Profile						2,3155	2,0773	
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$		$n_D/n(\alpha)$	
421	11,39	7,35	0,017453293	1,5911	0,3756	0,4984	1,31688	0,058189312
422	11,55	7,37	0,017453293	1,5995	0,2759	0,9380	0,96750	0,043202609
423	11,70	7,38	0,017453293	1,6072	0,1855	2,1058	0,65037	0,029321426
424	11,85	7,40	0,017453293	1,6142	0,0950	8,1256	0,33325	0,015155217
425	11,99	7,42	0,017453293	1,6205	0,0046	3511,3693	0,01613	0,000739056
426	12,14	7,44	0,017453293	1,6261	0,0889	9,5038	0,33180	0,015312994
427	12,27	7,45	0,017453293	1,6311	0,1730	2,5315	0,64583	0,029986876
428	12,41	7,47	0,017453293	1,6353	0,2571	1,1550	0,95985	0,044800638
429	12,54	7,49	0,017453293	1,6389	0,3412	0,6601	1,27388	0,059718524
430	12,67	7,50	0,017453293	1,6418	0,4253	0,4271	1,58790	0,074704835
431	12,79	7,52	0,017453293	1,6441	0,4983	0,3124	1,86045	0,087767449
432	12,90	7,54	0,017453293	1,6457	0,5713	0,2384	2,13300	0,100820145
433	13,02	7,56	0,017453293	1,6466	0,6349	0,1933	2,37105	0,112200175
434	13,13	7,57	0,017453293	1,6469	0,6361	0,1927	2,37910	0,112621509
435	13,23	7,59	0,017453293	1,6466	0,6372	0,1919	2,38593	0,112897584
436	13,33	7,61	0,017453293	1,6456	0,6382	0,1909	2,39275	0,1130867
437	13,42	7,63	0,017453293	1,6440	0,6393	0,1898	2,39958	0,113189359
438	13,52	7,64	0,017453293	1,6418	0,6403	0,1884	2,40640	0,113206223
439	13,60	7,66	0,017453293	1,6390	0,6412	0,1869	2,41218	0,113088886
440	13,69	7,68	0,017453293	1,6355	0,6421	0,1852	2,41795	0,112887959
441	13,77	7,70	0,017453293	1,6315	0,6430	0,1833	2,42373	0,112604666
442	13,85	7,71	0,017453293	1,6270	0,6439	0,1813	2,42950	0,112240372
443	13,92	7,73	0,017453293	1,6218	0,6446	0,1792	2,43405	0,111740336
444	13,98	7,75	0,017453293	1,6161	0,6453	0,1769	2,43860	0,111163207
445	14,05	7,77	0,017453293	1,6099	0,6457	0,1746	2,44270	0,11049048
446	14,11	7,78	0,017453293	1,6031	0,6461	0,1723	2,44660	0,10973584
447	14,16	7,80	0,017453293	1,5958	0,6463	0,1698	2,44945	0,108863849
448	14,21	7,82	0,017453293	1,5879	0,6466	0,1672	2,45230	0,107924288
449	14,25	7,84	0,017453293	1,5796	0,6468	0,1644	2,45515	0,106919521
450	14,30	7,85	0,017453293	1,5708	0,6471	0,1615	2,45800	0,105851983
451	14,34	7,87	0,017453293	1,5615	0,6473	0,1586	2,46010	0,104692254
452	14,37	7,89	0,017453293	1,5517	0,6475	0,1556	2,46220	0,103475594
453	14,41	7,91	0,017453293	1,5415	0,6477	0,1524	2,46430	0,10220465
454	14,44	7,92	0,017453293	1,5309	0,6479	0,1492	2,46640	0,1008821
455	14,46	7,94	0,017453293	1,5198	0,6479	0,1459	2,46730	0,099462276

IVO		IVC						
336	588				$(\mu\sigma)_m$		Com Peso de 90%	$(n_D/n)_m$
Cam Profile							2,3155	2,0773
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$		$n_D/n(\alpha)$	
456	14,47	7,96	0,017453293	1,5083	0,6480	0,1426	2,46820	0,097997739
457	14,49	7,98	0,017453293	1,4964	0,6481	0,1392	2,46910	0,096491289
458	14,50	7,99	0,017453293	1,4841	0,6482	0,1358	2,47000	0,094945724
459	14,50	8,01	0,017453293	1,4714	0,6482	0,1323	2,47000	0,093329831
460	14,50	8,03	0,017453293	1,4583	0,6482	0,1288	2,47000	0,091681598
461	14,50	8,05	0,017453293	1,4449	0,6482	0,1253	2,47000	0,090003816
462	14,50	8,06	0,017453293	1,4312	0,6482	0,1218	2,47000	0,08829925
463	14,50	8,08	0,017453293	1,4171	0,6482	0,1182	2,47000	0,086570627
464	14,50	8,10	0,017453293	1,4027	0,6482	0,1147	2,47000	0,084820635
465	14,50	8,12	0,017453293	1,3880	0,6482	0,1111	2,47000	0,083051917
466	14,50	8,13	0,017453293	1,3730	0,6482	0,1075	2,47000	0,081267066
467	14,49	8,15	0,017453293	1,3577	0,6481	0,1040	2,46910	0,079439666
468	14,47	8,17	0,017453293	1,3422	0,6480	0,1005	2,46820	0,077602472
469	14,46	8,19	0,017453293	1,3264	0,6479	0,0970	2,46730	0,075757916
470	14,44	8,20	0,017453293	1,3103	0,6479	0,0936	2,46640	0,073908359
471	14,41	8,22	0,017453293	1,2940	0,6477	0,0902	2,46430	0,072021021
472	14,37	8,24	0,017453293	1,2775	0,6475	0,0868	2,46220	0,070134972
473	14,34	8,26	0,017453293	1,2608	0,6473	0,0835	2,46010	0,068252356
474	14,30	8,27	0,017453293	1,2439	0,6471	0,0802	2,45800	0,066375236
475	14,25	8,29	0,017453293	1,2267	0,6468	0,0770	2,45515	0,064485894
476	14,21	8,31	0,017453293	1,2094	0,6466	0,0739	2,45230	0,062607035
477	14,16	8,33	0,017453293	1,1920	0,6463	0,0708	2,44945	0,060740466
478	14,11	8,34	0,017453293	1,1743	0,6461	0,0677	2,44660	0,058887914
479	14,05	8,36	0,017453293	1,1566	0,6457	0,0648	2,44270	0,057026505
480	13,98	8,38	0,017453293	1,1386	0,6453	0,0619	2,43860	0,05517929
481	13,92	8,40	0,017453293	1,1206	0,6446	0,0591	2,43405	0,053342671
482	13,85	8,41	0,017453293	1,1024	0,6439	0,0564	2,42950	0,051528507
483	13,77	8,43	0,017453293	1,0841	0,6430	0,0538	2,42373	0,049712944
484	13,69	8,45	0,017453293	1,0656	0,6421	0,0512	2,41795	0,047923985
485	13,60	8,46	0,017453293	1,0471	0,6412	0,0487	2,41218	0,046162703
486	13,52	8,48	0,017453293	1,0285	0,6403	0,0463	2,40640	0,044430091
487	13,42	8,50	0,017453293	1,0098	0,6393	0,0440	2,39958	0,042708371
488	13,33	8,52	0,017453293	0,9911	0,6382	0,0417	2,39275	0,041018441
489	13,23	8,53	0,017453293	0,9722	0,6372	0,0395	2,38593	0,039361029
490	13,13	8,55	0,017453293	0,9533	0,6361	0,0374	2,37910	0,037736787

IVO		IVC					Com Peso de 90%	$(n_D/n)_m$
336	588				$(\mu\sigma)_m$			
Cam Profile							2,3155	2,0773
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$		$n_D/n(\alpha)$	
491	13,02	8,57	0,017453293	0,9344	0,6349	0,0353	2,37105	0,036127631
492	12,90	8,59	0,017453293	0,9153	0,5713	0,0410	2,13300	0,031190945
493	12,79	8,60	0,017453293	0,8963	0,4983	0,0506	1,86045	0,026084008
494	12,67	8,62	0,017453293	0,8772	0,4253	0,0651	1,58790	0,021323784
495	12,54	8,64	0,017453293	0,8580	0,3412	0,0947	1,27388	0,016368321
496	12,41	8,66	0,017453293	0,8389	0,2571	0,1559	0,95985	0,011788331
497	12,27	8,67	0,017453293	0,8197	0,1730	0,3213	0,64583	0,00757275
498	12,14	8,69	0,017453293	0,8004	0,0889	1,1335	0,33180	0,00371026
499	11,99	8,71	0,017453293	0,7812	0,0046	393,3733	0,01613	0,00017175
500	11,85	8,73	0,017453293	0,7619	0,0950	0,8546	0,33325	0,003376697
501	11,70	8,74	0,017453293	0,7427	0,1855	0,2078	0,65037	0,006261011
502	11,55	8,76	0,017453293	0,7234	0,2759	0,0868	0,96750	0,008836849
503	11,39	8,78	0,017453293	0,7041	0,3756	0,0432	1,31688	0,011395561
504	11,23	8,80	0,017453293	0,6849	0,4752	0,0248	1,66625	0,013640302
505	11,06	8,81	0,017453293	0,6656	0,5749	0,0156	2,01563	0,015584771
506	10,90	8,83	0,017453293	0,6463	0,5519	0,0155	1,93500	0,014107687
507	10,72	8,85	0,017453293	0,6271	0,4415	0,0221	1,54800	0,010623482
508	10,54	8,87	0,017453293	0,6078	0,3311	0,0357	1,16100	0,00748586
509	10,36	8,88	0,017453293	0,5886	0,2208	0,0730	0,77400	0,004679588
510	10,18	8,90	0,017453293	0,5693	0,1104	0,2644	0,38700	0,002189397
511	9,98	8,92	0,017453293	0,5501	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
512	9,79	8,94	0,017453293	0,5309	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
513	9,59	8,95	0,017453293	0,5117	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
514	9,39	8,97	0,017453293	0,4926	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
515	9,18	8,99	0,017453293	0,4734	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
516	8,97	9,01	0,017453293	0,4543	0,0209	3,7467	0,05425	0,000195401
517	8,75	9,02	0,017453293	0,4352	0,1478	0,0659	0,38362	0,001267934
518	8,54	9,04	0,017453293	0,4161	0,2747	0,0167	0,71300	0,002154297
519	8,32	9,06	0,017453293	0,3970	0,4060	0,0066	1,05400	0,002899305
520	8,10	9,08	0,017453293	0,3779	0,5374	0,0033	1,39500	0,003477774
521	7,88	9,09	0,017453293	0,3589	0,5932	0,0023	1,53560	0,003452349
522	7,66	9,11	0,017453293	0,3399	0,5861	0,0020	1,50920	0,003042946
523	7,44	9,13	0,017453293	0,3209	0,5788	0,0017	1,48220	0,00266374
524	7,21	9,15	0,017453293	0,3019	0,5716	0,0015	1,45520	0,002314982
525	6,99	9,16	0,017453293	0,2829	0,5563	0,0013	1,40855	0,001968118

IVO	IVC		
336	588	$(\mu\sigma)_m$	Com Peso de 90% $(n_D/n)_m$
Cam Profile			2,3155 2,0773

CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$	$n_D/n(\alpha)$	
526	6,76	9,18	0,017453293	0,2640	0,4293	0,0017	1,08680 0,001321989
527	6,54	9,20	0,017453293	0,2451	0,3050	0,0028	0,77220 0,000809431
528	6,32	9,22	0,017453293	0,2262	0,1807	0,0062	0,45760 0,000408479
529	6,10	9,23	0,017453293	0,2073	0,0565	0,0487	0,14300 0,000107205
530	5,88	9,25	0,017453293	0,1884	0,0000	#DIV/0!	0,00000 0
531	5,67	9,27	0,017453293	0,1695	0,0000	#DIV/0!	0,00000 0
532	5,45	9,29	0,017453293	0,1506	0,0000	#DIV/0!	0,00000 0
533	5,24	9,30	0,017453293	0,1318	0,0000	#DIV/0!	0,00000 0
534	5,02	9,32	0,017453293	0,1129	0,0000	#DIV/0!	0,00000 0
535	4,82	9,34	0,017453293	0,0941	0,0000	#DIV/0!	0,00000 0
536	4,62	9,35	0,017453293	0,0753	0,0000	#DIV/0!	0,00000 0
537	4,42	9,37	0,017453293	0,0564	0,0000	#DIV/0!	0,00000 0
538	4,22	9,39	0,017453293	0,0376	0,0000	#DIV/0!	0,00000 0
539	4,03	9,41	0,017453293	0,0188	0,0000	#DIV/0!	0,00000 0
540	3,85	9,42	0,017453293	0,0000	0,0000	#DIV/0! ##	0,00000 0

Fonte: Autor (2016)

APÊNDICE H – PLANILHA DE CÁLCULO DO SWIRL MÉDIO DO TESTE 8

Este apêndice apresenta o método de cálculo do *Swirl* médio do teste 8.

A equação solucionada na tabela pode ser descrita da seguinte forma:

$$(c(\alpha))/c_m = \pi/2 (1 + (\lambda \cdot \cos(\alpha)) / \sqrt{(1 - \lambda^2 \cdot [\sin(\alpha)]^2)}) \sin(\alpha)$$

Tabela 13 - Cálculo do *Swirl* médio do teste 8

(Continua)

IVO		IVC					Com Peso de 90%	(n _D /n) _m
336	588				(μσ) _m			
Cam Profile							2,0395	1,8296
CAD	Lift (mm)	α	dα	c(α)/c _m	μσ (α)		n _D /n(α)	
395	6,10	6,89	0,01745	1,1364	0,0570	7,8775	0,11800	0,002659
396	6,32	6,91	0,01745	1,1617	0,1825	0,8220	0,37760	0,008894
397	6,54	6,93	0,01745	1,1865	0,3079	0,3075	0,63720	0,015657
398	6,76	6,95	0,01745	1,2107	0,4333	0,1650	0,89680	0,022945
399	6,99	6,96	0,01745	1,2344	0,5616	0,1041	1,16230	0,03091
400	7,21	6,98	0,01745	1,2574	0,5770	0,1042	1,23040	0,033954
401	7,44	7,00	0,01745	1,2799	0,5842	0,1072	1,28440	0,036721
402	7,66	7,02	0,01745	1,3017	0,5915	0,1100	1,33840	0,039581
403	7,88	7,03	0,01745	1,3229	0,5986	0,1128	1,39120	0,042494
404	8,10	7,05	0,01745	1,3435	0,5422	0,1440	1,27800	0,04026
405	8,32	7,07	0,01745	1,3634	0,4097	0,2636	0,96560	0,031328
406	8,54	7,09	0,01745	1,3827	0,2771	0,6008	0,65320	0,021796
407	8,75	7,10	0,01745	1,4013	0,1491	2,1603	0,35145	0,012046
408	8,97	7,12	0,01745	1,4193	0,0211	112,2355	0,04970	0,001747
409	9,18	7,14	0,01745	1,4366	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
410	9,39	7,16	0,01745	1,4533	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
411	9,59	7,17	0,01745	1,4693	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
412	9,79	7,19	0,01745	1,4845	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
413	9,98	7,21	0,01745	1,4992	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
414	10,18	7,23	0,01745	1,5131	0,1133	4,7111	0,35280	0,014097
415	10,36	7,24	0,01745	1,5263	0,2266	1,2089	0,70560	0,028689
416	10,54	7,26	0,01745	1,5388	0,3399	0,5507	1,05840	0,043744
417	10,72	7,28	0,01745	1,5507	0,4531	0,3170	1,41120	0,059227
418	10,90	7,30	0,01745	1,5619	0,5664	0,2073	1,76400	0,075103
419	11,06	7,31	0,01745	1,5723	0,5900	0,1949	1,83750	0,079284
420	11,23	7,33	0,01745	1,5821	0,4877	0,2905	1,51900	0,066358
421	11,39	7,35	0,01745	1,5911	0,3855	0,4732	1,20050	0,053047

IVO		IVC							

IVO	IVC							
336	588						Com Peso de 90%	$(n_D/n)_m$
Cam Profile							2,0395	1,8296
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$	$(\mu\sigma)_m$	$n_D/n(\alpha)$	
458	14,50	7,99	0,01745	1,4841	0,6616	0,1303	2,15500	0,082837
459	14,50	8,01	0,01745	1,4714	0,6616	0,1270	2,15500	0,081427
460	14,50	8,03	0,01745	1,4583	0,6616	0,1237	2,15500	0,079989
461	14,50	8,05	0,01745	1,4449	0,6616	0,1203	2,15500	0,078526
462	14,50	8,06	0,01745	1,4312	0,6616	0,1169	2,15500	0,077038
463	14,50	8,08	0,01745	1,4171	0,6616	0,1135	2,15500	0,07553
464	14,50	8,10	0,01745	1,4027	0,6616	0,1100	2,15500	0,074003
465	14,50	8,12	0,01745	1,3880	0,6616	0,1066	2,15500	0,07246
466	14,50	8,13	0,01745	1,3730	0,6616	0,1032	2,15500	0,070903
467	14,49	8,15	0,01745	1,3577	0,6616	0,0998	2,15545	0,069348
468	14,47	8,17	0,01745	1,3422	0,6616	0,0964	2,15590	0,067783
469	14,46	8,19	0,01745	1,3264	0,6616	0,0930	2,15635	0,06621
470	14,44	8,20	0,01745	1,3103	0,6616	0,0897	2,15680	0,064631
471	14,41	8,22	0,01745	1,2940	0,6616	0,0864	2,15785	0,063065
472	14,37	8,24	0,01745	1,2775	0,6616	0,0831	2,15890	0,061496
473	14,34	8,26	0,01745	1,2608	0,6616	0,0799	2,15995	0,059925
474	14,30	8,27	0,01745	1,2439	0,6616	0,0767	2,16100	0,058355
475	14,25	8,29	0,01745	1,2267	0,6616	0,0736	2,16243	0,056797
476	14,21	8,31	0,01745	1,2094	0,6616	0,0705	2,16385	0,055243
477	14,16	8,33	0,01745	1,1920	0,6616	0,0675	2,16528	0,053694
478	14,11	8,34	0,01745	1,1743	0,6616	0,0646	2,16670	0,052151
479	14,05	8,36	0,01745	1,1566	0,6616	0,0617	2,16865	0,050629
480	13,98	8,38	0,01745	1,1386	0,6614	0,0589	2,16780	0,049052
481	13,92	8,40	0,01745	1,1206	0,6607	0,0563	2,16065	0,047351
482	13,85	8,41	0,01745	1,1024	0,6600	0,0537	2,15350	0,045675
483	13,77	8,43	0,01745	1,0841	0,6591	0,0512	2,14443	0,043984
484	13,69	8,45	0,01745	1,0656	0,6582	0,0487	2,13535	0,042323
485	13,60	8,46	0,01745	1,0471	0,6574	0,0464	2,12628	0,040691
486	13,52	8,48	0,01745	1,0285	0,6565	0,0441	2,11720	0,039091
487	13,42	8,50	0,01745	1,0098	0,6554	0,0418	2,10648	0,037492
488	13,33	8,52	0,01745	0,9911	0,6544	0,0397	2,09575	0,035927
489	13,23	8,53	0,01745	0,9722	0,6533	0,0376	2,08503	0,034397
490	13,13	8,55	0,01745	0,9533	0,6523	0,0355	2,07430	0,032902
491	13,02	8,57	0,01745	0,9344	0,6510	0,0336	2,06165	0,031413
492	12,90	8,59	0,01745	0,9153	0,5858	0,0390	1,85400	0,027111
493	12,79	8,60	0,01745	0,8963	0,5109	0,0481	1,61710	0,022672

IVO		IVC							

(Conclusão)									
IVO		IVC							
				$(\mu\sigma)_m$			Com Peso de 90%	$(n_D/n)_m$	
336	588								
Cam Profile								2,0395	1,8296
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$		$n_D/n(\alpha)$		
530	5,88	9,25	0,01745	0,1884	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
531	5,67	9,27	0,01745	0,1695	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
532	5,45	9,29	0,01745	0,1506	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
533	5,24	9,30	0,01745	0,1318	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
534	5,02	9,32	0,01745	0,1129	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
535	4,82	9,34	0,01745	0,0941	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
536	4,62	9,35	0,01745	0,0753	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
537	4,42	9,37	0,01745	0,0564	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
538	4,22	9,39	0,01745	0,0376	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
539	4,03	9,41	0,01745	0,0188	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
540	3,85	9,42	0,01745	0,0000	0,0000	#DIV/0!	# 0,00000	0	

APÊNDICE I – PLANILHA DE CÁLCULO DO SWIRL MÉDIO DO TESTE 9

Este apêndice apresenta o método de cálculo do *Swirl* médio do teste 9.

A equação solucionada na tabela pode ser descrita da seguinte forma:

$$(c(\alpha))/c_m = \pi/2 (1 + (\lambda \cdot \cos(\alpha)) / \sqrt{(1 - \lambda^2 \cdot \sin^2(\alpha))}) \sin(\alpha)$$

Tabela 14 - Cálculo do *Swirl* médio do teste 9

(Continua)

(Continued)								
IVO	IVC						Com	
							Peso	
336	588						de 90%	(n _D /n) _m
Cam Profile							2,2951	2,0589
CAD	Lift (mm)	α	dα	c(α)/c _m	μσ (α)		n _D /n(α)	
395	6,10	6,89	0,01745	1,1364	0,0570	7,8775	0,12700	0,0028623
396	6,32	6,91	0,01745	1,1617	0,1825	0,8220	0,40640	0,0095727
397	6,54	6,93	0,01745	1,1865	0,3079	0,3075	0,68580	0,016851
398	6,76	6,95	0,01745	1,2107	0,4333	0,1650	0,96520	0,0246946
399	6,99	6,96	0,01745	1,2344	0,5616	0,1041	1,25095	0,0332676
400	7,21	6,98	0,01745	1,2574	0,5758	0,1047	1,32040	0,0364379
401	7,44	7,00	0,01745	1,2799	0,5819	0,1081	1,37440	0,039294
402	7,66	7,02	0,01745	1,3017	0,5879	0,1114	1,42840	0,0422426
403	7,88	7,03	0,01745	1,3229	0,5939	0,1146	1,48120	0,0452428
404	8,10	7,05	0,01745	1,3435	0,5374	0,1466	1,35900	0,0428114
405	8,32	7,07	0,01745	1,3634	0,4060	0,2683	1,02680	0,0333135
406	8,54	7,09	0,01745	1,3827	0,2747	0,6116	0,69460	0,0231778
407	8,75	7,10	0,01745	1,4013	0,1478	2,1994	0,37372	0,0128091
408	8,97	7,12	0,01745	1,4193	0,0209	114,2669	0,05285	0,0018582
409	9,18	7,14	0,01745	1,4366	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
410	9,39	7,16	0,01745	1,4533	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
411	9,59	7,17	0,01745	1,4693	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
412	9,79	7,19	0,01745	1,4845	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
413	9,98	7,21	0,01745	1,4992	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
414	10,18	7,23	0,01745	1,5131	0,1113	4,8764	0,38520	0,0153916
415	10,36	7,24	0,01745	1,5263	0,2227	1,2514	0,77040	0,031324
416	10,54	7,26	0,01745	1,5388	0,3340	0,5700	1,15560	0,0477614
417	10,72	7,28	0,01745	1,5507	0,4454	0,3281	1,54080	0,0646664
418	10,90	7,30	0,01745	1,5619	0,5567	0,2145	1,92600	0,0820001
419	11,06	7,31	0,01745	1,5723	0,5799	0,2017	2,00625	0,0865647
420	11,23	7,33	0,01745	1,5821	0,4794	0,3007	1,65850	0,0724517

IVO		IVC						
						Com Peso de 90% $(n_D/n)_m$		
336	588					$(\mu\sigma)_m$		
Cam Profile							2,0395	1,8296
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$	$n_D/n(\alpha)$		
421	11,39	7,35	0,01745	1,5911	0,3789	0,4898	1,31075	0,0579187
422	11,55	7,37	0,01745	1,5995	0,2784	0,9217	0,96300	0,0430017
423	11,70	7,38	0,01745	1,6072	0,1871	2,0693	0,64735	0,029185
424	11,85	7,40	0,01745	1,6142	0,0959	7,9849	0,33170	0,0150847
425	11,99	7,42	0,01745	1,6205	0,0046	3450,5675	0,01605	0,0007356
426	12,14	7,44	0,01745	1,6261	0,0889	9,5038	0,33040	0,0152484
427	12,27	7,45	0,01745	1,6311	0,1730	2,5315	0,64310	0,0298603
428	12,41	7,47	0,01745	1,6353	0,2571	1,1550	0,95580	0,0446116
429	12,54	7,49	0,01745	1,6389	0,3412	0,6601	1,26850	0,0594665
430	12,67	7,50	0,01745	1,6418	0,4253	0,4271	1,58120	0,0743896
431	12,79	7,52	0,01745	1,6441	0,4983	0,3124	1,85260	0,0873971
432	12,90	7,54	0,01745	1,6457	0,5713	0,2384	2,12400	0,1003947
433	13,02	7,56	0,01745	1,6466	0,6349	0,1933	2,36180	0,1117625
434	13,13	7,57	0,01745	1,6469	0,6361	0,1927	2,37560	0,1124558
435	13,23	7,59	0,01745	1,6466	0,6372	0,1919	2,38730	0,1129626
436	13,33	7,61	0,01745	1,6456	0,6382	0,1909	2,39900	0,1133821
437	13,42	7,63	0,01745	1,6440	0,6393	0,1898	2,41070	0,1137141
438	13,52	7,64	0,01745	1,6418	0,6403	0,1884	2,42240	0,1139589
439	13,60	7,66	0,01745	1,6390	0,6412	0,1869	2,43230	0,1140324
440	13,69	7,68	0,01745	1,6355	0,6421	0,1852	2,44220	0,1140201
441	13,77	7,70	0,01745	1,6315	0,6430	0,1833	2,45210	0,113923
442	13,85	7,71	0,01745	1,6270	0,6439	0,1813	2,46200	0,1137418
443	13,92	7,73	0,01745	1,6218	0,6446	0,1792	2,46980	0,1133815
444	13,98	7,75	0,01745	1,6161	0,6453	0,1769	2,47760	0,112941
445	14,05	7,77	0,01745	1,6099	0,6460	0,1745	2,47370	0,1118927
446	14,11	7,78	0,01745	1,6031	0,6467	0,1719	2,46460	0,1105432
447	14,16	7,80	0,01745	1,5958	0,6472	0,1693	2,45795	0,1092416
448	14,21	7,82	0,01745	1,5879	0,6477	0,1666	2,45130	0,1078803
449	14,25	7,84	0,01745	1,5796	0,6482	0,1637	2,44465	0,1064623
450	14,30	7,85	0,01745	1,5708	0,6487	0,1607	2,43800	0,1049907
451	14,34	7,87	0,01745	1,5615	0,6491	0,1577	2,43310	0,1035432
452	14,37	7,89	0,01745	1,5517	0,6495	0,1546	2,42820	0,1020467
453	14,41	7,91	0,01745	1,5415	0,6498	0,1514	2,42330	0,1005042
454	14,44	7,92	0,01745	1,5309	0,6502	0,1481	2,41840	0,0989188
455	14,46	7,94	0,01745	1,5198	0,6504	0,1448	2,41630	0,0974064
456	14,47	7,96	0,01745	1,5083	0,6505	0,1415	2,41420	0,0958537

(Continuação)								
IVO	IVC						Com	
336	588						Peso	
					$(\mu\sigma)_m$	de 90%	$(n_D/n)_m$	
Cam Profile						2,0395	1,8296	
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$		$n_D/n(\alpha)$	
457	14,49	7,98	0,01745	1,4964	0,6507	0,1381	2,41210	0,0942638
458	14,50	7,99	0,01745	1,4841	0,6509	0,1347	2,41000	0,0926394
459	14,50	8,01	0,01745	1,4714	0,6509	0,1312	2,41000	0,0910627
460	14,50	8,03	0,01745	1,4583	0,6509	0,1278	2,41000	0,0894545
461	14,50	8,05	0,01745	1,4449	0,6509	0,1243	2,41000	0,0878175
462	14,50	8,06	0,01745	1,4312	0,6509	0,1208	2,41000	0,0861543
463	14,50	8,08	0,01745	1,4171	0,6509	0,1172	2,41000	0,0844677
464	14,50	8,10	0,01745	1,4027	0,6509	0,1137	2,41000	0,0827602
465	14,50	8,12	0,01745	1,3880	0,6509	0,1102	2,41000	0,0810345
466	14,50	8,13	0,01745	1,3730	0,6509	0,1066	2,41000	0,079293
467	14,49	8,15	0,01745	1,3577	0,6507	0,1032	2,41210	0,0776058
468	14,47	8,17	0,01745	1,3422	0,6505	0,0997	2,41420	0,0759047
469	14,46	8,19	0,01745	1,3264	0,6504	0,0963	2,41630	0,074192
470	14,44	8,20	0,01745	1,3103	0,6502	0,0929	2,41840	0,07247
471	14,41	8,22	0,01745	1,2940	0,6498	0,0896	2,42330	0,0708228
472	14,37	8,24	0,01745	1,2775	0,6495	0,0863	2,42820	0,0691665
473	14,34	8,26	0,01745	1,2608	0,6491	0,0830	2,43310	0,0675033
474	14,30	8,27	0,01745	1,2439	0,6487	0,0798	2,43800	0,0658352
475	14,25	8,29	0,01745	1,2267	0,6482	0,0767	2,44465	0,0642101
476	14,21	8,31	0,01745	1,2094	0,6477	0,0736	2,45130	0,0625815
477	14,16	8,33	0,01745	1,1920	0,6472	0,0706	2,45795	0,0609512
478	14,11	8,34	0,01745	1,1743	0,6467	0,0676	2,46460	0,0593212
479	14,05	8,36	0,01745	1,1566	0,6460	0,0647	2,47370	0,0577502
480	13,98	8,38	0,01745	1,1386	0,6453	0,0619	2,47760	0,0560618
481	13,92	8,40	0,01745	1,1206	0,6446	0,0591	2,46980	0,0541261
482	13,85	8,41	0,01745	1,1024	0,6439	0,0564	2,46200	0,0522178
483	13,77	8,43	0,01745	1,0841	0,6430	0,0538	2,45210	0,0502949
484	13,69	8,45	0,01745	1,0656	0,6421	0,0512	2,44220	0,0484046
485	13,60	8,46	0,01745	1,0471	0,6412	0,0487	2,43230	0,0465478
486	13,52	8,48	0,01745	1,0285	0,6403	0,0463	2,42240	0,0447255
487	13,42	8,50	0,01745	1,0098	0,6393	0,0440	2,41070	0,0429064
488	13,33	8,52	0,01745	0,9911	0,6382	0,0417	2,39900	0,0411256
489	13,23	8,53	0,01745	0,9722	0,6372	0,0395	2,38730	0,0393837
490	13,13	8,55	0,01745	0,9533	0,6361	0,0374	2,37560	0,0376813
491	13,02	8,57	0,01745	0,9344	0,6349	0,0353	2,36180	0,0359867
492	12,90	8,59	0,01745	0,9153	0,5713	0,0410	2,12400	0,0310593

(Continuação)								
IVO	IVC						Com	
336	588						Peso	(n _D /n) _m
							de 90%	
Cam Profile							2,0395	1,8296
CAD	Lift (mm)	α	dα	c(α)/c _m	μσ (α)		n _D /n(α)	
493	12,79	8,60	0,01745	0,8963	0,4983	0,0506	1,85260	0,0259739
494	12,67	8,62	0,01745	0,8772	0,4253	0,0651	1,58120	0,0212338
495	12,54	8,64	0,01745	0,8580	0,3412	0,0947	1,26850	0,0162993
496	12,41	8,66	0,01745	0,8389	0,2571	0,1559	0,95580	0,0117386
497	12,27	8,67	0,01745	0,8197	0,1730	0,3213	0,64310	0,0075408
498	12,14	8,69	0,01745	0,8004	0,0889	1,1335	0,33040	0,0036946
499	11,99	8,71	0,01745	0,7812	0,0046	386,5617	0,01605	0,000171
500	11,85	8,73	0,01745	0,7619	0,0959	0,8398	0,33170	0,003361
501	11,70	8,74	0,01745	0,7427	0,1871	0,2042	0,64735	0,0062319
502	11,55	8,76	0,01745	0,7234	0,2784	0,0853	0,96300	0,0087957
503	11,39	8,78	0,01745	0,7041	0,3789	0,0424	1,31075	0,0113426
504	11,23	8,80	0,01745	0,6849	0,4794	0,0244	1,65850	0,0135769
505	11,06	8,81	0,01745	0,6656	0,5799	0,0153	2,00625	0,0155123
506	10,90	8,83	0,01745	0,6463	0,5567	0,0152	1,92600	0,0140421
507	10,72	8,85	0,01745	0,6271	0,4454	0,0217	1,54080	0,0105741
508	10,54	8,87	0,01745	0,6078	0,3340	0,0351	1,15560	0,007451
509	10,36	8,88	0,01745	0,5886	0,2227	0,0718	0,77040	0,0046578
510	10,18	8,90	0,01745	0,5693	0,1113	0,2598	0,38520	0,0021792
511	9,98	8,92	0,01745	0,5501	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
512	9,79	8,94	0,01745	0,5309	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
513	9,59	8,95	0,01745	0,5117	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
514	9,39	8,97	0,01745	0,4926	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
515	9,18	8,99	0,01745	0,4734	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
516	8,97	9,01	0,01745	0,4543	0,0209	3,7467	0,05285	0,0001904
517	8,75	9,02	0,01745	0,4352	0,1478	0,0659	0,37372	0,0012352
518	8,54	9,04	0,01745	0,4161	0,2747	0,0167	0,69460	0,0020987
519	8,32	9,06	0,01745	0,3970	0,4060	0,0066	1,02680	0,0028245
520	8,10	9,08	0,01745	0,3779	0,5374	0,0033	1,35900	0,003388
521	7,88	9,09	0,01745	0,3589	0,5939	0,0023	1,48120	0,00333
522	7,66	9,11	0,01745	0,3399	0,5879	0,0020	1,42840	0,00288
523	7,44	9,13	0,01745	0,3209	0,5819	0,0017	1,37440	0,00247
524	7,21	9,15	0,01745	0,3019	0,5758	0,0014	1,32040	0,0021005
525	6,99	9,16	0,01745	0,2829	0,5616	0,0013	1,25095	0,0017479
526	6,76	9,18	0,01745	0,2640	0,4333	0,0017	0,96520	0,0011741
527	6,54	9,20	0,01745	0,2451	0,3079	0,0027	0,68580	0,0007189
528	6,32	9,22	0,01745	0,2262	0,1825	0,0061	0,40640	0,0003628

(Continuação)								
IVO	IVC						Com Peso de 90%	(n _D /n) _m
336	588	(μσ) _m						
Cam Profile							2,0395	1,8296
CAD	Lift (mm)	α	dα	c(α)/c _m	μσ (α)		n _D /n(α)	
529	6,10	9,23	0,01745	0,2073	0,0570	0,0478	0,12700	9,521E-05
530	5,88	9,25	0,01745	0,1884	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
531	5,67	9,27	0,01745	0,1695	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
532	5,45	9,29	0,01745	0,1506	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
533	5,24	9,30	0,01745	0,1318	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
534	5,02	9,32	0,01745	0,1129	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
535	4,82	9,34	0,01745	0,0941	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
536	4,62	9,35	0,01745	0,0753	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
537	4,42	9,37	0,01745	0,0564	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
538	4,22	9,39	0,01745	0,0376	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
539	4,03	9,41	0,01745	0,0188	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
540	3,85	9,42	0,01745	0,0000	0,0000	#DIV/0!	# 0,00000	0

APÊNDICE J – PLANILHA DE CÁLCULO DO SWIRL MÉDIO DO TESTE 10

Este apêndice apresenta o método de cálculo do *Swirl* médio do teste 10.

A equação solucionada na tabela pode ser descrita da seguinte forma:

$$(c(\alpha))/c_m = \pi/2 (1 + (\lambda \cdot \cos(\alpha)) / \sqrt{(1 - \lambda^2 \cdot \sin^2(\alpha))}) \sin(\alpha)$$

Tabela 15 - Cálculo do *Swirl* médio do teste 10

(Continua)

IVO		IVC						
336	588				$(\mu\sigma)_m$	Com Peso de 90%	$(n_D/n)_m$	
Cam Profile						2,1752	1,9513	
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$		$n_D/n(\alpha)$	
395	6,10	6,89	0,0175	1,1364	0,0565	8,0282	0,14600	0,0032905
396	6,32	6,91	0,0175	1,1617	0,1807	0,8377	0,46720	0,0110048
397	6,54	6,93	0,0175	1,1865	0,3050	0,3134	0,78840	0,019372
398	6,76	6,95	0,0175	1,2107	0,4293	0,1681	1,10960	0,0283891
399	6,99	6,96	0,0175	1,2344	0,5563	0,1061	1,43810	0,0382446
400	7,21	6,98	0,0175	1,2574	0,5716	0,1062	1,47680	0,0407539
401	7,44	7,00	0,0175	1,2799	0,5788	0,1092	1,49480	0,0427362
402	7,66	7,02	0,0175	1,3017	0,5861	0,1121	1,51280	0,0447386
403	7,88	7,03	0,0175	1,3229	0,5932	0,1148	1,53040	0,0467456
404	8,10	7,05	0,0175	1,3435	0,5374	0,1466	1,38600	0,043662
405	8,32	7,07	0,0175	1,3634	0,4060	0,2683	1,04720	0,0339754
406	8,54	7,09	0,0175	1,3827	0,2747	0,6116	0,70840	0,0236383
407	8,75	7,10	0,0175	1,4013	0,1478	2,1994	0,38115	0,0130636
408	8,97	7,12	0,0175	1,4193	0,0209	114,2669	0,05390	0,0018951
409	9,18	7,14	0,0175	1,4366	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
410	9,39	7,16	0,0175	1,4533	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
411	9,59	7,17	0,0175	1,4693	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
412	9,79	7,19	0,0175	1,4845	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
413	9,98	7,21	0,0175	1,4992	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
414	10,18	7,23	0,0175	1,5131	0,1113	4,8764	0,38160	0,0152478
415	10,36	7,24	0,0175	1,5263	0,2227	1,2514	0,76320	0,0310313
416	10,54	7,26	0,0175	1,5388	0,3340	0,5700	1,14480	0,047315
417	10,72	7,28	0,0175	1,5507	0,4454	0,3281	1,52640	0,064062
418	10,90	7,30	0,0175	1,5619	0,5567	0,2145	1,90800	0,0812337
419	11,06	7,31	0,0175	1,5723	0,5799	0,2017	1,98750	0,0857557
420	11,23	7,33	0,0175	1,5821	0,4794	0,3007	1,64300	0,0717746
421	11,39	7,35	0,0175	1,5911	0,3789	0,4898	1,29850	0,0573774

IVO	IVC							
336	588						Com Peso de 90%	$(n_D/n)_m$
Cam Profile							2,1752	1,9513
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$		$n_D/n(\alpha)$	
422	11,55	7,37	0,0175	1,5995	0,2784	0,9217	0,95400	0,0425998
423	11,70	7,38	0,0175	1,6072	0,1871	2,0693	0,64130	0,0289123
424	11,85	7,40	0,0175	1,6142	0,0959	7,9849	0,32860	0,0149437
425	11,99	7,42	0,0175	1,6205	0,0046	3450,5675	0,01590	0,0007287
426	12,14	7,44	0,0175	1,6261	0,0896	9,3448	0,30520	0,0140854
427	12,27	7,45	0,0175	1,6311	0,1744	2,4891	0,59405	0,0275829
428	12,41	7,47	0,0175	1,6353	0,2592	1,1357	0,88290	0,041209
429	12,54	7,49	0,0175	1,6389	0,3441	0,6490	1,17175	0,054931
430	12,67	7,50	0,0175	1,6418	0,4289	0,4199	1,46060	0,0687158
431	12,79	7,52	0,0175	1,6441	0,5025	0,3072	1,71130	0,0807312
432	12,90	7,54	0,0175	1,6457	0,5761	0,2344	1,96200	0,0927375
433	13,02	7,56	0,0175	1,6466	0,6403	0,1901	2,18135	0,1032234
434	13,13	7,57	0,0175	1,6469	0,6415	0,1894	2,19170	0,1037504
435	13,23	7,59	0,0175	1,6466	0,6426	0,1887	2,20048	0,1041224
436	13,33	7,61	0,0175	1,6456	0,6436	0,1878	2,20925	0,1044141
437	13,42	7,63	0,0175	1,6440	0,6447	0,1866	2,21803	0,1046255
438	13,52	7,64	0,0175	1,6418	0,6457	0,1852	2,22680	0,1047572
439	13,60	7,66	0,0175	1,6390	0,6466	0,1838	2,23423	0,1047461
440	13,69	7,68	0,0175	1,6355	0,6475	0,1821	2,24165	0,104657
441	13,77	7,70	0,0175	1,6315	0,6484	0,1803	2,24908	0,1044905
442	13,85	7,71	0,0175	1,6270	0,6493	0,1783	2,25650	0,104248
443	13,92	7,73	0,0175	1,6218	0,6500	0,1762	2,26235	0,1038581
444	13,98	7,75	0,0175	1,6161	0,6507	0,1740	2,26820	0,1033955
445	14,05	7,77	0,0175	1,6099	0,6511	0,1718	2,27315	0,1028212
446	14,11	7,78	0,0175	1,6031	0,6515	0,1694	2,27770	0,1021603
447	14,16	7,80	0,0175	1,5958	0,6517	0,1670	2,28103	0,1013783
448	14,21	7,82	0,0175	1,5879	0,6520	0,1644	2,28435	0,1005329
449	14,25	7,84	0,0175	1,5796	0,6522	0,1617	2,28768	0,0996261
450	14,30	7,85	0,0175	1,5708	0,6525	0,1589	2,29100	0,0986602
451	14,34	7,87	0,0175	1,5615	0,6527	0,1560	2,29345	0,0976003
452	14,37	7,89	0,0175	1,5517	0,6529	0,1530	2,29590	0,0964867
453	14,41	7,91	0,0175	1,5415	0,6530	0,1499	2,29835	0,095322
454	14,44	7,92	0,0175	1,5309	0,6532	0,1467	2,30080	0,0941086
455	14,46	7,94	0,0175	1,5198	0,6533	0,1435	2,30185	0,0927926
456	14,47	7,96	0,0175	1,5083	0,6534	0,1403	2,30290	0,0914346
457	14,49	7,98	0,0175	1,4964	0,6535	0,1369	2,30395	0,0900373
458	14,50	7,99	0,0175	1,4841	0,6536	0,1336	2,30500	0,0886032

IVO	IVC							
336	588						Com Peso de 90%	$(n_D/n)_m$
Cam Profile							2,1752	1,9513
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$		$n_D/n(\alpha)$	
459	14,50	8,01	0,0175	1,4714	0,6536	0,1302	2,30500	0,0870952
460	14,50	8,03	0,0175	1,4583	0,6536	0,1267	2,30500	0,0855571
461	14,50	8,05	0,0175	1,4449	0,6536	0,1233	2,30500	0,0839914
462	14,50	8,06	0,0175	1,4312	0,6536	0,1198	2,30500	0,0824007
463	14,50	8,08	0,0175	1,4171	0,6536	0,1163	2,30500	0,0807876
464	14,50	8,10	0,0175	1,4027	0,6536	0,1128	2,30500	0,0791545
465	14,50	8,12	0,0175	1,3880	0,6536	0,1093	2,30500	0,0775039
466	14,50	8,13	0,0175	1,3730	0,6536	0,1058	2,30500	0,0758383
467	14,49	8,15	0,0175	1,3577	0,6535	0,1023	2,30395	0,0741262
468	14,47	8,17	0,0175	1,3422	0,6534	0,0988	2,30290	0,0724053
469	14,46	8,19	0,0175	1,3264	0,6533	0,0954	2,30185	0,0706778
470	14,44	8,20	0,0175	1,3103	0,6532	0,0920	2,30080	0,068946
471	14,41	8,22	0,0175	1,2940	0,6530	0,0887	2,29835	0,067171
472	14,37	8,24	0,0175	1,2775	0,6529	0,0854	2,29590	0,065398
473	14,34	8,26	0,0175	1,2608	0,6527	0,0821	2,29345	0,0636289
474	14,30	8,27	0,0175	1,2439	0,6525	0,0789	2,29100	0,0618656
475	14,25	8,29	0,0175	1,2267	0,6522	0,0757	2,28768	0,0600871
476	14,21	8,31	0,0175	1,2094	0,6520	0,0726	2,28435	0,0583193
477	14,16	8,33	0,0175	1,1920	0,6517	0,0696	2,28103	0,0565639
478	14,11	8,34	0,0175	1,1743	0,6515	0,0666	2,27770	0,0548226
479	14,05	8,36	0,0175	1,1566	0,6511	0,0637	2,27315	0,0530682
480	13,98	8,38	0,0175	1,1386	0,6507	0,0609	2,26820	0,0513236
481	13,92	8,40	0,0175	1,1206	0,6500	0,0581	2,26235	0,0495798
482	13,85	8,41	0,0175	1,1024	0,6493	0,0555	2,25650	0,0478593
483	13,77	8,43	0,0175	1,0841	0,6484	0,0529	2,24908	0,0461307
484	13,69	8,45	0,0175	1,0656	0,6475	0,0504	2,24165	0,0444297
485	13,60	8,46	0,0175	1,0471	0,6466	0,0479	2,23423	0,0427572
486	13,52	8,48	0,0175	1,0285	0,6457	0,0455	2,22680	0,0411141
487	13,42	8,50	0,0175	1,0098	0,6447	0,0432	2,21803	0,0394771
488	13,33	8,52	0,0175	0,9911	0,6436	0,0410	2,20925	0,0378727
489	13,23	8,53	0,0175	0,9722	0,6426	0,0388	2,20048	0,0363016
490	13,13	8,55	0,0175	0,9533	0,6415	0,0367	2,19170	0,0347643
491	13,02	8,57	0,0175	0,9344	0,6403	0,0347	2,18135	0,0332372
492	12,90	8,59	0,0175	0,9153	0,5761	0,0403	1,96200	0,0286904
493	12,79	8,60	0,0175	0,8963	0,5025	0,0498	1,71130	0,0239929
494	12,67	8,62	0,0175	0,8772	0,4289	0,0640	1,46060	0,0196143
495	12,54	8,64	0,0175	0,8580	0,3441	0,0931	1,17175	0,0150561

IVO		IVC					Com Peso	
336	588				$(\mu\sigma)_m$		de 90%	$(n_D/n)_m$
Cam Profile							2,1752	1,9513
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$		$n_D/n(\alpha)$	
496	12,41	8,66	0,0175	0,8389	0,2592	0,1533	0,88290	0,0108433
497	12,27	8,67	0,0175	0,8197	0,1744	0,3159	0,59405	0,0069657
498	12,14	8,69	0,0175	0,8004	0,0896	1,1145	0,30520	0,0034128
499	11,99	8,71	0,0175	0,7812	0,0046	386,5617	0,01590	0,0001694
500	11,85	8,73	0,0175	0,7619	0,0959	0,8398	0,32860	0,0033296
501	11,70	8,74	0,0175	0,7427	0,1871	0,2042	0,64130	0,0061736
502	11,55	8,76	0,0175	0,7234	0,2784	0,0853	0,95400	0,0087135
503	11,39	8,78	0,0175	0,7041	0,3789	0,0424	1,29850	0,0112366
504	11,23	8,80	0,0175	0,6849	0,4794	0,0244	1,64300	0,01345
505	11,06	8,81	0,0175	0,6656	0,5799	0,0153	1,98750	0,0153673
506	10,90	8,83	0,0175	0,6463	0,5567	0,0152	1,90800	0,0139108
507	10,72	8,85	0,0175	0,6271	0,4454	0,0217	1,52640	0,0104752
508	10,54	8,87	0,0175	0,6078	0,3340	0,0351	1,14480	0,0073814
509	10,36	8,88	0,0175	0,5886	0,2227	0,0718	0,76320	0,0046143
510	10,18	8,90	0,0175	0,5693	0,1113	0,2598	0,38160	0,0021588
511	9,98	8,92	0,0175	0,5501	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
512	9,79	8,94	0,0175	0,5309	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
513	9,59	8,95	0,0175	0,5117	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
514	9,39	8,97	0,0175	0,4926	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
515	9,18	8,99	0,0175	0,4734	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
516	8,97	9,01	0,0175	0,4543	0,0209	3,7467	0,05390	0,0001941
517	8,75	9,02	0,0175	0,4352	0,1478	0,0659	0,38115	0,0012598
518	8,54	9,04	0,0175	0,4161	0,2747	0,0167	0,70840	0,0021404
519	8,32	9,06	0,0175	0,3970	0,4060	0,0066	1,04720	0,0028806
520	8,10	9,08	0,0175	0,3779	0,5374	0,0033	1,38600	0,0034553
521	7,88	9,09	0,0175	0,3589	0,5932	0,0023	1,53040	0,0034407
522	7,66	9,11	0,0175	0,3399	0,5861	0,0020	1,51280	0,0030502
523	7,44	9,13	0,0175	0,3209	0,5788	0,0017	1,49480	0,0026864
524	7,21	9,15	0,0175	0,3019	0,5716	0,0015	1,47680	0,0023493
525	6,99	9,16	0,0175	0,2829	0,5563	0,0013	1,43810	0,0020094
526	6,76	9,18	0,0175	0,2640	0,4293	0,0017	1,10960	0,0013497
527	6,54	9,20	0,0175	0,2451	0,3050	0,0028	0,78840	0,0008264
528	6,32	9,22	0,0175	0,2262	0,1807	0,0062	0,46720	0,000417
529	6,10	9,23	0,0175	0,2073	0,0565	0,0487	0,14600	0,0001095
530	5,88	9,25	0,0175	0,1884	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
531	5,67	9,27	0,0175	0,1695	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0
532	5,45	9,29	0,0175	0,1506	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0

IVO		IVC							
336	588			$(\mu\sigma)_m$		Com Peso de 90%		$(n_D/n)_m$	
Cam Profile						2,1752		1,9513	
CAD	Lift (mm)	α	$d\alpha$	$c(\alpha)/c_m$	$\mu\sigma(\alpha)$	$n_D/n(\alpha)$			
533	5,24	9,30	0,0175	0,1318	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
534	5,02	9,32	0,0175	0,1129	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
535	4,82	9,34	0,0175	0,0941	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
536	4,62	9,35	0,0175	0,0753	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
537	4,42	9,37	0,0175	0,0564	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
538	4,22	9,39	0,0175	0,0376	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
539	4,03	9,41	0,0175	0,0188	0,0000	#DIV/0!	0,00000	0	
540	3,85	9,42	0,0175	0,0000	0,0000	#DIV/0!	#	0,00000	0

Fonte: Autor (2016)