GUSTAVO FERNANDES MARTIOLI

**Medição do número de *swirl* utilizando dutos de admissão do cabeçote
de um motor diesel produzidos via prototipagem rápida**

São Paulo

2017

GUSTAVO FERNANDES MARTIOLI

**Medição do número de *swirl* utilizando dutos de admissão do cabeçote
de um motor diesel produzidos via prototipagem rápida**

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

São Paulo

2017

GUSTAVO FERNANDES MARTIOLI

**Medição do número de *swirl* utilizando dutos de admissão do cabeçote
de um motor diesel produzidos via prototipagem rápida**

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

2017

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, 05 de Maio de 2017

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Catálogo-na-publicação

Martoli, Gustavo Fernandes

Medição do número de swirl utilizando dutos de admissão do cabeçote de um motor diesel produzidos via prototipagem rápida / G. F. Martoli -- versão corr. -- São Paulo, 2017.

121 p.

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

1.Motor diesel 2.Fluxo de ar 3.Dutos de admissão 4.Número de swirl
5.Prototipagem rápida I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Centro de Engenharia Automotiva II.t.

Dedico este trabalho à minha amada esposa Rafaella e família.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Marcelo Massarani pelas sábias palavras e aprendizado nessa etapa. Aos engenheiros da Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia (FDTE), Yuri e Eduardo, pelo auxílio no projeto.

A minha família: meus pais Alexandre e Nelci pelo apoio incondicional nos meus estudos e exemplo de vida. Ao meu irmão Diogo pela parceria e amizade.

Aos meus amigos Felipe e Bruno pela ajuda com as ferramentas CAD. Mauricio Torrão e toda liderança da empresa, pelo apoio financeiro, disponibilidade de recursos e horas que foram essenciais para a execução do presente trabalho.

Ao pesquisador Tiago Cousseau do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) da EPUSP por disponibilizar o laboratório e auxiliar com as medições de rugosidade do cabeçote e dos dutos de admissão protótipos.

Para todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para a elaboração deste trabalho.

O ignorante afirma, o sábio duvida, o sensato
reflete.

Aristóteles

RESUMO

O presente trabalho propõe a execução de ensaios de medição do número de *swirl* em bancada de fluxo em regime permanente, com a utilização de um dispositivo modular e dutos de admissão do cabeçote de um motor diesel produzidos via prototipagem rápida (PR). A medição do número de *swirl* com dutos produzidos via PR, traz como principais vantagens: reprodutibilidade dos ensaios, facilidade de simular e mensurar o número de *swirl* dos potenciais desvios no processo de fundição ou usinagem, além da redução no tempo para o desenvolvimento de novas geometrias dos dutos de admissão. O trabalho é experimental e uma unidade do cabeçote estudado foi encaminhado para o laboratório da EPUSP e o número de *swirl* medido para posterior comparação dos dados. Após a fase inicial de aquisição de dados e ajustes no projeto do dispositivo, essa unidade do cabeçote foi seccionada e digitalizada para que a geometria interna fosse reproduzida via prototipagem rápida. Os dutos de admissão foram montados no dispositivo modular para a realização dos testes em bancada. Todos os testes foram realizados no mesmo equipamento e com o mesmo sistema de controle, com o intuito de reduzir o número de variáveis externas na aquisição de dados. Quando realizou-se a comparação das médias dos resultados do número de *swirl* do cabeçote e do dispositivo modular com o uso de prototipagem rápida não foram encontradas diferenças estatisticamente significantes. O método proposto representou o escoamento de ar da admissão do modelo de cabeçote analisado.

Palavras-Chave: Motor diesel. Fluxo de ar. Dutos de admissão. Número de *Swirl*. Prototipagem rápida.

ABSTRACT

The present work proposes to execute steady state bench test, swirl number measurements, using a modular device and cylinder head intake ports from a diesel engine manufactured via rapid prototype (RP) techniques. Swirl number measurements with intake ports produced by RP, bring as main advantages: Tests reproducibility, easy to measure the swirl number variances in consequence of potential casting or machining process deviations besides of time reduction to the development of new intake ports geometry. The research is experimental and one sample of the investigated cylinder head was sent to the laboratory and the swirl number was measured for later results comparison. After the early development phase of data acquisition and design improvements, this cylinder head sample was then sectioned and digitalized as to know to have the same internal geometry in the intake ports produced via rapid prototype. The intake ports were assembled in the modular device to perform bench tests. All tests were performed in the same rig and with the same control system with aiming to reduce the external variables during data acquisition. When the mean results analysis was performed in order to compare the results between cylinder head and modular device using rapid prototype, no statistically significant changes were found. The proposed method represented the investigated cylinder head's intake air flow.

Keywords: Diesel engine. Air flow. Intake ports. Swirl number. Rapid prototype.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Emissões globais de CO ₂ por combustão.	18
Figura 2 - Movimentos <i>swirl</i> e <i>tumble</i>	19
Figura 3 - Movimentos <i>squish</i>	19
Figura 4 - Representação esquemática da bancada de fluxo.	26
Figura 5 - Limites para escoamento turbulento em dutos de admissão de motores de combustão interna.	27
Figura 6 - Conceito do medidor de <i>swirl</i> em regime permanente.	28
Figura 7 - Cabeçote usinado para a simulação de desvios	32
Figura 8 - Dispositivo usinado para a simulação de desvios.	33
Figura 9 - Coletor de admissão fórmula SAE.	36
Figura 10 - Resultados com a integração de PR no desenvolvimento de produto.	37
Figura 11 - Cabeçote modelo A com o orientador de fluxo (item verde) e a orientação dos eixos.	39
Figura 12 - Tubo de corrente	40
Figura 13 - Transporte do fluido	42
Figura 14 - Fluxograma do projeto.	44
Figura 15 - Medidor Cussons P7300.	47
Figura 16 - Cabeçote modelo A montado no medidor de swirl do laboratório.	48
Figura 17 - Abertura de válvula x torque nos ensaios da unidade XY do cabeçote modelo A no 1º dia.	49
Figura 18 - Abertura de válvula x torque nos ensaios da unidade XY do cabeçote modelo A no 2º dia.	50
Figura 19 - Abertura de válvula x torque nos ensaios da unidade XY do cabeçote modelo A no 3º dia.	50
Figura 20 - Abertura de válvula x torque nos ensaios da unidade XY do cabeçote modelo A no 4º dia.	51

Figura 21 - Volume interno dos dutos de admissão.	54
Figura 22 - Volume da geometria interna utilizado como ferramenta de remoção de material no CAD.	55
Figura 23 - Exemplo de deslocamentos possíveis no duto de admissão.	55
Figura 24 - Vista explodida da versão I do dispositivo modular.	57
Figura 25 - Versão I do dispositivo modular x cabeçote modelo A.	58
Figura 26 - Protótipo da versão I do dispositivo montado no cilindro de ensaio.	58
Figura 27 - Furos de localização na face inferior do cabeçote modelo A.	60
Figura 28 - Melhorias implementadas na versão II do dispositivo modular	61
Figura 29 - Dutos com silicone utilizados no experimento B.	62
Figura 30 - Junta líquida para vedação aplicada na parte externa dos dutos.	63
Figura 31 - Dutos utilizados nos experimentos C e E, respectivamente.	63
Figura 32 - Dutos utilizados nos experimentos A, C e E seccionados.	64
Figura 33 - Medição da rugosidade nos dutos de PR.	65
Figura 34 - Equipamento utilizado para medição da rugosidade.	66
Figura 35 - Região mensurada destacada em vermelho.	66
Figura 36 - Topografia vista de topo (esquerda) e vista 3D (direita) do cabeçote modelo A.	67
Figura 37 - Versão II do dispositivo modular montado no medidor de <i>swirl</i>	68
Figura 38 - Abertura de válvula x torque nos ensaios do experimento A.	68
Figura 39 - Abertura de válvula x torque nos ensaios do experimento B.	68
Figura 40 - Abertura de válvula x torque nos ensaios do experimento C.	70
Figura 41 - Abertura de válvula x torque nos ensaios do experimento D.	70
Figura 42 - Abertura de válvula x torque nos ensaios do experimento E.	71

Figura 43 - Melhorias implementadas na versão III do dispositivo modular.	74
Figura 44 - Percentual de compressão recomendável pelo ISO3601 e secção dos dutos montados com anéis <i>O'ring</i>	75
Figura 45 - Pontos de referência para a digitalização: antes e após o corte do cabeçote.	78
Figura 46 - Processo de digitalização.	78
Figura 47 - Alinhamento da malha de pontos no modelo geométrico do cabeçote modelo A.	79
Figura 48 - Malha de pontos x modelo geométrico na região do duto reto.	80
Figura 49 - Malha de pontos x modelo geométrico na região do duto curvo.	81
Figura 50 - Malha de pontos x volume fechado no CAD.	82
Figura 51 - Impressora 3D Systems Project 360.	82
Figura 52 - Pós tratamento da PR	84
Figura 53 - Dutos de PR utilizados na validação.	85
Figura 54 - Sequência de montagem.	87
Figura 55 - Abertura de válvula x torque nos ensaios da PR da unidade XY do cabeçote no 1º dia.	88
Figura 56 - Abertura de válvula x torque nos ensaios da PR da unidade XY do cabeçote no 2º dia.	88
Figura 57 - Abertura de válvula x torque nos ensaios da PR da unidade XY do cabeçote no 3º dia.	89
Figura 58 - Torque x abertura de válvula (Cabeçote x PR).	92
Figura 59 - Torque x abertura de válvula (média dos ensaios da unidade XY do cabeçote modelo A).	93
Figura 60 - Torque x abertura de válvula (média dos ensaios da PR da unidade XY do cabeçote)	93
Figura 61 - Torque x abertura de válvula (média global dos ensaios). . .	94
Figura 62 - Evolução do projeto.	96
Figura 63 - Dispositivo usinado x dispositivo modular com o uso de PR. .	97
Figura 64 - Pino guia, guias de válvula e vedação da haste da válvula . .	108

Figura 65 - Cabeçote modelo A (esquerda) e dispositivo modular (direita) montados no cilindro de ensaio.	108
Figura 66 - Disposição dos pinos guia do cilindro de ensaio.	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Dados do motor.	38
Tabela 2	- Resultados da unidade XY do cabeçote modelo A.	52
Tabela 3	- Rugosidade média encontrada nos dutos de PR (em μm). .	65
Tabela 4	- Valores de Ra para o processo de fundição.	67
Tabela 5	- Resultados dos experimentos A, B, C, D e E (número de <i>swirl</i>).	72
Tabela 6	- Resultados dos experimentos A, B, C, D e E (μ_{σ_m}).	72
Tabela 7	- Resultados da PR da unidade XY do cabeçote modelo A (número de <i>swirl</i>).	90
Tabela 8	- Resultados da PR da unidade XY do cabeçote modelo A (μ_{σ_m}).	91
Tabela 9	- Resumo dos resultados.	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3DP	3 Dimensional Printing
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CFD	Computer Fluid Dynamics
DMP	Direct Metal Printing
DOE	Design of Experiment
EGR	Exhaust Gas Recirculation
EPA	Environmental Protection Agency
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
FDM	Fused Deposition Modeling
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IEA	International Energy Agency
IGES	Initial Graphic Exchange Specifications
IJP	Ink Jet Printing
LENS	Laser Engineering Net Shaping
LFS	Laboratório de Fenômenos de Superfície
LOM	Laminated Object Manufacturing
PHR	Plano Horizontal de Referência
PIV	Particle Image Velocimetry
PLP	Paper Lamination Technology
PR	Prototipagem rápida
SCR	Selective Catalytic Reduction
SLS	Selective Laser Sintering
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
STL	StereoLithography

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Ângulo da manivela	[rad]
$c(\alpha)$	Velocidade instantânea do pistão	[rpm]
c_m	Velocidade média do pistão	[rpm]
Δ_p	Diferença de pressão dentro do cilindro de ensaio, definida previamente	[mmH ₂ O]
ϕ	Ângulo da circunferência	[rad]
μ_σ	Coeficiente de fluxo	-
μ_{σ_m}	Coeficiente de escoamento médio	-
Ω	Velocidade angular	[rad/s]
Ω_s	Velocidade angular equivalente	[rad/s]
Ω_v	Velocidade rotacional do virabrequim	[rad/s]
ρ_1	Densidade do ar fora da bancada de ensaio	[kg/m ³]
ρ	Densidade do ar no cilindro	[kg/m ³]
ρ_m	Densidade média nos dutos de admissão	[kg/m ³]
σ	Desvio padrão	-
λ	Relação manivela/biela	-
$Z_{\alpha/2}$	Valor crítico que corresponde ao grau de confiança desejado	-
γ	Peso específico do fluido	[N/m ³]
A	Área do diâmetro de assento interno da válvula de admissão	[m ²]
B	Diâmetro do cilindro	[m]
C_s	Coeficiente de <i>swirl</i>	-
D	Diâmetro interno do assento da válvula de admissão	[m]
e_0	Semi-amplitude do intervalo de confiança	-
E_c	Energia cinética	[J]
E_{pr}	Energia de pressão	[J]
E_p	Energia potencial	[J]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
G	Peso	[N]
H	Carga total na secção	[m]
$H_{p1,2}$	Perda de carga	[m]
K	Constante adiabática do ar	-
L	Comprimento da biela	[m]
m	Massa	[kg]
M	Torque	[N.m]
n	Quantidade de válvulas de admissão	-
N_s	Número de <i>swirl</i>	-
P_0	Pressão atmosférica, fora da bancada de ensaio, medida durante o teste	[N/m ²]
P_1	Pressão do fluido	[N/m ²]
P_2	Pressão do fluido	[N/m ²]

q	Vazão mássica, medida durante o teste	[kg/s]
q_{teo}	Vazão téorica ideal	[kg/s]
R	Constante universal dos gases	[J/mol.K]
R_s	Razão de <i>swirl</i>	-
S	Curso do pistão	[m]
T_1	Temperatura, fora da bancada de ensaio, medida durante o teste	[K]
u	Velocidade axial	[m/s]
v	Velocidade tangencial	[m/s]
V_0	Velocidade característica	[m/s]
V_1	Velocidade do fluido	[m/s]
V_2	Velocidade do fluido	[m/s]
V_{ol}	Volume	[m^3]
z_1	Cota entre o PHR e o centro de gravidade da partícula	[m]
z_2	Cota entre o PHR e o centro de gravidade da partícula	[m]

SUMÁRIO

1	- INTRODUÇÃO.....	18
1.1	- Objetivo.....	23
2	- MEDIÇÃO E ANÁLISE DO SWIRL EM REGIME PERMANENTE	25
2.1	- Bancada de fluxo em regime permanente.....	25
2.2	- Cálculo do <i>swirl</i>	27
2.3	- Cálculo do μ_{σ}	30
3	- PROTOTIPAGEM RÁPIDA.....	32
3.1	- Motivação.....	32
3.2	- Aplicações, processos e benefícios.....	33
4	- ORGANIZAÇÃO DO PROJETO.....	38
4.1	- Demandas do projeto.....	38
4.2	- Pontos de atenção.....	39
4.3	- Etapas de desenvolvimento.....	43
4.3.1	- Planejamento.....	45
5	- AQUISIÇÃO DE DADOS DO CABEÇOTE.....	47
5.1	- Procedimentos dos ensaios de bancada.....	47
5.2	- Testes físicos com o cabeçote.....	49
6	- VERSÃO I DO DISPOSITIVO.....	54
6.1	- Projeto.....	54
6.2	- Testes físicos da versão I.....	58
6.3	- Análise dos resultados da versão I.....	59
6.4	- Oportunidades de melhoria da versão I.....	59
7	- VERSÃO II DO DISPOSITIVO.....	61

7.1	- Projeto	61
7.2	- Testes físicos da versão II	62
7.3	- Medição da rugosidade	64
7.4	- Análise dos resultados da versão II	68
7.5	- Oportunidades de melhoria da versão II.	73
8	- VERSÃO III DO DISPOSITIVO.	74
8.1	- Projeto	74
8.2	- Testes físicos da versão III	76
9	- VALIDAÇÃO.	77
9.1	- Digitalização da unidade XY do cabeçote modelo A	77
9.2	- Procedimento de fabricação dos dutos de PR	82
9.3	- Ensaios realizados com a PR da unidade XY do cabeçote modelo A	84
9.4	- Análise dos resultados	92
10	- DISCUSSÃO.	96
11	- CONCLUSÕES	99
12	- SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS.	101
	REFERÊNCIAS	103
	APÊNDICE A – Dimensões importantes na construção de um dispositivo modular para ensaios de medição do número de <i>swirl</i> com o uso de PR.	107
	APÊNDICE B – Desenhos do dispositivo.	109

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a IEA (*International Energy Agency*, 2016), em 2014, o setor de transportes foi responsável por 23% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) por combustão no mundo, conforme apresentado no figura 1.

Figura 1 - Emissões globais de CO₂ por combustão

Fonte: IEA (2016 – adaptado)

Os veículos comerciais continuam utilizando principalmente os motores de combustão interna para produzir a energia motriz necessária ao seu deslocamento. A indústria automotiva, tem como desafio diminuir a emissão de poluentes na atmosfera (DE STEFANO; MONTES-SANCHO; BUSCH, 2016).

Reitz (2013), afirma que associado com o uso em massa de combustível fóssil, está a emissão de poluentes atmosféricos, incluindo monóxido de nitrogênio (NO_x), e particulados (PM), assim como a produção de CO₂.

Com o intuito de minimizar as consequências do aquecimento global e emissões de poluentes na atmosfera, vários países tem implementado legislações rigorosas, com restrições nas emissões de poluentes em veículos terrestres. No Brasil, os limites são definidos pelo IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), nos Estados Unidos as emissões são definidas pelo EPA (*Environmental Protection Agency*) e na União Europeia, uma série de diretivas regem os níveis de emissões permitidos.

Para otimizar o processo de combustão e a formação de gases poluentes, é necessário compreender todos os fenômenos físicos envolvidos em um motor de combustão interna.

É importante existir uma movimentação do ar, combustível, e gases de exaustão na câmara de combustão para acelerar a evaporação do combustível, permitir a mistura ar-combustível e aumentar a velocidade da combustão e a sua eficiência (PULKRABEK, 1997).

Segundo Brunetti (2012), os padrões de escoamento no interior do cilindro, figuras 2 e 3, podem ser definidos:

Swirl – movimento de corpo rígido do fluxo, ordenado, caracterizado por uma rotação ao longo do eixo do cilindro.

Tumble – similar ao *swirl*, porém com rotação perpendicular ao eixo do cilindro.

Squish – jato provocado pelo esmagamento da mistura ou ar no fim da compressão.

Figura 2 - Movimentos *swirl* e *tumble*

Fonte: Brunetti (2012)

Figura 3 - Movimentos *squish*

Fonte: Heywood (1988)

Os gases poluentes são formados durante o processo de combustão e, segundo Söder (2015), melhorar o processo de combustão em motores ciclo Diesel é de suma importância para reduzir o consumo de combustível e emissões.

A compreensão do *swirl* no processo de combustão pode levar a um melhor compromisso entre as emissões dos gases de exaustão (particulados, NO_x, HC e CO) e o consumo de combustível (VANHAELST; CZAJKA, 2015).

A definição adequada do número de *swirl* em motores ciclo Diesel é importante para manter as metas de emissões e de consumo do motor, conforme as especificações de projeto, pois influencia na evaporação do combustível e no processo de mistura combustível-ar (BRUNETTI, 2012).

De acordo com Ferguson e Kirkpatrick (2001), o *swirl* é uma das principais formas de garantir uma mistura rápida entre combustível e ar em motores diesel de injeção direta.

Segundo Brunetti (2012), o movimento de *swirl* é amplamente utilizado em motores diesel. Ainda, segundo o mesmo autor: “O projeto das câmaras de combustão deve considerar o compromisso de redução do atraso de ignição sem elevar demasiadamente as temperaturas atingidas nas fases iniciais da combustão de pré-mistura, na qual é formada grande parte dos óxidos de nitrogênio (NO_x) do ciclo Diesel.” (2012, pag. 428)

O projeto adequado do processo de mistura combustível-ar é um compromisso de muitas demandas conflitantes. Alto *swirl* dificulta a eficiência volumétrica e aumenta as perdas de calor por convecção. O aumento da pressão da injeção do combustível por sua vez, requer um sistema de injeção mais caro (FERGUSON; KIRKPATRICK, 2001).

Para as medições do número de *swirl* efetuadas no presente trabalho, é usado o cabeçote de um motor diesel para veículos comerciais.

Convém mencionar que existem motores diesel projetados sem *swirl*, são denominados quiescentes, e utilizam um sistema de alta pressão de injeção do combustível para provocar a mistura adequada combustível-ar, ao invés de contar com o movimento prévio do ar.

Diversos fatores podem contribuir para a variação da turbulência dentro da câmara de combustão, dentre eles destacam-se (HEYWOOD, 1988):

- Válvulas de admissão.
- Assento das válvulas de admissão.
- Geometria dos dutos de admissão de ar.

Além de dimensionar adequadamente o número de *swirl* na etapa do projeto, é necessário levar em consideração as possíveis variações que podem ocorrer no processo de fabricação do cabeçote.

Apesar do grande volume de publicações sobre motores de combustão interna, a influência da variação do processo sobre o fluxo tem sido pouco estudada. (CASTILLA; FERNÁNDEZ; MONTANERO, 2016).

O cabeçote analisado no presente trabalho é fabricado através do processo de fundição. Segundo Swift e Booker (2003), pode-se citar como limitações decorrentes do processo de fundição:

- Deformação da geometria durante o processo de resfriamento, especialmente quando uma dimensão é bem maior do que a outra (variação da espessura).
- Alta porosidade.
- Não é apropriado para tolerâncias apertadas sem processamento secundário (usinagem, por exemplo).
- Rugosidade da superfície em função dos materiais utilizados na preparação do molde, variando de 3,2 – 50 $\mu\text{m Ra}$.

De acordo com Lu et. al. (2014), os quatro principais problemas que notavelmente influenciam o escoamento nos dutos de admissão em consequência da fundição ou usinagem:

- 1- Inclinação: a posição original do duto de admissão é alterada devido à movimentação do macho de areia ou de problemas com a fixação do cabeçote.
- 2- Excentricidade: desvio entre o eixo de saída do duto de admissão e o eixo da sede de válvula, que é o mais provável de ocorrer durante o processo de fabricação.
- 3- *Swelling*: este fenômeno normalmente acontece durante o processo de fabricação do macho de areia. A superfície de divisão do molde pode ser

preenchida com alguma areia, o que forma uma folga entre as linhas de divisão. Essas folgas conduzem a uma variação da espessura da peça ao longo da linha de divisão.

- 4- Deformação: a geometria final do duto de admissão é desviada da forma projetada. Este fenômeno é causado, principalmente, pela contração anormal durante o processo de resfriamento do metal fundido.

Em Lu et. al. (2014), observa-se as variações do número de *swirl* em função dos desvios de manufatura, inicialmente foram realizados testes com o uso de um dispositivo usinado para mensurar os impactos de cada desvio de forma e/ou posição. Posteriormente os dados adquiridos serviram de base para validação e extrapolação dos desvios de manufatura em simulações virtuais.

Kawaguchi; Aiba e Takada (2009), demonstra através de simulações que é possível desenvolver dutos de admissão onde o número de *swirl* é menos sensível as variações do processo de fabricação.

Com o uso do dispositivo proposto no presente trabalho é possível mensurar o impacto dos desvios do processo de fabricação no número de *swirl* especificado.

A prototipagem rápida (PR) é um processo de fabricação baseado na adição de camadas planas sucessivas de material, que pode estar inicialmente na forma líquida, sólida ou em pó. (VOLPATO et al., 2007).

A principal vantagem do uso da PR para a fabricação dos dutos é a sua agilidade, controle das geometrias e variáveis envolvidas nos testes funcionais. Em aproximadamente 24 horas é possível obter um novo conjunto de dutos para análise na bancada de fluxo.

Como fruto do presente trabalho, é possível correlacionar e validar os resultados de simulações virtuais para novas geometrias dos dutos de admissão, simular e verificar o impacto de desvios de produção, ou seja, a ferramenta pode ser utilizada no produto atual e em novos desenvolvimentos de cabeçotes.

O estudo é orientado pela seguinte problemática de pesquisa: Como mensurar a influência da geometria dos dutos de admissão de ar no escoamento de ar dentro da câmara de combustão com o uso de dispositivos gerados via PR?

1.1 Objetivo

O objetivo desse trabalho é criar e validar um método que permita simular defeitos e analisar novas geometrias dos dutos de admissão, sem a fabricação de um cabeçote protótipo completo, ou seja, desenvolver um dispositivo capaz de mensurar o efeito da geometria dos dutos de admissão do cabeçote, no número de *swirl*, por meio de testes físicos.

Para a validação dos dados é realizado um comparativo entre o resultados dos dutos produzidos via PR com os dados físicos de um cabeçote normal de produção.

A medição do número de *swirl* com dutos produzidos via PR, traz como principais vantagens: reprodutibilidade dos ensaios, facilidade de simular e mensurar o número de *swirl* dos potenciais desvios no processo de fundição ou usinagem, além da redução no tempo para o desenvolvimento de novas geometrias dos dutos de admissão. Para reproduzir as geometrias analisadas em bancadas de fluxo em regime permanente, basta possuir o modelo geométrico (CAD) dos dutos de admissão testados e construí-los.

O cabeçote utilizado no presente estudo, por questões de confidencialidade, utiliza uma descrição genérica: cabeçote modelo A. Na seção 4.1 a sua aplicação é detalhada.

Quanto as atividades específicas:

- Construir um dispositivo modular, que permita de forma simples e rápida a troca dos dutos de admissão para novas avaliações em bancada no número de *swirl*.
- Fabricar dutos de admissão com técnicas de PR, e que o mesmo possibilite verificações de desvios de forma, posição e usinagem.
- Comparar o número de *swirl* do cabeçote modelo A com o dispositivo modular.
- Detalhar a construção de um dispositivo que permita a elaboração de ensaios para a medição do número de *swirl*, utilizando dutos de admissão de ar do cabeçote construídos via PR.

Para que o leitor possa se familiarizar com o trabalho, a estrutura da dissertação é descrita nesta seção.

O capítulo 2 descreve a bancada de fluxo em regime permanente e apresenta as equações para o cálculo do *swirl*.

No capítulo 3 a motivação do trabalho e as vantagens da utilização da PR no desenvolvimento de novos produtos são descritas.

A organização do projeto é detalhada no capítulo 4. No capítulo 5 são adquiridos dados em bancada de uma unidade do cabeçote para posterior comparação com os resultados obtidos com o uso do dispositivo modular proposto no trabalho.

As versões I, II e III do dispositivos são detalhadas respectivamente nos capítulos 6, 7 e 8.

O método de ensaio proposto com o uso de dutos produzidos via PR é validado no capítulo 9, onde são comparados os resultados da versão III do dispositivo com os dados obtidos com uma unidade do cabeçote completo.

No capítulo 10, uma discussão entre o método proposto com vantagens, desvantagens com relação a outros trabalhos que investigaram o impacto dos desvios de manufatura no número de *swirl*.

No capítulo 11 tem-se a conclusão e sugestões para próximos trabalhos. Ainda nesse capítulo, pode-se encontrar as limitações e o ponto crítico de desenvolvimento do método proposto.

2 MEDIÇÃO E ANÁLISE DO *SWIRL* EM REGIME PERMANENTE

2.1 Bancada de fluxo em regime permanente

Segundo Heywood (1988), a bancada de fluxo é o equipamento que adequadamente descreve as características do *swirl* nos dutos de admissão e válvula (em uma abertura fixa), sendo utilizada extensivamente com esse propósito.

A análise do escoamento do ar na admissão em regime permanente é uma etapa importante no desenvolvimento de motores para compreender a capacidade volumétrica do motor e as propriedades do fluxo de ar dentro da câmara de combustão (PITCHER et al., 2010).

Um exemplo é a otimização do coeficiente de descarga que é tipicamente realizado em uma bancada de fluxo em regime permanente (FERGUSON; KIRKPATRICK, 2001).

O presente estudo aborda o método que foi originalmente proposta por Tippelmann (1977), que consiste na utilização de uma colmeia retificadora de fluxo para medição do *swirl*. Uma revisão sobre os diferentes métodos para avaliação do *swirl*, está disponível em Stone e Ladommatos (1992).

A bancada utilizada para a aquisição de dados, consiste em um cilindro de ensaio, um sistema para a abertura controlada das válvulas de admissão, um sistema de controle do fluxo de ar integrado a uma bomba volumétrica e o sistema para medição do *swirl* com o uso da colmeia retificadora, como mostrado na figura 4.

Figura 4 - Representação esquemática da bancada de fluxo

Fonte: Pastor et al. (2004)

O ar é succionado por uma bomba e passa pelos dutos de admissão do cabeçote e pelo sistema de medição de *swirl*. A mudança do momento angular do fluxo de ar aplica um torque na colmeia retificadora de fluxo, que é medido e, o *swirl* é proporcional ao torque.

O fluxo de ar e o *swirl* são medidos para diferentes aberturas de válvulas, no presente trabalho as aberturas foram separadas em intervalos de 1mm. Para cada abertura de válvula a rotação da bomba é ajustada através de um sistema de controle para manter uma depressão 250 mmH₂O em relação a pressão atmosférica, medida no cilindro de ensaio.

Em bancadas de testes é imposto uma diferença de pressão para assegurar que o escoamento seja totalmente turbulento e que esteja próximo das condições reais de operação. Fixou-se a queda de pressão em 250 mmH₂O, que é um valor que tem sido amplamente utilizado na indústria (STONE; LADOMMATOS, 1992).

Para uma dada válvula e duto de admissão de ar do cabeçote é possível mensurar o ar que passa através da combinação de duto/válvula em intervalos de abertura que

variam de zero até a abertura máxima da válvula. Para realizar comparativos para diferentes projetos e tamanhos de motores os gráficos de abertura/escoamento são convertidos em aberturas não dimensionais, o que é meramente a abertura atual da válvula dividida pelo diâmetro interno do assento da válvula (BEARDS, 1999).

Beards (1999), construiu experimentalmente o gráfico da relação entre a abertura de válvula com o diâmetro interno de assento da válvula de admissão (L/D), com a diferença de pressão necessária para obter-se um escoamento turbulento, conforme figura 5.

Figura 5 - Limites para escoamento turbulento em dutos de admissão de motores de combustão interna

Fonte: Beards (1999 – adaptado)

2.2 Cálculo do Swirl

Como pode-se constatar na figura 6, a mudança do momento angular do fluxo de ar aplica um torque na colmeia retificadora de fluxo, que é medido e, o *swirl* é proporcional ao torque (M).

Figura 6 - Conceito do medidor de *swirl* em regime permanente

Fonte: Ferguson; Kirkpatrick (2001 – adaptado)

O retificador de fluxo valida a seguinte integral dupla (STONE; LADOMMATOS, 1992):

$$M = \int_{r=0}^{\frac{B}{2}} \int_{\phi=0}^{2\pi} u(r, \phi) v(r, \phi) r^2 dr d\phi \quad (1)$$

Sendo:

M = torque

B = diâmetro do cilindro

u = velocidade axial

v = velocidade tangencial

ϕ = ângulo da circunferência

Assumindo uma rotação do corpo sólido e uma velocidade axial constante, tem-se:

u = constante

$v = \Omega r$ (rotação do corpo sólido)

$$M = q\Omega \frac{B^2}{8} \quad (2)$$

Onde:

q = vazão mássica, medido durante o teste

A razão de *swirl* (R_s) é definido como a velocidade angular do corpo-sólido que acompanha o movimento em torno do eixo do cilindro Ω , dividido pela velocidade rotacional do virabrequim (Ω_v) (Heywood, 1988).

$$(R_s) = \frac{\Omega}{\Omega_v} \quad (3)$$

Rearranjando os termos da Eq. 2, pode-se calcular a velocidade angular equivalente do fluxo em função do torque medido no retificador de fluxo (STONE; LADOMMATOS, 1992):

$$\Omega_s = \frac{8M}{qB^2} \quad (4)$$

O coeficiente de *swirl* (C_s), pode ser escrito da seguinte maneira (THIEN, 1965 apud STONE; LADOMMATOS, 1992):

$$C_s = 2S \frac{M\rho}{q^2} \quad (5)$$

Onde:

ρ = densidade do ar no cilindro

S = curso do pistão

No cálculo do C_s , apenas o ρ é desconhecido. Pode ser calculado pela relação isentrópica do gás dentro e fora da bancada de ensaio, de acordo com a expressão (OTTOSSON; HOLMBERG, 2011):

$$\rho = \rho_1 \left(\frac{P_0 - \Delta_p}{P_0} \right)^{\frac{1}{K}} \quad (6)$$

Onde:

P_0 = pressão atmosférica, fora da bancada de ensaio, medida durante o teste

Δ_p = diferença de pressão dentro do cilindro de ensaio, definida previamente

K = constante adiabática do ar

E ρ_1 , a densidade do ar fora da bancada de ensaio, é dada por:

$$\rho_1 = \frac{P_0}{R T_1} \quad (7)$$

$R = \text{constante universal dos gases}$

$T_1 = \text{temperatura, fora da bancada de ensaio, medida durante o teste}$

O valor do coeficiente de *swirl*, (C_s), é calculado para cada abertura de válvula, do momento inicial da abertura até o final da abertura. É realizado o cálculo do número de *swirl* (N_s) integrando todos os valores em função das velocidades instantânea e média do pistão. Dito isso, então:

$$N_s = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} C_s \left(\frac{c(\alpha)}{c_m} \right)^2 d\alpha \quad (8)$$

Onde:

$c(\alpha) = \text{velocidade instantânea do pistão}$

$c_m = \text{velocidade média do pistão}$

$\alpha = \text{ângulo da manivela}$

2.3 Cálculo do μ_σ

O coeficiente de fluxo, μ_σ , é a capacidade volumétrica do duto/válvula. É calculado comparando a vazão mássica medida nos dutos, q , por uma vazão teórica ideal, q_{teo} , da seguinte maneira (OTTOSSON; HOLMBERG, 2011) :

$$\mu_\sigma = \frac{q}{q_{teo}} = \frac{q}{\rho_m V_0 A} \quad (9)$$

Onde:

$\rho_m = \text{densidade média nos dutos de admissão}$

$\rho_m = \frac{\rho + \rho_1}{2}, \text{ dados nas Eq. 6 e 7}$

$V_0 = \text{velocidade característica}$

A velocidade característica (V_0), é derivada a partir da queda de pressão na região da válvula assumindo um fluido incompressível e sem perdas no escoamento em conjunto com a equação de Bernoulli, tem-se:

$$V_0 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_m}} \quad (10)$$

A = área do diâmetro de assento interno da válvula de admissão

$$A = n\pi \frac{D^2}{4} \quad (11)$$

Onde:

n = quantidade de válvulas de admissão

D = diâmetro interno do assento da válvula de admissão

Um outro parâmetro utilizado é a relação entre a massa de ar medida e a massa de ar teórica em cada levantamento de válvula, em relação as velocidades instantânea e média do pistão. É o chamado coeficiente de escoamento médio μ_{σ_m} :

$$\mu_{\sigma_m} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi \left(\frac{c(\alpha)}{c_m} \right)^3 \frac{1}{(\mu_\sigma)^2} d\alpha}} \quad (12)$$

3 PROTOTIPAGEM RÁPIDA

3.1 Motivação

Na fase inicial do desenvolvimento de um novo cabeçote, o método clássico de avaliação dos dutos de admissão, consiste em testá-los em uma bancada de fluxo em regime permanente com protótipos construídos em madeira ou plástico (BEARDS, 1999). Como limitações dessas escolhas tem-se a dificuldade em alterar as superfícies internas dos dutos de forma controlada e o empenho necessário para reproduzir os ajustes realizados manualmente em outros protótipos.

No início do presente trabalho, o laboratório da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) no Parque Tecnológico de Sorocaba onde os testes foram conduzidos, realizava apenas medições do número de *swirl* em cabeçotes completos. As investigações sobre os impactos dos desvios decorrentes da manufatura no número de *swirl* eram realizadas em amostras de cabeçote extraídas da produção da montadora parceira da pesquisa ou em cabeçotes fabricados com os desvios solicitados.

Visando melhorar o método de avaliação disponível no laboratório da EPUSP, iniciou-se uma pesquisa na literatura para compreender as soluções adotadas em outros trabalhos.

Com o intuito de simular desvios de fundição e usinagem Shuliang et al. (2001), removeu 5,5mm de material na base do cabeçote, permitindo dessa forma que fossem realizadas medições do número *swirl* com os potenciais desvios em bancada. Para as medições uma placa usinada era montada na face inferior do cabeçote, conforme figura 7:

Fonte: Shuliang et al. (2001 – adaptado)

Em Lu et al. (2014), um dispositivo usinado também construído para simular desvios nos dutos de admissão e mensurar o impacto no número de *swirl*. Com o dispositivo detalhado na figura 8, foram executados testes de rotação dos dutos, simulação de excentricidade entre o duto de admissão e a sede da válvula de admissão, além de ensaios mensurando o impacto do *swelling* (falhas na linha de divisão do molde).

Figura 8 - Dispositivo usinado para a simulação de desvios

Fonte: Lu et al. (2014 – adaptado)

As soluções adotadas por Shuliang et al. (2001) e Lu et al. (2014) ainda possuem como restrição a liberdade em se alterar a superfície interna dos dutos de admissão de forma controlada e rápida.

Dessa forma, optou-se pela utilização de um dispositivo modular onde fosse possível realizar as trocas dos dutos de admissão construídos através de PR.

3.2 Aplicações, processos e benefícios

A PR é uma técnica de conversão direta do CAD (*Computer Aided Design*) 3D em um protótipo físico usando diferentes técnicas, a maior parte delas baseadas em fatiar o sólido 3D em múltiplas camadas 2D, e construí-las camada a camada (KAMRANI; NASR, 2010).

Aplicações populares das técnicas de PR nas fases iniciais do projeto incluem avaliação visual, validação de forma, verificação de montagem, etc. (GUO ; LEU, 2013).

“Os sistemas de PR podem ser agrupados pelo estado ou forma inicial da matéria-prima utilizada para fabricação. Nesse sentido, pode-se classificar os mesmos em processos baseados em Líquido, Sólido e Pó”. (Volpato et al., p. 9, 2007).

Segundo Volpato et al. (p.9-10, 2007), os processos podem ser definidos como:

- **Baseados em líquido:** a matéria-prima utilizada para fabricar a peça encontra-se no estado líquido, antes de ser processada. Nessa categoria, encontram-se as tecnologias que envolvem a polimerização de uma resina líquida por um laser UV (ex. Estereolitografia – STL, de *StereoLithography*), ou o jateamento de resina líquida por um cabeçote tipo jato de tinta e posterior cura pela exposição a uma luz UV (ex. Impressão a Jato de Tinta – IJP, de *Ink Jet Printing*), entre outros.
- **Baseados em sólido:** nestes processos o material utilizado encontra-se no estado sólido, podendo estar na forma de filamento, lâmina, ou outra qualquer. Alguns dos processos fundem o material, antes da sua deposição (ex. Modelagem por Fusão e Deposição – FDM, de *Fused Deposition Modeling*, IJP). Outros somente recortam uma lâmina do material adicionado (ex. Manufatura Laminar de Objetos – LOM, de *Laminated Object Manufacturing*, Tecnologia com Laminas de Papel, PLP, de *Paper Lamination Technology*).
- **Baseados em pó:** a matéria-prima está na forma de pó antes do processamento. Pode-se utilizar laser para o seu processamento (ex. Sinterização Seletiva a Laser – SLS, de *Selective Laser Sintering*, Sinterização a Laser – EOSINT, Fabricação da Forma Final a Laser – LENS, de *Laser Engineering Net Shaping*) ou um aglutinante aplicado por um cabeçote tipo jato de tinta (ex. Impressão Tridimensional – 3DP, de *3 Dimensional Printing*), entre outros processos.

As principais técnicas e tecnologias de PR são: estereolitografia, manufatura laminar de objetos, sinterização seletiva a laser, modelagem por fusão e deposição e a impressão tridimensional (SILVA, 2013).

Independentemente das diferentes técnicas existentes para a obtenção da PR, os sistemas adotam a mesma abordagem básica (CHUA; LEONG; LIM, p.10-11, 2010):

- Um modelo ou componente é criado com o uso de uma ferramenta ou sistema CAD-CAM (*Computer Aided Manufacturing*). O modelo 3D que representa a peça física deve ser um sólido ou uma superfície fechada representando um volume definido, este requisito garante que todas as seções horizontais do modelo sejam curvas fechadas, que é essencial para que as técnicas de PR criem um objeto sólido.
- O modelo sólido ou superfície a ser construído é convertido em um formato denominado “STL” (estereolitografia ou *StereoLithography* em inglês), arquivo originado através de sistemas 3D (CAD). Arquivos STL recriam as superfícies do modelo através de polígonos. Superfícies com grandes curvaturas devem ser constituídas por muitos polígonos, o que significa que o arquivo STL para peças com curvas pode ser muito grande. No entanto, vale salientar que alguns sistemas de PR aceitam dados no formato IGES (*Initial Graphic Exchange Specifications*).

- Um programa de computador analisa o arquivo .STL e define o modelo a ser fabricado dividindo-o em várias secções. As secções são sistematicamente recriadas através da solidificação de líquidos ou pó e unidas camada a camada para assumir a forma do modelo 3D.

Dentre os processos de PR, a impressão tridimensional foi escolhida justamente por propiciar um desenvolvimento rápido, flexível e por um custo menor se comparado a outros processos.

Entre os processos de fabricação concorrentes da impressão tridimensional, como sinterização seletiva a laser e estereolitografia, a impressão tridimensional é o processo mais rápido e menos oneroso. (ULBRICH et al., 2012 apud GÜNTHER et al., 2014)

Ainda pode-se mencionar a vantagem de não envolver empresas terceiras para a fabricação dos dutos protótipos, o que aumenta o sigilo em novos desenvolvimentos, uma vez que, o equipamento está disponível nas instalações da empresa e do laboratório da EPUSP.

O método de ensaio proposto, utilizando dutos de PR, apresenta as seguintes oportunidades:

- Refinamento e validações de simulações CFD (*Computer Fluid Dynamics*).
- Simulação de falhas do processo.
- Validação de novas geometrias.
- Deslocamento individual ou combinado dos dutos de admissão.
- Movimento de rotação e translação devidamente controlados.

Diversas indústrias podem se beneficiar com a PR, dentre essas pode-se incluir, no entanto, sem limitar: aeroespacial, automotiva, biomédica, bens de consumo, elétrica e produtos eletrônicos (CHUA; LEONG; LIM, 2010).

Em Illardo e Williams (2010), encontra-se um exemplo de aplicação na área automotiva (figura 9): um coletor de admissão é construído em uma única peça com o uso de PR para a fórmula SAE, melhorando o rendimento volumétrico do motor e a curva de torque e potência.

Figura 9 - Coletor de admissão Fórmula SAE

Fonte: Illardo e Williams (2010)

Com a automação, e sem a necessidade de ferramentas, sistemas de PR podem produzir diretamente peças funcionais para pequenos lotes. Componentes produzidos dessa maneira, normalmente tem um acabamento inferior aos usinados, por exemplo. Peças produzidas com alguns sistemas mais avançados são capazes de possuir qualidade similar as fabricadas com ferramental. Peças produzidas com o pós processamento adequado, possuem materiais com propriedades próximas ao produto final (CHUA; LEONG; LIM, 2010).

Figura 10 - Resultados com a integração de PR no desenvolvimento de produto

Fonte: Chua; Leong; Lim (2010 – adaptado)

O impacto da PR na cadeia completa de desenvolvimento de produto e implementação do processo, é visto na figura 10. Dependendo da escala de produção, as reduções de tempo e custos podem variar de 50% até 90%.

Outro benefício da PR é a liberdade que o projetista possui em novos projetos, pois não precisa limitar-se as restrições de manufatura, uma vez que as técnicas de produção não necessitam de ferramental e não adicionam custos extras devido à complexidade da geometria a ser fabricada (HAGUE; SAEED; NAGUIB, 2003).

4 ORGANIZAÇÃO DO PROJETO

4.1 Demandas do projeto

Diante da possibilidade de incorporar a PR no ensaio de fluxo e, com inúmeras oportunidades a serem exploradas com essa técnica, o primeiro passo foi a definição das demandas do projeto.

Inicialmente, como a resposta com o método proposto ainda era desconhecida, optou-se por manter as sedes de válvulas, válvulas de admissão e molas originais do cabeçote estudado no presente trabalho. A razão para tal escolha foi diminuir o número de variáveis durante o desenvolvimento.

A utilização de molas com uma constante elástica menor, facilitaria a montagem e desmontagem das válvulas e dutos de admissão, porém poderia ocasionar oscilações na abertura da válvula durante os ensaios na bancada de fluxo.

O cabeçote analisado no trabalho, cabeçote modelo A, é utilizado em motores ciclo Diesel de 9 e de 13 litros, que equipam veículos comerciais da montadora parceira do trabalho.

Os motores desse fabricante possuem 5 cilindros quando 9 litros e 6 cilindros quando 13 litros, sendo que cada cilindro utiliza um cabeçote modelo A. Os dados do motor encontram-se na tabela 1:

Tabela 1 - Dados do motor

Descrição	
Diâmetro do cilindro (B)	130mm
Curso do pistão (S)	160mm
Comprimento da biela (L)	255mm
Relação manivela/biela (λ)	0,3137
Quantidade de válvulas de admissão por cilindro (n)	2
Diâmetro interno de assento da válvula de admissão (D)	39,7mm

Fonte: Autor

Requisitos estabelecidos no projeto do dispositivo modular:

- Reproduzir a geometria de projeto do cabeçote modelo A para a validação do método proposto com impressão tridimensional.
- Manipulação e troca dos dutos de admissão realizadas somente por uma pessoa.
- Preparar o dispositivo para um novo ensaio em menos de 5 minutos.
- Integrar o orientador de fluxo nos dutos de admissão (orientador de fluxo representado na figura 11).
- Reproduzir os impactos do processo de usinagem nos dutos de admissão.
- Simular translações de 1mm em torno dos eixos X, Y e Z.
- Simular rotações de até $1,5^\circ$ em torno dos eixos X, Y e Z.

As demandas de rotações e translações do dispositivo tem como premissa reproduzir os potenciais desvios do processo de fabricação de um cabeçote.

Figura 11 - Cabeçote modelo A com o orientador de fluxo (item verde) e a orientação dos eixos

Fonte: Autor

A figura 11, apresenta a orientação dos eixos utilizados como referência nos deslocamentos e rotações dos dutos de admissão discutidos no decorrer do trabalho.

4.2 Pontos de atenção

Como observado durante o capítulo 2, o coeficiente de descarga é levantado experimentalmente nos ensaios de escoamento em regime permanente, portanto é importante manter a rugosidade e estanqueidade similares entre os dutos produzidos em PR e o cabeçote fundido para não alterar os resultados.

Rugosidade:

Com o intuito de compreender conceitualmente os impactos da rugosidade no escoamento, será utilizada a equação de Bernoulli.

Segundo Munson, Young e Okiish (2004), a equação de Bernoulli, pode ser utilizada na análise de uma grande quantidade de escoamentos (apesar da equação ser uma das mais antigas da mecânica dos fluidos e obtida a partir de hipóteses bastante restritivas).

De acordo com Brunetti (2008), as hipóteses simplificadoras são:

- a) Regime permanente;
- b) Sem máquina no trecho de escoamento em estudo. Entenda-se por máquina qualquer dispositivo mecânico que forneça ou retire energia do fluido, na forma de trabalho. As que fornecem energia ao fluido serão denominadas “bombas” e as que extraem energia do fluido, “turbinas”.
- c) Sem perdas por atrito no escoamento do fluido ou fluido ideal;
- d) Propriedades uniformes nas secções.
- e) Fluido incompressível;
- f) Sem trocas de calor.

Pelas hipóteses (b), (c) e (f), exclui-se que no trecho de escoamento em estudo seja fornecida ou retirada energia do fluido.

Seja o tubo de corrente da figura (12), entre as secções (1) e (2).

Figura 12 - Tubo de corrente

Fonte: Brunetti (2008)

Adotando as condições de contorno adequadas, tem-se:

$$z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} \quad (13)$$

Onde:

z_1 e z_2 = cota entre o PHR e o centro de gravidade da partícula

V_1 e V_2 = velocidade do fluido

P_1 e P_2 = pressão do fluido

g = aceleração da gravidade

γ = peso específico do fluido

A equação (13) é a equação de Bernoulli, que permite correlacionar cotas, velocidades e pressões entre duas secções do escoamento do fluido. (Brunetti, 2008)

Os termos possuem o seguinte significado:

$z = \frac{mgz}{mg} = \frac{E_p}{G}$ = energia potencial por unidade de peso ou energia potencial de uma partícula de peso unitário

$\frac{V^2}{2g} = \frac{mV^2}{2gm} = \frac{mV^2}{2G} = \frac{E_c}{G}$ = energia cinética por unidade de peso ou energia cinética de uma partícula de peso unitário

$\frac{P}{\gamma} = \frac{PV_{ol}}{\gamma V_{ol}} = \frac{PV_{ol}}{G} = \frac{E_{pr}}{G}$ = energia de pressão por unidade de peso ou energia de pressão da partícula de peso unitário

Onde:

m = massa

G = peso

E_p = energia potencial

E_c = energia cinética

E_{pr} = energia de pressão

V_{ol} = volume

A energia total por unidade de peso numa secção ou carga total na secção (H), pode ser escrita por analogia, da seguinte forma (Brunetti, 2008):

$$H = \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z \quad (14)$$

Com a noção de carga total, a equação (13), pode ser escrita simbolicamente:

$$H_1 = H_2 \quad (15)$$

Em um fluido real, devem ser considerados os atritos internos no escoamento do fluido (Brunetti, 2008).

Mantendo as hipóteses de regime permanente, fluido incompressível, propriedades uniformes na secção e sem trocas de calor induzidas.

Se o fluido fosse ideal, da equação de Bernoulli tem-se que $H_1 = H_2$ (Figura 13).

Figura 13 – Transporte do fluido

Fonte: Brunetti (2008)

Porém ao considerar o atrito no fluido de transporte, entre as secções (1) e (2), haverá uma dissipação de energia de forma que $H_1 > H_2$.

Para reestabelecer a igualdade, será necessário somar no segundo membro a energia dissipada no transporte (Brunetti, 2008).

$$H_1 = H_2 + H_{p1,2} \quad (16)$$

Onde:

$H_{p1,2}$ = energia perdida entre (1) e (2) por unidade de peso do fluido (perda de carga)

Perda de carga é a energia perdida por unidade de peso do fluido quando este escoar.

“...no escoamento de um fluido real entre duas secções onde não existe máquina, a energia é sempre decrescente no sentido do escoamento, isto é, a carga total a

montante é sempre maior que a de jusante, desde que não haja máquina entre as duas” (Brunetti, p. 96, 2008).

A rugosidade é um parâmetro importante no projeto, pois pode alterar a perda de carga no escoamento.

Vedação:

Como o coeficiente de escoamento médio μ_{σ_m} , que é a relação entre a massa de ar medida e a massa teórica em cada levantamento de válvula é obtido experimentalmente na bancada, é fundamental manter a mesma estanqueidade entre os dutos produzidos em PR e o cabeçote completo para que os resultados do μ_{σ_m} não sejam alterados.

4.3 Etapas de desenvolvimento

Segundo Kaminski (p. 4, 2014): “Todos os projetos têm uma característica básica: não se desenvolvem linearmente, com cada etapa sendo complementada antes de passar para a seguinte. O desenvolvimento de um projeto é iterativo, pois cada item depende de outros para que o sistema como um todo funcione harmonicamente”.

Devido ao fato de ser uma novidade a aplicação de PR para a análise do número de *swirl* no laboratório, as melhorias necessárias foram implementadas ao longo do desenvolvimento. O fluxograma do projeto é representado na figura 14:

Figura 14 - Fluxograma do projeto

Fonte: Autor

O principal objetivo de cada etapa do fluxograma é descrito abaixo:

- **Demandas do projeto:** estabelecer o escopo do projeto. As demandas do projeto estão detalhadas na seção 4.1.
- **Projeto:** desenhar e especificar o dispositivo de acordo com as demandas estabelecidas inicialmente.
- **Fabricação:** produzir o protótipo para a realização de testes.
- **Testes físicos:** mensurar o número de *swirl*, aferir a estanqueidade do dispositivo e a rugosidade dos dutos produzidos com PR.
- **Análise dos resultados:** verificar se os resultados estão coerentes e listar os fatores que contribuem para oscilações nos resultados.
- **Oportunidades de melhoria:** identificar se existem oportunidades de melhoria no projeto para serem implementados na próxima etapa.

- **Validação:** comparar os resultados do número de *swirl* e do μ_{σ_m} de um cabeçote completo com os resultados obtidos na versão do dispositivo onde não foram encontradas oportunidades de melhoria. O procedimento de validação encontra-se na seção abaixo (4.3.1).

4.3.1 Planejamento

Como a repetitividade do equipamento disponível no laboratório não era conhecida, definiu-se que para o levantamento do desvio padrão da bancada e posterior validação do método proposto, uma unidade do cabeçote modelo A seria testada 40 vezes na bancada de fluxo.

O tamanho amostral demonstrou-se factível em função do tempo de execução dos ensaios. A unidade do cabeçote testada foi denominada XY.

O dispositivo modular fruto do presente trabalho, será testado com o intuito de mensurar o número de *swirl*, estanqueidade e rugosidade dos dutos. Determinou-se o seguinte planejamento:

- Versão I do dispositivo: validação da montagem do equipamento no laboratório, utilizando os dutos produzidos com a mesma geometria interna do modelo geométrico (CAD) do cabeçote.
- Versão II do dispositivo: mensurar o impacto dos ensaios com dutos produzidos com diferentes quantidades de pós-tratamento e de vedação utilizando os dutos produzidos com a mesma geometria interna do modelo geométrico (CAD) do cabeçote.

Os fluidos de pós tratamento tem uma influência significativa na rugosidade dos modelos produzidos na impressora 3D (GALETA; ŠIMUNOVIĆ; MAZUREK, 2015).

- Versão III do dispositivo: validação do método de ensaio proposto, utilizando os dutos produzidos com a mesma geometria interna da unidade XY do cabeçote. Os resultados dos 40 ensaios do dispositivo são confrontados com os resultados da unidade XY testada inicialmente.

Como mencionado na seção 1, as dimensões do cabeçote estão sujeitas a variações decorrentes do processo de fabricação. Para assegurar que os dutos produzidos e

usados na validação do método proposto tenham a mesma geometria interna do cabeçote foi necessário cortar e digitalizar a unidade XY do cabeçote modelo A.

O corte do cabeçote foi realizado para permitir o acesso as geometrias internas dos dutos de admissão no processo de digitalização.

O processo de digitalização gera uma malha de pontos que é importada para o ambiente CAD e os dutos de admissão são criados com a mesma geometria da peça física.

Durante o processo de digitalização que é realizado com um *scanner*, conforme seção 9.1, uma superfície que corresponde a geometria do componente que está sendo mapeado é criada, no caso desse trabalho, um cabeçote. O arquivo da superfície escaneada, malha de pontos, é conhecido popularmente como nuvem de pontos.

5 AQUISIÇÃO DE DADOS DO CABEÇOTE

5.1 Procedimento dos ensaios de bancada

O procedimento de ensaio utilizado estava implementado no laboratório da EPUSP antes do início do presente trabalho e, por se tratar de um procedimento que já possuía os seus resultados correlacionados com o equipamento disponível na matriz da montadora da Europa, foi decidido mantê-lo sem alterações.

Todos os ensaios foram realizados com o medidor de *swirl* Cussons modelo P7300/216, figura 15, cuja precisão informada pelo fabricante é de $\pm 2\%$ (no fundo de escala).

Figura 15 – Medidor Cussons P7300

Fonte: CUSSONS (2016)

O laboratório possui um controle de temperatura e umidade do ar. Durante a aquisição dos dados a temperatura do laboratório era de 20°C.

Sequência de preparo dos ensaios:

1. Montar o cabeçote ou dispositivo modular no cilindro de ensaio.
2. Montar o sistema de controle de abertura das válvulas de admissão.
3. Ajustar o orientador de fluxo (somente no caso do ensaio de um cabeçote).
4. Anotar na planilha de aquisição de dados a pressão atmosférica (informação adquirida com o uso de um barômetro manual).
5. Alterar a aberturas das válvulas de 1mm à 15mm, sendo que para cada posição os dados são registrados por 30 segundos pelo sistema de controle do

equipamento (tempo controlado manualmente com o auxílio de um cronômetro digital).

A figura 16, mostra um cabeçote montado no medidor de *swirl* utilizado no projeto.

Figura 16 - Cabeçote modelo A montado no medidor de *swirl* do laboratório

Fonte: Autor

A abertura da válvula de admissão para cada posição é realizada manualmente, com um relógio comparador para indicar o deslocamento da mesma, com uma precisão de $\pm 0,01\text{mm}$.

O mesmo sistema de controle de pressão e vazão foi utilizado em todos os testes para permitir a comparação e discussão dos resultados. A calibração do equipamento foi realizada a cada 20 ensaios ou 2 dias.

5.2 Testes físicos com o cabeçote

Conforme descrito na seção 4.3.1, para a determinação do desvio padrão da bancada e posterior validação do método proposto, uma unidade do cabeçote modelo A foi testada 40 vezes na bancada de fluxo. Essa amostra do cabeçote é denominada XY.

- **Unidade XY do cabeçote modelo A:** 40 ensaios divididos da seguinte forma:
 - 1º dia: 10 ensaios. (Figura 17)
 - 2º dia: 10 ensaios. (Figura 18)
 - 3º dia: 10 ensaios. (Figura 19)
 - 4º dia: 10 ensaios. (Figura 20)

Figura 17 - Abertura de válvula x torque nos ensaios da unidade XY do cabeçote modelo A no 1º dia

Fonte: Autor

Constata-se na figura 17 que variações de 4% entre o valor máximo e o mínimo do torque medido ocorreram durante a aquisição dos dados nas aberturas de válvula de 10mm e 11mm, porém nenhum dado discrepante foi encontrado.

Figura 18 - Abertura de válvula x torque nos ensaios da unidade XY do cabeçote modelo A no 2º dia

Fonte: Autor

Verifica-se na figura 18 que variações de 6% entre o valor máximo e o mínimo do torque medido ocorreram durante a aquisição dos dados na abertura de válvula de 10mm, porém nenhum dado discrepante foi encontrado.

Figura 19 - Abertura de válvula x torque nos ensaios da unidade XY do cabeçote modelo A no 3º dia

Fonte: Autor

Observa-se na figura 19 que variações de 3% à 4% entre o valor máximo e o mínimo do torque medido ocorreram durante a aquisição dos dados nas aberturas de válvula de 10mm e de 14mm, porém nenhum dado discrepante foi encontrado.

Figura 20 - Abertura de válvula x torque nos ensaios da unidade XY do cabeçote modelo A no 4º dia

Fonte: Autor

Nota-se na figura 20 que variações de 5% entre o valor máximo e o mínimo do torque medido ocorreram durante a aquisição dos dados nas aberturas de válvula de 10mm e de 12mm, porém nenhum dado discrepante foi encontrado.

A tabela 2 fornece os resultados do número de *swirl* e do μ_{σ_m} separados por dia e o resultado global, considerando os 40 ensaios:

Tabela 2 - Resultados da unidade XY do cabeçote modelo A

	1º dia		2º dia		3º dia		4º dia	
	<i>Número de Swirl</i>	μ_{σ_m}	<i>Número de Swirl</i>	μ_{σ_m}	<i>Número de Swirl</i>	μ_{σ_m}	<i>Número de Swirl</i>	μ_{σ_m}
ensaio 1	2,109	0,411	2,094	0,410	2,057	0,413	2,094	0,412
ensaio 2	2,105	0,411	2,104	0,411	2,093	0,411	2,063	0,412
ensaio 3	2,087	0,412	2,105	0,411	2,074	0,413	2,064	0,413
ensaio 4	2,112	0,413	2,099	0,411	2,055	0,413	2,058	0,413
ensaio 5	2,101	0,413	2,094	0,413	2,080	0,413	2,060	0,413
ensaio 6	2,079	0,413	2,099	0,413	2,075	0,413	2,081	0,413
ensaio 7	2,106	0,412	2,091	0,413	2,056	0,413	2,046	0,414
ensaio 8	2,089	0,413	2,093	0,413	2,071	0,413	2,047	0,414
ensaio 9	2,086	0,413	2,095	0,413	2,070	0,414	2,059	0,413
ensaio 10	2,078	0,413	2,098	0,413	2,059	0,414	2,034	0,413
média	2,095	0,412	2,097	0,412	2,069	0,413	2,061	0,413
máx	2,112	0,413	2,105	0,413	2,093	0,414	2,094	0,414
min	2,078	0,411	2,091	0,410	2,055	0,411	2,034	0,412
delta	0,033	0,002	0,014	0,003	0,039	0,003	0,060	0,002
Desvio Padrão	0,012	0,001	0,005	0,001	0,013	0,001	0,016	0,001
95% I.C.	0,008	0,001	0,003	0,001	0,013	0,000	0,013	0,001

Número de Swirl global		
Média	Desvio Padrão	95% I.C.
2,081	0,020	0,006

μ_{σ_m} global		
Média	Desvio Padrão	95% I.C.
0,413	0,001	0,000

Fonte: Autor

De acordo com Costa Neto (2002), nos testes de aderência, a hipótese refere-se à forma de distribuição da população. Foi utilizado o método de *Kolmogorov-Smirnov*, para verificar a forma de distribuição dos resultados dos ensaios.

Como os mesmos apontaram uma distribuição normal, foi adotado a média e o desvio padrão para expressar os resultados.

A maior variação entre as medições do número de *swirl* ocorreu no 4º dia dos ensaios, onde foi encontrada uma diferença de 3%, entre o valor máximo e o mínimo.

Como todos os ensaios foram repetidos com o mesmo cabeçote, sem alteração nas geometrias da sede ou das válvulas de admissão, o valor do μ_{σ_m} manteve-se praticamente constante: apresentando um desvio padrão de 0,001 ao final dos 40 ensaios.

Ainda, como todos os testes foram realizados no mesmo equipamento e com a mesma unidade do cabeçote, é possível afirmar que o desvio-padrão da bancada de fluxo do laboratório para a medição do número de *swirl* é de 0,02.

6 VERSÃO I DO DISPOSITIVO

6.1 Projeto

O modelo geométrico do cabeçote modelo A, foi adotado como base no desenvolvimento da versão I. As superfícies internas dos dutos foram extraídas e fechou-se um volume para ajudar na definição do projeto, figura 21.

Figura 21 - Volume interno dos dutos de admissão

Fonte: Autor

Depois de criar as superfícies internas dos dutos de admissão, é necessária uma parede para que a peça seja manuseada após a confecção em uma impressora 3D. No presente trabalho, os modelos foram construídos com 4mm de espessura para manter uma resistência adequada e reduzir a quantidade de material utilizado na fabricação de cada duto protótipo.

Como pode-se verificar na figura 22, os dutos já foram construídos com o orientador de fluxo integrado.

Figura 22 - Volume da geometria interna utilizado como ferramenta de remoção de material no CAD

Fonte: Autor

Na figura 23, cada cor dentro do duto representa diferentes rotações e translações em torno dos eixos X, Y e Z. Em cada duto, o centro da válvula de admissão foi utilizado como referencial de coordenadas.

Somente as superfícies internas se movimentam, garantindo dessa forma a montagem dos dutos no dispositivo.

Figura 23 - Exemplo de deslocamentos possíveis no duto de admissão

Fonte: Autor

Após essa análise foi confirmado que 4mm de espessura seria o suficiente para absorver todos os deslocamentos especificados na demanda do projeto.

Uma das demandas estabelecidas no projeto foi manter as molas normais de produção, apesar de não influenciar nos resultados das medições do número de *swirl*. Essa decisão teve como objetivo manter como variável somente os dutos protótipos.

Decidiu-se por utilizar placas de aço usinadas para garantir as dimensões de projeto e a resistência mecânica necessária.

O dispositivo teve que ser dividido em alguns componentes possibilitando a montagem e desmontagem dos dutos. A figura 24, apresenta uma vista explodida para auxiliar na compreensão da função dos componentes principais descritos abaixo:

- **Base inferior:** manter a resistência mecânica necessária para suportar as solicitações da válvula de admissão montada com as válvulas originais, além de incorporar as sedes de válvula e reproduzir a geometria da face inferior do cabeçote modelo A.
- **Base de apoio:** assegurar o posicionamento dos dutos de PR conforme especificação do projeto.
- **Bucha:** resistência mecânica necessária para fixar a base de apoio no cilindro de ensaio.
- **Guia de válvula:** guiar os deslocamentos da válvula, na abertura e fechamento da mesma.
- **Dutos de admissão com o orientador de fluxo integrado:** reproduzir a geometria do cabeçote e simulação de desvios controlados.
- **Colunas de sustentação:** prover a resistência mecânica necessária durante a abertura e o fechamento das válvulas.
- **Base superior:** resistência mecânica para suportar a carga das molas de admissão e ainda o mecanismo utilizado no laboratório que controla a abertura e fechamento das válvulas durante o ensaio.

Figura 24 - Vista explodida da versão I do dispositivo modular **Fonte:** Autor

Na versão I do projeto, com o intuito de criar um dispositivo compacto, a altura total do cabeçote não foi mantida (eixo Z). Diante dessa escolha, a geometria da base superior acompanha o contorno dos dutos, permitindo assim, a montagem e desmontagem do dispositivo.

A figura 25 traz um comparativo entre os modelos virtuais da versão I e o cabeçote completo montado no cilindro de ensaio:

Figura 25 – Versão I do dispositivo modular x cabeçote modelo A

Fonte: Autor

Após a revisão do projeto, a próxima etapa foi a construção do protótipo físico.

6.2 Testes físicos da versão I

Devido a indisponibilidade de material da máquina de PR do laboratório durante essa fase do projeto, os dutos do primeiro protótipo do dispositivo foram produzidos na máquina de PR EOSINT P385¹ disponível na matriz da empresa na Europa. A montagem do dispositivo foi executada conforme a figura 26:

Figura 26 - Protótipo da versão I do dispositivo montado no cilindro de ensaio

Fonte: Autor

¹ Disponível em: < <https://www.eos.info/en> >. Acesso em 07/11/2016

O conceito inicial foi testado no medidor de *swirl* e, apesar dos dados adquiridos estarem dentro das especificações do fabricante, foi constatado que as guias de válvulas não estavam rígidas o suficiente para evitar a movimentação das mesmas em torno do eixo Z.

6.3 Análise dos resultados da versão I

Como foi identificado a movimentação das válvulas de admissão em torno do eixo Z e que ainda seria necessária a implementação de um melhor alinhamento entre a base inferior e a superior do dispositivo com o intuito de manter a repetitividade do dispositivo os resultados não foram adicionados no trabalho.

6.4 Oportunidades de melhoria da versão I

As seguintes oportunidades de melhoria foram encontradas no conceito inicial e incorporadas na próxima versão do projeto:

- Mesma disposição de furos e altura do cabeçote modelo A, dessa forma, o sistema implementado para abertura e fechamento de válvulas no cabeçote é válido para o dispositivo modular sem a necessidade de modificações.
- Rebaixo nas colunas de sustentação para garantir o alinhamento entre a base inferior e a superior.
- Guias de válvula rígidas para evitar a movimentação das mesmas durante os testes de bancada.
- Interfaces em alumínio e aço inoxidável para evitar corrosão.
- Mesma disposição dos furos de localização do cabeçote na base inferior do dispositivo para garantir o alinhamento no cilindro de ensaio.
- Adicionado o pino guia para a abertura/fechamento das válvulas.

Em decorrência do material disponível no estoque da ferramentaria da empresa, as bases inferior e superior dos protótipos (virtual e físico), foram construídas com um diâmetro de 204mm ao invés de 240mm como planejado previamente.

A consequência dessa modificação é que não foi possível manter a mesma posição dos furos de localização disponíveis na face inferior do cabeçote estudado, figura 27.

Figura 27 - Furos de localização na face inferior do cabeçote modelo A

Fonte: Autor

7 VERSÃO II DO DISPOSITIVO

7.1 Projeto

Como o dispositivo passou a ter a mesma altura do cabeçote, eliminou-se a necessidade de fazer alívios na base superior para evitar a interferência com os dutos.

As principais mudanças do projeto estão destacadas na figura 28.

Figura 28: Melhorias implementadas na versão II do dispositivo modular

Fonte: Autor

Para garantir o alinhamento entre a base inferior e a base superior foram adicionados rebaixos na coluna de sustentação. As guias de válvula montadas com interferência para evitar a movimentação das mesmas durante os testes de bancada.

Após a revisão do projeto, a próxima etapa foi a construção do protótipo físico.

7.2 Testes físicos da versão II

Nessa etapa do projeto foram realizados ensaios com o propósito de mensurar o impacto do pós tratamento na PR, a necessidade do uso de vedação entre a PR e a placa metálica além da medição da rugosidade dos dutos produzidos em PR.

Todos os dutos foram construídos conforme a geometria interna do modelo geométrico do cabeçote, de acordo com o plano de validação descrito na seção 4.3.1.

Foram realizados 3 ensaios completos em cada experimento, conforme descrição:

- **Experimento A:** o teste de medição do número de *swirl* foi realizado 3 vezes nos dutos produzidos na matriz da empresa a fim de verificar a repetitividade do dispositivo. Dutos montados na base metálica sem vedação.
- **Experimento B:** o teste de medição do número de *swirl* foi realizado 3 vezes nos mesmos dutos utilizados no experimento A, porém com a adição de silicone com o intuito de avaliar os impactos da aplicação de vedação entre os dutos e a base metálica, figura 29.

Figura 29 - Dutos com silicone utilizados no experimento B

Fonte: Autor

- **Experimento C:** o teste de medição do número de *swirl* foi realizado 3 vezes nos dutos produzidos no laboratório com excesso de pós tratamento, visando alterar a rugosidade da superfície interna dos dutos.
- **Experimento D:** o teste de medição do número de *swirl* foi realizado 3 vezes nos mesmos dutos utilizados no experimento C, no entanto, nesse ensaio foi

adicionado junta líquida na parte externa do duto, com o propósito de não alterar a superfície de contato duto-base metálica, figura 30.

Figura 30 - Junta líquida para vedação aplicada na parte externa dos dutos

Fonte: Autor

- **Experimento E:** o teste de medição do número de *swirl* foi realizado 3 vezes nos dutos produzidos no laboratório, com o mínimo de pós tratamento possível, visando que a mistura química não penetrasse na superfície interna dos dutos protótipos, possibilitando a avaliação do impacto da rugosidade interna dos dutos, figura 31.

Figura 31 - Dutos utilizados nos experimentos C e E, respectivamente

Fonte: Autor

Após a realização dos ensaios, os dutos protótipos foram seccionadas e a rugosidade comparada com um cabeçote.

7.3 Medição da rugosidade

Com o intuito de averiguar a rugosidade interna dos dutos produzidos em PR, os mesmos foram seccionados para a medição em um medidor de perfil, figura 32.

Figura 32 - Dutos utilizados nos experimentos A, C e E seccionados

Fonte: Autor

Para a medição 2D da rugosidade foi utilizado um medidor de perfil Taylor Hobson no LFS² (Laboratório de Fenômenos de Superfície) da EPUSP, conforme figura 33.

² Disponível em: <<http://www.lfs.usp.br/>>. Acesso em 07/11/2016

Figura 33 - Medição da rugosidade nos dutos de PR

Fonte: Autor

Realizou-se quatro medições em cada uma das secções, sendo duas longitudinais no sentido contrário ao escoamento do ar na admissão e duas medições na transversal da amostra do duto seccionado, resultados na tabela 3.

Tabela 3 - Rugosidade média encontrada nos dutos de PR (em μm):

	Experimento A	Experimento C	Experimento E
Ra máximo	18,2	15,4	18,2
Ra mínimo	12,0	10,0	10,2
Ra médio	16,0	12,8	15,2

Fonte: Autor

Na tabela 3 nota-se uma diferença de 20% da rugosidade entre as dutos utilizados no experimento C e A, no entanto, o maior valor foi encontrado nos dutos produzidos no equipamento da matriz da montadora, que não será incluído na validação do método proposto. Os dados foram adicionados no presente trabalho porque os mesmos serviram de base para a investigação de ensaios utilizando dutos de admissão de ar do cabeçote produzidos via PR.

Em paralelo com as medições na PR, uma unidade do cabeçote modelo A foi cortada e enviada para análise no LFS da EPUSP para que as rugosidades fossem confrontadas.

Figura 34 - Equipamento utilizado para medição da rugosidade

Fonte: Autor

Na figura 34, pode-se visualizar o equipamento CCI MP³ da empresa Taylor Hobson que foi utilizado para a medição da topografia 3D das secções do cabeçote.

Figura 35 - Região mensurada destacada em vermelho

Fonte: Autor

A região destacada em vermelho na figura 35, é a área que foi medida e comparada com as secções dos dutos produzidos em PR.

Na figura 36, é possível visualizar os resultados da topografia e uma vista 3D da região mensurada do cabeçote modelo A.

³ Disponível em: <<http://www.taylor-hobson.com/products/23/109.html#CCI-MP>>. Acesso em 07/11/2016

Figura 36 - Topografia vista de topo (esquerda) e vista 3D (direita) do cabeçote modelo A

Fonte: Autor

O cabeçote em produção possui um R_a de $17,3 \mu\text{m}$, valores similares aos encontrados nos dutos produzidos com o processo de impressão tridimensional. Na norma DIN 4766, encontra-se os seguintes valores de R_a em função do processo de fabricação, tabela 4.

Tabela 4 - Valores de R_a para o processo de fundição

Método de manufatura		Valores atingíveis médios de R_a em μm							
Grupo principal	Designação do método	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50
Fundição	Fundição em molde de areia								
	Fundição em molde de casca								
	Fundição em coquilha								
	Fundição sob pressão								
	Fundição por cera perdida								
		Valores comuns							
		Valores possíveis							

Fonte: DIN 4766 (1981 – adaptado)

7.4 Análise dos resultados da versão II

Todos os ensaios foram realizados no mesmo equipamento, conforme descrito na seção 5.1, a figura 37 mostra o dispositivo montado no laboratório

Figura 37 - Versão II do dispositivo modular montado no medidor de *swirl*

Fonte: Autor

Figura 38 - Abertura de válvula x torque nos ensaios do experimento A

Fonte: Autor

Como pode-se constatar na figura 38, nenhuma variação significativa foi encontrada nos resultados da medição de torque pelo equipamento durante o experimento A. Nos 3 ensaios houve uma variação média de 3% entre o valor máximo e o mínimo do torque medido.

Figura 39 - Abertura de válvula x torque nos ensaios do experimento B

Fonte: Autor

O método proposto pelo ensaio B não é aconselhável, pois a camada de silicone entre o duto e a base metálica altera o posicionamento do duto, no eixo Z, o que pode ocasionar oscilações e levar a uma medição equivocada do número de *swirl* (figura 39).

Figura 40 - Abertura de válvula x torque nos ensaios do experimento C

Fonte: Autor

Figura 41 - Abertura de válvula x torque nos ensaios do experimento D

Fonte: Autor

Figura 42 - Abertura de válvula x torque nos ensaios do experimento E

Fonte: Autor

Nota-se nas figuras 40, 41 e 42 que nenhuma variação significativa foi encontrada nos resultados da medição de torque pelo equipamento durante os experimentos C, D e E. Nos ensaios ocorreu uma variação média de 2% entre o valor máximo e o mínimo do torque medido.

Apesar de mencionado anteriormente, é importante ressaltar que o experimento B foi realizado com o mesmo duto do experimento A e que o experimento D foi realizado com o mesmo duto do experimento C.

As tabelas 5 e 6 apresentam os dados adquiridos durante os ensaios e, pode-se destacar:

- A variação do μ_{σ_m} entre os ensaios A e B.
- A variação do número de *swirl* entre os ensaios C e D.
- A variação do número de *swirl* entre os ensaios A, C e E.

Tabela 5 - Resultados dos experimentos A, B, C, D e E (número de *swirl*)

	Experimento A <i>Número de Swirl</i>	Experimento B <i>Número de Swirl</i>	Experimento C <i>Número de Swirl</i>	Experimento D <i>Número de Swirl</i>	Experimento E <i>Número de Swirl</i>
ensaio 1	2,013	2,467	2,057	2,066	2,044
ensaio 2	2,049	2,358	2,062	2,064	2,045
ensaio 3	2,041	2,343	2,053	2,059	2,047
média	2,034	2,389	2,057	2,063	2,046
máx	2,049	2,467	2,062	2,066	2,047
min	2,013	2,343	2,053	2,059	2,044
delta	0,036	0,124	0,009	0,007	0,003
Desvio Padrão	0,019	0,068	0,004	0,003	0,001
95% I.C.	0,022	0,077	0,005	0,003	0,001

Fonte: Autor

Tabela 6 - Resultados dos experimentos A, B, C, D e E (μ_{σ_m})

	Experimento A μ_{σ_m}	Experimento B μ_{σ_m}	Experimento C μ_{σ_m}	Experimento D μ_{σ_m}	Experimento E μ_{σ_m}
ensaio 1	0,421	0,396	0,422	0,422	0,419
ensaio 2	0,421	0,408	0,422	0,422	0,420
ensaio 3	0,421	0,410	0,422	0,422	0,419
média	0,421	0,405	0,422	0,422	0,419
máx	0,421	0,410	0,422	0,422	0,420
min	0,421	0,396	0,422	0,422	0,419
delta	0,000	0,014	0,000	0,000	0,001
Desvio Padrão	0,000	0,008	0,000	0,000	0,001
95% I.C.	0,000	0,009	0,000	0,000	0,001

Fonte: Autor

O método utilizado no experimento B foi descartado em consequência da alteração do posicionamento do duto em PR com a placa metálica, devido a camada de silicone. Esse fato foi determinante para os resultados discrepantes dos demais ensaios no número de *swirl* e no μ_{σ_m} .

A variação de 0,6% no número de *swirl* entre os ensaios C e D pode ser justificada pela adição da junta líquida ou pela precisão do equipamento de medição.

Enquanto que a variação de 2,4%, entre o valor máximo e o mínimo do número de *swirl*, entre os ensaios A, C e E pode ser justificada pela seguinte hipótese:

- Precisão do medidor *Cussons*: os ensaios não foram realizados com a mesma calibração do equipamento e as diferenças foram ocasionadas pelo medidor *Cussons* que possui +/-2% de precisão no fundo de escala.

7.5 Oportunidades de melhoria da versão II

Com as informações coletadas com a versão II, definiu-se:

- Utilizar anéis de vedação *o'ring* entre os dutos de PR e a placa metálica, além de manter a mesma vedação entre a guia de válvula e a haste da válvula do cabeçote em produção.
- Rugosidade dos dutos produzidos em PR estão na mesma faixa de rugosidade do cabeçote em produção, dessa forma, o mesmo escoamento de ar será mantido no interior dos dutos.
- O pós tratamento aplicado nos dutos construídos no laboratório não alterou de forma significativa a rugosidade.

Durante a fase de testes com a versão II, ainda foi possível encontrar as seguintes melhorias no projeto:

- Dividir a base de apoio dos dutos em duas partes, permitindo dessa forma ensaios com rotações de 1,5° em torno do eixo Z, individualmente, sem a necessidade da impressão tridimensional de um novo duto.
- Visando otimizar a capacidade de ensaios com o mesmo duto no dispositivo, foi adicionado no projeto anéis espaçadores com 1mm de espessura para simulações de desvios no eixo Z.

8 VERSÃO III DO DISPOSITIVO

8.1 Projeto

Por dispensar trabalhos adicionais de limpeza após os ensaios, optou-se pela implementação de anéis de vedação *o'ring* para garantir a estanqueidade durante os ensaios ao invés da junta líquida utilizada anteriormente.

Anéis espaçadores foram incorporados no projeto, porém os mesmos só devem ser montados quando o intuito for simular desvios no eixo Z.

A figura 43, traz uma vista da versão III do dispositivo com as melhorias implementadas.

Figura 43 - Melhorias implementadas na versão III do dispositivo modular

Fonte: Autor

Como mencionado anteriormente e pode-se constatar na figura 43, na versão III os suportes dos dutos foram divididos em duas partes e ainda foi adicionado um sistema de vedação com anéis *o'ring*.

Essa divisão dos suportes dos dutos, permite a realização de ensaios com rotações em torno do eixo Z, individualmente, sem a necessidade da impressão tridimensional de um novo duto.

O sistema de vedação foi projetado de acordo com as recomendações da norma ISO3601 (2012), as especificações dos anéis selecionados encontram-se na figura 44.

Figura 44 - Percentual de compressão recomendável pelo ISO3601 e secção dos dutos montados com anéis *o'ring*

Fonte: Autor

Após a definição das dimensões dos canais conforme a norma ISO3601 (2012), foram selecionados para a vedação da base inferior o *o'ring* código ISO 032 e para a base superior o *o'ring* ISO 117.

A seleção dos *o'ring*s foi baseada no percentual de compressão recomendável, que pode ser visto na figura 44. O *o'ring* da base inferior possui um diâmetro da secção transversal de 1,78mm e a secção do *o'ring* da base superior possui um diâmetro da secção transversal de 2,82mm.

Considerando que os ensaios no bancada de fluxo são realizados em ambiente controlado, com temperatura de 20°C, após a busca no catálogo do fabricante Parker

foram selecionados *o'rings* com o polímero básico NBR (70 shore A de dureza), que são recomendados para operações entre -34°C à 120°C.

Ainda de acordo com o catálogo ORD 5700 (2007), as vedações são a prova de vazamento até pressões de 5000 psi ($3,5 \times 10^6$ mmH₂O).

O'rings utilizados durante os testes no laboratório, conforme designação do fabricante escolhido (Parker):

- *O'rings* da base inferior: NBR O-RING 2-032 N674-70
- *O'rings* da base superior: NBR O-RING 2-117 N674-70

8.2 Testes físicos da versão III

Conforme planejado previamente, na seção 4.3.1, os resultados dos testes físicos da versão III do dispositivo serão comparados com os resultados do cabeçote completo.

Todos os ensaios nessa etapa foram realizados com os dutos produzidos com a mesma geometria interna da unidade XY do cabeçote, que foi cortado e digitalizado. Esse cuidado foi necessário para assegurar que o método proposto fosse comparado com a mesma geometria do cabeçote completo.

Os resultados dos testes encontram-se no capítulo 6.

9 VALIDAÇÃO

9.1 Digitalização da unidade XY do cabeçote modelo A

Nessa etapa da pesquisa a unidade XY do cabeçote modelo A, testada anteriormente, foi cortada para que fosse possível acessar as geometrias dos dutos de admissão para digitalização.

A digitalização ocorreu em uma empresa que executa serviços específicos na área de engenharia reversa. O processo de digitalização gerou uma malha de pontos que foi importada para o ambiente CAD e os dutos de admissão foram criados com a mesma geometria da peça física.

Essa etapa foi necessária para comparar os resultados do cabeçote completo em bancada com os dados obtidos com um dispositivo que utiliza dutos de admissão gerados via PR.

A unidade XY do cabeçote modelo A foi cortada e depois digitalizada com o uso de equipamento Atos CS 5M⁴.

Esse equipamento captura imagens por contraste de luz e conta com o auxílio de pontos de referência adicionados na peça para menores desvios de medição (cálculo por triangulação dos pontos).

Os pontos são adicionados antes do cabeçote ser cortado, assim todas as referências são registradas pelo equipamento, figura 45:

⁴ Disponível em: <<http://www.gom.com/metrology-systems/atos/atos-compact-scan.html>>. Acesso em 07/11/2016

Figura 45 - Pontos de referência para a digitalização: antes e após o corte do cabeçote

Fonte: Autor

O equipamento é capaz de identificar os pontos registrados antes do corte do cabeçote, dessa forma é possível manter uma precisão de 0,005mm no processo de digitalização.

A figura 46 mostra o equipamento durante o processo de digitalização:

Figura 46 - Processo de digitalização

Fonte: Autor

A malha de pontos foi comparada com o modelo geométrico do cabeçote e seu posicionamento no modelo 3D utilizou como referência as faces usinadas, devido a sua melhor precisão se comparado com as regiões externas fundidas, figura 47.

Figura 47 - Alinhamento da malha de pontos no modelo geométrico do cabeçote modelo A

Fonte: Autor

As regiões sinalizadas na cor verde, indicam que a malha de pontos e o modelo geométrico do cabeçote não apresentam divergências.

As áreas da sede de válvula estão vermelhas, pois as mesmas foram removidas do modelo físico antes do processo de digitalização.

Nas figuras 48 e 49, compara-se a malha de pontos com o modelo geométrico na região dos dutos de admissão.

Figura 48 – Malha de pontos x modelo geométrico na região do duto reto

Fonte: Autor

Nota-se na figura 48 que o maior desvio encontrado entre a malha de pontos e o modelo geométrico do cabeçote, na região do duto reto de admissão, foi de aproximadamente 0,9mm.

Figura 49 – Malha de pontos x modelo geométrico na região do duto curvo

Fonte: Autor

Observa-se na figura 49 que o maior desvio encontrado entre a malha de pontos e o modelo geométrico do cabeçote, na região do duto curvo de admissão, foi de aproximadamente 1mm.

Após a malha de pontos ser importada no ambiente CAD, fechou-se um volume com a geometria interna dos dutos de admissão, que serviu como ferramenta de remoção de material nos modelos geométricos, figura 50.

Figura 50 – Malha de pontos x volume fechado no CAD

Fonte: Autor

9.2 Procedimento de fabricação dos dutos de PR

A menos que especificado no decorrer do trabalho, todos os dutos protótipos foram produzidos com o equipamento da figura 51, 3D Systems Project 360⁵:

Figura 51 - Impressora 3D Systems Project 360

Fonte: Autor

⁵ Disponível em: <<http://www.3dsystems.com/3d-printers/professional/projet-360>>. Acesso em 07/11/2016

Sequência para a fabricação dos dutos:

1. Exportar o arquivo do modelo geométrico (CAD) para a extensão STL.
2. Importar o arquivo para o *software* de controle da máquina.
3. Manter os dutos com a mesma posição dos dutos no eixo Z (região de encaixe na sede de válvula, paralela ao eixo Z, mostrou-se a melhor maneira de fabricar os protótipos).
4. Remover o excesso de material.
5. Aplicar a solução química para melhorar as propriedades mecânicas.
6. Esperar o tempo de secagem (aproximadamente 12 horas).

Antes de exportar o arquivo do modelo geométrico (CAD) para a extensão STL, é importante alterar a precisão do arquivo CAD original. A principal razão para alterar essa característica é evitar deformações principalmente nas formas cilíndricas do protótipo a ser impresso. O tempo de impressão tridimensional de cada par de dutos, foi de aproximadamente 8 horas.

A extensão STL vem do primeiro processo de prototipagem rápida denominado Estereolitografia, em inglês *StereoLithography*. Uma explicação detalhada sobre esse arquivo encontra-se na seção 3.2.

A razão para manter a região de encaixe dos dutos na sede de válvula do dispositivo (centro da válvula de admissão) paralela ao eixo Z na impressora 3D, é alinhar a altura dos dutos na bandeja de impressão, uma vez que, a precisão da impressora 3D diminui à medida que o protótipo ocupa uma área maior no eixo Z.

Após a impressão, foi aplicada uma solução química a base de epóxi para melhorar as propriedades mecânicas dos componentes.

Diferentes rugosidades podem ser obtidas em protótipos produzidos no mesmo equipamento, dependendo da solução química escolhida no pós tratamento da impressão tridimensional (GALETA; ŠIMUNOVIĆ; MAZUREK, 2015).

Em todos os dutos fabricados no laboratório as quantidades do componente reagente e da solução química a base de epóxi foram verificadas com o auxílio de uma balança digital, seguindo as recomendações de mistura do fabricante do equipamento. O material foi aplicado com um pincel, figura 52.

Figura 52 - Pós tratamento da PR

Fonte: Autor

9.3 Ensaios realizados com a PR da unidade XY do cabeçote modelo A

Foram produzidos 5 pares de dutos de admissão, impressos separadamente, com o intuito de incluir nas análises a variação do processo de produção da PR e validar os resultados obtidos nos ensaios estatisticamente.

Com as aquisições de dados do cabeçote, foi possível encontrar o desvio padrão do equipamento (0,02). Segundo Costa Neto (2002), pode-se determinar n , que é o tamanho da amostra se o desvio padrão for conhecido, com o uso da expressão abaixo:

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha/2} \sigma}{e_0} \right)^2 \quad (17)$$

Onde:

$Z_{\alpha/2}$ = valor crítico que corresponde ao grau de confiança desejado

σ = desvio padrão

e_0 = semi-amplitude do intervalo de confiança

Ao definir a precisão da estimativa desejada, estabelece-se o erro máximo, com a confiança adotada. Essa precisão equivale numericamente à própria semi-amplitude do intervalo de confiança (COSTA NETO, 2002).

Considerando uma precisão de 0,02 (e_0) e 95% de confiança ($Z_{\alpha/2} = Z_{2,5\%} = 1,96$), seria necessário uma amostra de 4 elementos para estimar a média da população. Diante do tempo de execução dos ensaios, decidiu-se construir 5 pares de dutos e realizar 40 ensaios.

O objetivo era realizar um total de 40 ensaios nos 5 pares, totalizando 8 ensaios por conjunto. No entanto, no último dia de medições, um dos dutos do par#4 quebrou após a colisão com o equipamento na etapa de montagem das molas de admissão (etapa 10 da sequência de montagem, descrito na figura 54). Distribuição dos ensaios:

- 1º dia: 4 ensaios por par, ensaios realizados em ordem crescente, do par#1 até o par#5.
- 2º dia: 2 ensaios por par, ensaios realizados em ordem crescente, do par#1 até o par#5.
- 3º dia: 2 ensaios por par, ensaios realizados em ordem crescente, do par#1 até o par#5. Com exceção do par#4 devido a razão mencionada anteriormente.

A figura 53, mostra os 5 pares utilizados para a validação do método proposto.

Figura 53 - Dutos de PR utilizados na validação

Fonte: Autor

Como o dispositivo é dividido em alguns componentes, a sequência de montagem do conjunto, figura 54, é composta das seguintes etapas:

1. Separar a base inferior e tapar o furo do injetor de combustível.
2. Posicionar os parafusos M6.
3. Posicionar os suportes do lado esquerdo e direito e travar na posição desejada com o pino. Caso seja simulado o deslocamento de 1mm em Z, os anéis espaçadores devem ser montados antes dos suportes dos dutos.
4. Montar os anéis *o'ring* nos dutos de admissão.
5. Montar o duto curvo.
6. Montar o duto reto.
7. Posicionar as colunas de sustentação.
8. Montar a base superior.
9. Montar as válvulas de admissão.
10. Aplicar uma carga para comprimir a mola e, com a mesma ainda comprimida, encaixar as pinças e o anel da válvula de admissão. Repetir o procedimento para as duas válvulas.
11. Montar o dispositivo no cilindro de ensaio.
12. Posicionar a ponte das válvulas de admissão e na sequência montar o sistema de controle de abertura e fechamento das válvulas. Aplicar no mínimo 10 Nm no torque de aperto nas porcas desse conjunto.

Figura 54 - Sequência de montagem

Fonte: Autor

Na sequência, pode-se visualizar os resultados dos três dias de ensaios:

Figura 55 - Abertura de válvula x torque nos ensaios da PR da unidade XY do cabeçote no 1º dia

Fonte: Autor

Nota-se na figura 55 que nenhuma variação significativa foi encontrada nos resultados da medição de torque pelo equipamento durante os ensaios da PR no 1º dia. Entre os 20 ensaios houve uma variação média de 7% entre o valor máximo e o mínimo do torque medido nas aberturas de 8mm à 15mm.

Figura 56 - Abertura de válvula x torque nos ensaios da PR da unidade XY do cabeçote no 2º dia

Fonte: Autor

Observa-se na figura 56 que a maior variação ocorreu na abertura de 7mm de válvula, onde a variação entre o valor máximo e o mínimo do torque medido foi de 30% (5,5 Nmm). Essa diferença foi entre o par#3 e par#4.

Figura 57 - Abertura de válvula x torque nos ensaios da PR da unidade XY do cabeçote no 3º dia

Fonte: Autor

Constata-se na figura 57 que nenhuma variação significativa foi encontrada nos resultados da medição de torque pelo equipamento durante os ensaios da PR no dia 03. Entre os 8 ensaios houve uma variação média de 6% entre o valor máximo e o mínimo do torque medido nas aberturas de 8mm à 15mm.

A tabelas 7 e 8 fornecem os resultados do número de *swirl* e do μ_{σ_m} , separados por pares e o resultado global considerando os 38 ensaios:

Tabela 7 - Resultados da PR da unidade XY do cabeçote modelo A (número de *swirl*)₁:

	Número de Swirl Par#1	Número de Swirl Par#2	Número de Swirl Par#3	Número de Swirl Par#4	Número de Swirl Par#5
ensaio 1	2,048	2,087	2,102	2,109	2,090
ensaio 2	2,039	2,083	2,095	2,091	2,076
ensaio 3	2,035	2,088	2,091	2,095	2,065
ensaio 4	2,026	2,078	2,106	2,104	2,061
ensaio 5	2,081	2,110	2,062	2,147	2,144
ensaio 6	2,072	2,114	2,073	2,141	2,125
ensaio 7	2,065	2,116	2,087	-	2,080
ensaio 8	2,055	2,108	2,081	-	2,093
média	2,052	2,098	2,087	2,115	2,092
máx	2,081	2,116	2,106	2,147	2,144
min	2,026	2,078	2,062	2,091	2,061
delta	0,055	0,038	0,044	0,056	0,083
Desvio Padrão	0,019	0,015	0,015	0,024	0,029
95% I.C.	0,013	0,011	0,014	0,019	0,020

Número de Swirl global		
Média	Desvio Padrão	95% I.C.
2,087	0,028	0,009

Fonte: Autor

De acordo com Costa Neto (2002), nos testes de aderência, a hipótese refere-se à forma de distribuição da população. Foi utilizado o método de *Kolmogorov-Smirnov*, para verificar a forma de distribuição dos resultados dos ensaios.

Como os mesmos apontaram uma distribuição normal, foi adotado a média e o desvio padrão para expressar os resultados.

A maior variação entre as medições do número de *swirl* ocorreu entre o par#1 e o par#4, onde entre o valor máximo e o mínimo, foi encontrada uma diferença de 5,6%.

Mesmo sendo fabricados 5 pares distintos de dutos em PR, com variações decorrentes do processo de fabricação, o método proposto apresentou um desvio padrão de 0,028 no final dos 38 ensaios.

Tabela 8 - Resultados da PR da unidade XY do cabeçote modelo A (μ_{σ_m}):

	μ_{σ_m} Par#1	μ_{σ_m} Par#2	μ_{σ_m} Par#3	μ_{σ_m} Par#4	μ_{σ_m} Par#5
ensaio 1	0,406	0,405	0,405	0,403	0,403
ensaio 2	0,406	0,405	0,405	0,403	0,403
ensaio 3	0,407	0,405	0,405	0,403	0,404
ensaio 4	0,407	0,406	0,405	0,403	0,404
ensaio 5	0,407	0,406	0,404	0,406	0,406
ensaio 6	0,407	0,407	0,405	0,407	0,405
ensaio 7	0,407	0,407	0,406	-	0,405
ensaio 8	0,408	0,407	0,406	-	0,404
média	0,407	0,406	0,405	0,404	0,404
máx	0,408	0,407	0,406	0,407	0,406
min	0,406	0,405	0,404	0,403	0,403
delta	0,002	0,002	0,002	0,004	0,003
Desvio Padrão	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001
95% I.C.	0,000	0,001	0,000	0,002	0,001

μ_{σ_m} global		
Média	Desvio Padrão	95% I.C.
0,405	0,001	0,000

Fonte: Autor

O valor do μ_{σ_m} manteve-se praticamente constante, apresentou um desvio padrão de 0,001 ao final dos 38 ensaios. Esse fato comprova que o sistema de vedação escolhido é adequado a aplicação, um vez que o dispositivo manteve um resultado do coeficiente médio de escoamento similar ao da unidade XY do cabeçote modelo A.

9.4 Análise dos resultados

O método proposto alcança o objetivo estabelecido inicialmente, de substituir um cabeçote completo, em ensaios de bancada de fluxo.

Diferenças no torque até ± 2 Nmm podem ser ocasionadas devido a precisão do equipamento de medição, o que justifica os desvios do cabeçote e o dispositivo modular com o uso de PR, entre 3mm e 10mm de abertura de válvula, figura 58:

Fonte: Autor

As figuras 59 e 60 apresentam a média global da unidade XY do cabeçote modelo A e da PR do mesmo:

Figura 59 - Torque x abertura de válvula (média dos ensaios da unidade XY do cabeçote modelo A) **Fonte:** Autor

Verifica-se na figura 59 que nenhuma variação significativa foi encontrada nos resultados da medição de torque pelo equipamento durante os ensaios com o cabeçote modelo A. Entre a média dos 4 dias de ensaio, houve uma variação média de 1% entre o valor máximo e o mínimo do torque medido nas aberturas de 4mm à 15mm.

Figura 60 - Torque x abertura de válvula (média dos ensaios da PR da unidade XY do cabeçote) **Fonte:** Autor

Constata-se na figura 60 que nenhuma variação significativa foi encontrada nos resultados da medição de torque pelo equipamento durante os ensaios com os dutos de PR. Entre a média dos 03 dias de ensaio, houve uma variação média de 8% entre o valor máximo e o mínimo do torque medido nas aberturas de 04mm à 15mm.

Na figura 61, pode-se comparar os resultados do torque em função da abertura de válvula para a unidade XY do cabeçote e da PR com a mesma geometria.

Figura 61 - Torque x abertura de válvula (média global dos ensaios)

Fonte: Autor

Observa-se na figura 61 que a maior variação ocorreu na abertura de 8mm de válvula, onde a variação entre o valor máximo e o mínimo do torque medido foi de 20% (5,4 Nmm).

Considerando os desvios dos torques medidos entre as aberturas de 4mm à 12mm, foi encontrada uma diferença média no torque de 2,6 Nmm ou 15%. Com exceção da abertura de 8mm de válvula, todos os demais desvios encontram-se dentro da faixa de precisão do equipamento de medição, que é de ± 2 Nmm.

Tabela 9 - Resumo dos resultados

Descrição	Número de <i>Swirl</i> global			μ_{σ_m} global		
	Média	Desvio Padrão	95% I.C.	Média	Desvio Padrão	95% I.C.
Unidade XY do cabeçote modelo A	2,081	0,020	0,006	0,413	0,001	0,000
Dutos PR	2,087	0,028	0,009	0,405	0,001	0,000

Fonte: Autor

Quando realizou-se o teste de comparação de médias (teste T de uma amostra), observou-se que não existem diferenças estatisticamente significantes nos resultados do número de *swirl*. Resultado estatístico das análises:

- Número de *swirl* (2,081):
 - Diferença média = 0,0064
 - 95% I.C. da diferença: Inferior= -0,00285 / Superior= 0,01575
- Coeficiente de escoamento médio μ_{σ_m} (0,413):
 - Diferença média = -0,0076
 - 95% I.C. da diferença: Inferior= -0,0081 / Superior= -0,0719

Para as análises estatísticas dos resultados obtidos, nos 38 ensaios com os dutos produzidos em PR, foi realizado um comparativo entre a média dos resultados do número de *swirl* e do μ_{σ_m} da unidade XY do cabeçote modelo A e dos dutos de PR.

O método proposto de ensaio e de fabricação dos dutos em PR é capaz de representar o escoamento do ar na admissão em bancada de fluxo. A precisão do equipamento de medição e as variações decorrentes do processo de fabricação dos 5 pares usados na validação não geraram diferenças estatisticamente significativas no número de *swirl*.

Para a análise e interpretação dos dados estatísticos foi utilizado o *software* SPSS 20.0 (*Statistical Package for the Social Sciences*) (IBM Corp. Released, 2011).

10 DISCUSSÃO

Conforme citado anteriormente, o desenvolvimento do projeto foi incremental, ou seja, as melhorias foram implementadas ao longo do seu desenvolvimento. A figura 62, mostra as três versões do dispositivo que foram construídas no presente trabalho.

Figura 62 – Evolução do projeto

Fonte: Autor

A versão III do dispositivo cumpriu todos os objetivos estabelecidos no projeto de verificação de desvios de fabricação e deslocamentos em torno dos eixos X, Y e Z. Ainda os suportes de apoio dos dutos de PR foram divididos em duas partes para permitir rotações individuais em torno do eixo Z, sem a necessidade de fabricação de um novo duto protótipo.

A definição do conceito e desenvolvimento do dispositivo com a utilização de dutos em PR foi uma tarefa complexa, visto que não foram encontrados trabalhos com uma abordagem similar.

Na figura 63, pode-se identificar na esquerda o dispositivo utilizado no trabalho de Lu et al (2014) e a direita o resultado do presente trabalho.

Figura 63 – Dispositivo usinado x dispositivo modular com o uso de PR

Fonte: Autor

No dispositivo localizado a esquerda na figura 63, não é possível verificar diferentes desvios de fabricação no cabeçote individualmente (deslocamentos e rotações no eixo Z), uma desvantagem com relação ao método proposto.

Outra vantagem do dispositivo modular, por utilizar dutos produzidos em PR, é não possuir limitações de geometria no processo de fabricação.

Em Shuliang, et al. (2001), para cada desvio simulado, uma nova base usinada é necessária.

Castilla, Fernández e Montanero (2016), mediu o número de *swirl* em amostras do cabeçote em produção para posterior validação do modelo virtual (simulação CFD). Seu objetivo foi simular defeitos através de cálculos numéricos e, através de regressão linear determinar a equação que descreve o resultado do número de *swirl* em função das geometrias dos dutos.

O ideal é determinar as tolerâncias de forma e posição dos dutos de admissão no início do desenvolvimento de um novo cabeçote. Essa tarefa é uma possibilidade com o dispositivo proposto no presente trabalho, uma vez que, é possível mensurar os

impactos dos potenciais desvios de fabricação dos dutos de admissão do cabeçote no número de *swirl* de forma controlada em bancada de fluxo.

O método proposto oferece algumas vantagens sobre outros ensaios realizados anteriormente para a simulação de desvios durante o processo de fabricação:

- Permite simulações individuais ou simultânea dos dutos de admissão.
- Todo o processo pode ser executado dentro da empresa, o que aumenta o sigilo durante um novo desenvolvimento.
- Rapidez para criar novos modelos e testar na bancada: nos modelos em questão foram necessários aproximadamente 8 horas para a confecção da peça na impressora 3D, sem considerar o pós tratamento (em 24h é possível testar uma nova configuração).

Principais limitações do método proposto:

- Resistência mecânica dos dutos produzidos na impressora 3D.
- Desconhecimento da estabilidade dimensional e durabilidade dos dutos produzidos com impressão 3D.
- As sedes de válvula no dispositivo são montadas por interferência e a sua remoção e montagem não é uma tarefa simples. A remoção da válvula deve ser realizada com o uso de uma prensa hidráulica e após a sua remoção, em consequência das tolerâncias especificadas de forma e posição, é necessário montar uma nova sede de válvula e refazer o chanfro em um centro de usinagem.
- Posicionamento do centro da válvula de admissão nas bases usinadas, o que em caso de alteração da disposição dos centros das válvulas de admissão requer a fabricação de um novo dispositivo.

11 CONCLUSÕES

Como resultado do trabalho, é apresentado um dispositivo que dispensa o uso de um cabeçote protótipo completo para ensaios de escoamento em bancada de fluxo. Os dados obtidos nos ensaios com o dispositivo utilizando dutos em PR com a mesma geometria do cabeçote foram comparados com os resultados do cabeçote completo e, não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas.

Através das análises estatísticas dos resultados do cabeçote e do dispositivo utilizando dutos de admissão produzidos via PR, é possível afirmar que o objetivo estabelecido de substituir um cabeçote completo para ensaios de bancada foi alcançado, pois observou-se uma diferença média de 0,0064 no número *swirl* entre os ensaios com o cabeçote completo e os ensaios realizados com o dispositivo proposto.

Os resultados alcançados são satisfatórios, pois conforme observa-se em Lu et. al. (2014) e Castilla, Fernández e Montanero (2016) a tolerância permitida pelo fabricante do motor no número de *swirl*, é de 10% de variação do valor nominal (+/- 5%).

Desvios de forma, posição e usinagem podem ser verificados com os dutos produzidos em PR e testados na bancada de fluxo com o dispositivo proposto, esses desvios são importantes para compreender a tendência de variação do *swirl* em função dos potenciais erros do processo de fabricação. A verificação do impactos desses desvios no número de *swirl* é uma ferramenta útil para a definição adequada dos tolerâncias de fabricação.

A engenharia do produto é capaz de realizar um DOE (*Design of Experiment*) dos casos mais relevantes em simulações virtuais com o dispositivo proposto e dessa forma, compreender a tendência de variação dos resultados do número de *swirl* em função das geometrias dos dutos e validar as condições de contorno adotadas nas simulações virtuais.

Apesar de verificado no laboratório, os deslocamentos de rotação e translação no eixo Z, não foram adicionados no trabalho, pois não se tratava do objetivo central do estudo.

Com o uso do dispositivo detalhado no trabalho, é possível que um profissional substitua os dutos para novos ensaios, sem a necessidade de ferramentas especiais e em curto espaço de tempo: são necessários aproximadamente 5 minutos para desmontar e montar uma nova configuração de dutos no dispositivo (uma vez que os dutos já estejam disponíveis).

A principal limitação do desenvolvimento do trabalho é a utilização de dutos fabricados em PR, impressão tridimensional, sem as sedes de válvula integradas aos dutos de admissão. Essa limitação foi uma consequência das propriedades mecânicas do método selecionado.

Como ponto crítico do desenvolvimento, pode-se mencionar a escassez de publicações com aplicações similares de dispositivos ao proposto no presente trabalho. Fato que contribuiu para que fossem construídas 3 versões do dispositivo para que o resultado esperado fosse alcançado.

Todas as análises do número de *swirl* foram realizadas em uma bancada com o uso de uma colmeia retificadora de fluxo, único procedimento disponível no laboratório durante o desenvolvimento do trabalho. Se fosse possível, as medições seriam executadas com o uso de velocimetria por imagem de partículas – PIV, de *Particle Image Velocimetry*.

A utilização de PIV permitiria a comparação do comportamento cinemático do escoamento nos dutos de admissão do dispositivo proposto e o cabeçote completo.

O presente trabalho atingiu o objetivo de criar e validar um método para simulação de defeitos e/ou análise de novas geometrias dos dutos de admissão, utilizando dutos de admissão produzidos via PR.

12 SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Incorporar as sedes de válvula nos dutos de admissão, de tal maneira que, diferentes geometrias possam ser avaliadas em conjunto com os dutos de admissão na bancada. Em consequências das propriedades mecânicas dos dutos produzidos na impressora tridimensional, as solicitações mecânicas são suportadas pelas bases metálicas e as colunas de sustentação.

No presente projeto as válvulas são montadas por interferência e, conforme detalhado no capítulo 10, a sua remoção e montagem não é uma tarefa simples. A incorporação das sedes nos dutos enriqueceria as análises na etapa inicial do desenvolvimento de um novo cabeçote, uma vez que a geometria das sedes também influenciam no resultado do escoamento em bancada de fluxo.

A integração das sedes de válvula nos dutos de admissão seria possível no caso da utilização de métodos que proporcionem maior resistência mecânica, como por exemplo a impressão direta de metal- DMP de *Direct Metal Printing*⁶.

Desenvolver um projeto com uma nova geometria de dutos de admissão objetivando minimizar a sensibilidade aos desvios de produção. Similar à Kawaguchi (2009), que através de simulações otimizou os dutos de admissão de forma que o número de *swirl* não fosse sensível as variações do processo de produção.

Para esse projeto a sugestão é avaliar inicialmente as geometrias com simulações de CFD e validar os resultados com ensaios em bancadas utilizando dutos construídos com PR. Durante as simulações e ensaios físicos compreender quais alterações possuem um peso maior para minimizar a sensibilidade aos desvios de produção.

Pesquisar materiais alternativos de prototipagem rápida que proporcionem uma melhor resistência mecânica, permitindo dessa forma que o dispositivo modular seja testado em uma bancada monocilíndrica para a avaliação da combustão e não apenas a realização de ensaios de *swirl*.

⁶ Disponível em: <<http://www.3dsystems.com/quickparts/prototyping-pre-production/directmetalprinting-dmp>>. Acesso em 28/11/2016

Com a implementação dessa sugestão será possível a compreensão não apenas a tendência de variação do número de *swirl* em função dos potenciais desvios do processo de fabricação, como também a otimização do processo de combustão na bancada monocilíndrica e avaliar os impactos de diferentes geometrias de admissão nas emissões.

REFERÊNCIAS

BEARD, C.A. **Inlet and Exhaust Systems, Capítulo 9 em Diesel Engine Reference Book**. 2 ed. Oxford: Butterworths, 1999.

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna**. Vol. 1 e 2. São Paulo: Blucher, 2012.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos**. 2 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall. 2008

CASTILLA, A.; FERNÁNDEZ, J.; MONTANERO, J.M. **Influence of the manufacturing process tolerance on the swirl number of a low-capacity engine**. Journal of Manufacturing Systems, v. 41, p. 157–164, 2016

CUSSENS. Disponível em:

<<http://www.cussons.co.uk/products/automotive/instrumentation-accessories.php?s=p7300p7302-impulse-swirl-meter-range>>. Acesso em 07 de Novembro de 2016.

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**, 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002

CHUA, C. K.; LEONG, K. F.; LIM, C. S. **Rapid Prototyping**, 3 ed. Singapura: World Scientific, 2010.

DIN 4766. **Surface roughness associated with types of Part 2 manufacturing method**; Attainable arithmetical mean value Ra according to DIN 4768 Part 1. 1981

FERGUSON, C.R.; KIRKPATRICK, A.T. **Internal combustion engines: applied thermodynamics**. John Wiley & Sons, Inc., 2001

GALETA, T.; ŠIMUNOVIĆ, G.; MAZUREK, M. **Impact of strengthening fluids on roughness of 3D printed models**. Metallurgy, v. 54, p. 231-234, 2015

GUO, N.; LEU, M.C. **Additive manufacturing: technology, applications and research needs**. 3 ed. Frontiers of Mechanical Engineering, v. 8, p. 215-243, 2013

GÜNTHER, D.; HEYMEL, B.; GÜNTHER, J. F.; EDERER, I. **Continuous 3D-printing for additive manufacturing**. Rapid Prototyping Journal. 4ª ed., v. 20, p.320-327, 2014

HAGUE, R.; SAEED, M.; NAGUIB, S. **Design opportunities with rapid manufacturing**. Assembly Automation, v. 23, 2003

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. McGraw-Hill, 1988.

IBM Corp. Released 2011. **IBM SPSS Statistics for Windows**, Versão 20.0. Armonk, Nova Iorque: IBM Corp.

ILLARDO, R.; WILLIAMS, C. B. **Design and manufacture of a Formula SAE intake system using fused deposition modeling and fiber-reinforced composite materials**. 3 ed. Rapid Prototyping Journal, v. 16, p. 174–179. 2010

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Excerpt from CO2 emissions from fuel combustion**. 2016

ISO 3601 **Fluid Power Systems – O-rings - Part 1: Inside diameters, cross-sections, tolerances and designation codes**. 2012

ISO 3601 **Fluid Power Systems – O-rings - Part 2: Housing dimensions for general applications**. 2012

KAMINSKI, P.C. **Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade**, Editora LTC, Rio de Janeiro, 2014

KAWAGUCHI, A.; AIBA, T.; TAKADA. **A Robustness-Focus Shape Optimization Method for Intake Ports**. SAE Paper No. 2009-01-1777.

KAMRANI, A.K.; NASR, E.A. **Engineering Design and Rapid Prototyping**, New York: Springer, 2010.

LU, Z.; WANG, T.; LIU, S.; LIN, Z.; HAN, Y. **Experimental and modeling study of the effect of manufacturing deviations on the flow characteristics of tangential intake port in a diesel engine**. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 2014, v.136/112101

Manual de O'Ring – Parker ORD 5700. Disponível em:

< http://www.parker.com/parkerimages/br/download/seal/pdf/5700_br.pdf >. Acesso em 20 de Junho de 2016.

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**; tradução 4ª ed. Americana: Euryale de Jesus Zerbini. São Paulo: Edgar Blücher, 2004.

OTTOSSON, S.; HOLMBERG, T. **The Effect of Different Valve Strategies on In-Cylinder Flow, Emissions and Performance in a Heavy Duty Diesel Engine**. 2011. Dissertação (Mestrado), KTH Royal Institute of Technology, Estocolmo

PASTOR, J.V.; MARGOT, X.; GIL, A.; DONAYRE, J.C. **A methodology to estimate the swirl number at TDC in DI diesel engines: through the combination of CFD and steady flow rig results**. SAE Technical Paper 2004-01-1876, 2004.

PITCHER, G.; BINJUWAIR, S.; TURBERVILL, T.P.; WOOD, A.; WIGLEY, G.; HOLLIS, D., **LDA and PIV Analysis and Comparison of In-Cylinder Flow Structures under Steady Flow Conditions**. 15th Int. Symp on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisboa, 2010.

PULKRABEK, W. W. **Engineering fundamentals of the internal combustion engine**. Prentice Hall – Upper Saddle River, 1997.

REITZ, R. D. **Directions in internal combustion engine research**. Combustion and Flame, v. 160, p. 1–8, 2013

SILVA, G. C. **Modelo de referência para o processo de desenvolvimento de produto automotivo e diretrizes para seleção de protótipos virtuais e físicos**. 2013. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica, São Paulo.

SHULIANG, L.; YUFENG, L.; ZHENZHONG, X.; LIHONG, R.; and HAODONG, X. **An Investigation of the Effects of Manufacturing Deviations of Helical Inlet Port on the Flow Characteristics of DI Diesel Engines**. SAE Paper No. 2001-01-3507, 2001

SÖDER, M., **Creation and destruction of in-cylinder flows; Large eddy simulations of the intake and the compression strokes**. 2015. Tese (Doutorado) - Engenharia Mecânica, KTH Royal Institute of Technology, Estocolmo

DE STEFANO, M. C.; MONTES-SANCHO, M. J.; BUSCH, T., **A natural resource-based view of climate change: Innovation challenges in the automobile industry**. Journal of Cleaner Production v.139, p. 1436-1448, 2016

STONE, C. R.; LADOMMATOS. **The Measurement and Analysis of Swirl in Steady Flow**. SAE paper No. 921642, 1992

SWIFT, K. G.; BOOKER, J. D. **Process Selection: from design to manufacture**. 2 ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003

TIPPELMANN, G. **A New Method of Investigation of Swirl Ports**, SAE paper No. 770404, 1977.

VANHAELEST, R.; CZAJKA, J. **Development of an optical sensor for determination of swirl level in diesel engines**. 2nd Conference on Engine Processes Proceedings, Jul/2015, Berlin

VOLPATO, et al. **Prototipagem Rápida: tecnologias e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2007

APÊNDICE A – Dimensões importantes na construção de um dispositivo modular para ensaios de medição do número de *swirl* com o uso de PR

Visando a construção de um dispositivo modular que permita simulações de desvios de produção (fundição ou usinagem) ou que auxilie no desenvolvimento de novos cabeçote, deve-se manter como premissas de projeto:

- Tolerância de forma e posição para as guias e sedes de válvula, ação necessária para garantir que a os resultados obtidos em laboratório, corresponderão no futuro ao cabeçote fundido.
- Posição do pino guia para auxiliar na abertura e fechamento das válvulas e mesma interface da guia de válvula para permitir a montagem da mesma vedação da haste da válvula utilizada na produção em escala do cabeçote, figura 64.

Figura 64 - Pino guia, guias de válvula e vedação da haste da válvula

Fonte: Autor

- Disposição de furos e altura do cabeçote: ideal para utilizar o mesmo mecanismo de abertura e fechamento de válvulas tanto para o cabeçote quanto o dispositivo com dutos em PR:

Figura 65 - Cabeçote modelo A (esquerda) e dispositivo modular (direita) montados no cilindro de ensaio

Fonte: Autor

- Utilizar os mesmos furos de localização do cabeçote, para assegurar a montagem no cilindro de ensaio

Figura 66 - Disposição dos pinos guia do cilindro de ensaio

Fonte: Autor

APÊNDICE B – Desenhos do dispositivo

Item	Identificação	Descrição	Quantidade
01	51994839	Conjunto base inferior	01
02	52012570	Anel espaçador	01
03	52012655	Anel espaçador	02
04	51984425	Suporte lado direito	01
05	51984426	Suporte lado esquerdo	01
06	ISO4014 - M6x30	Parafuso sextavado	02
07	ISO7089 - 6,4x12x1,6	Arruela	02
08	ISO4032 - M6	Porca sextavada	02
09	ISO8734 - 6x22	Pino	02
10	ISO3601 - 032	O'ring	02
11	ISO3601 - 117	O'ring	02
12	51984427	Duto de admissão curvo	01
13	51984428	Duto de admissão reto	01
14	51740323	Coluna de sustentação	03
15	51994840	Conjunto base superior	01
16	1887056	Válvula de admissão	02
17	1519700	Mola	02
18	1488787	Pinça	04
19	1528550	Arruela da válvula de admissão	02

OBS: itens 02 e 03, devem ser montados somente quando o objetivo do ensaio for simulação de desvio no eixo Z.

Alter.	Zona	Descrição alteração	3D	Data	Resp.
<div>1ºDiedro</div> <div></div> <div>Escala</div> <div>1:2</div> <div>Material</div>			Tolerância geral		
Engenheiro responsável					
Descrição			Identificação		
Dispositivo modular SWIRL			52051552		
Projeto			Data	Folha	
Dispositivo modular SWIRL			26-06-2016	1	(1)

52051552

Observação: assento de válvula deve ser resfriado a $-50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ e montado na base inferior dentro de 15 seg.

Corte A-A
Escala 1:1

51994839

Alter.	Zona	Descriçao alteração			3D	Data	Resp.
1ºDiedro			Escala 1:2	Material	Tolerância geral		
Engenheiro responsável GUSTAVO MARTIOLI
Descrição Conjunto base inferior					Identificação 51994839		
Projeto Dispositivo modular SWIRL					Data 26-06-2016	Folha 1 (1)

Corte A-A

Alter.	Zona	Descrição alteração			3D	Data	Resp.
1ºDiedro				Escala	Material	Tolerância geral	
		1:2					
Engenheiro responsável
GUSTAVO MARTIOLI							
Descrição						Identificação	
Conjunto base superior						51994840	
Projeto						Data	Folha
Dispositivo modular SWIRL						26-06-2016	1 (1)

F

E

D

C

B

A

F

E

D

C

B

A

51990679

Corte B-B

Dimensões não especificadas devem ser tomadas a partir do modelo 3D.

Tolerâncias gerais, exceto quando indicado de outra forma	
Dimensão linear	Dimensão angular
Tamanho básico	Tolerância
0 - 30	±0,3
(30) - 120	±0,5
(120) - 315	±0,7
(315) - 630	±1
(630) - 1250	±1,5
(1250) -	±2,2
	±2°

Alter.	Zona	Descrição alteração	3D	Data	Resp.
1°	Diedro	Escala	Material	Tolerância geral	
		1:2	Alumínio 7075		
Engenheiro responsável				Identificação	
GUSTAVO MARTIOLI				51990679	
Descrição				Data	
Base superior				26-06-2016	
Projeto				Folha	
Dispositivo modular SWIRL				1 (1)	

Vista isométrica

Corte A-A

Alter.	Zona	Descrição alteração	3D	Data	Resp.
--------	------	---------------------	----	------	-------

1ºDiedro		Escala 2:1	Material Aço inox 420	Tolerância geral	
Engenheiro responsável GUSTAVO MARTIOLI				G F M	
Descrição Guia de válvula				Identificação 51994043	
Projeto Dispositivo modular <i>SWIRL</i>				Data 26-06-2016	Folha 1 (1)

Alter.	Zona	Descrição alteração			3D	Data	Resp.
1ºDiedro			Escala	Material	Tolerância geral		
		1:1	Aço inox 420				
Engenheiro responsável
GUSTAVO MARTIOLI							
Descrição					Identificação		
Pino guia					51740552		
Projeto					Data	Folha	
Dispositivo modular SWIRL					26-06-2016	1 (1)	

51740552

51740323

Detalhe A
Escala 2:1

Alter.	Zona	Descrição alteração	3D	Data	Resp.
1ºDiedro			Escala 1:1	Material Aço inox 420	Tolerância geral ±1
Engenheiro responsável GUSTAVO MARTIOLI					
Descrição Coluna de sustentação					Identificação 51740323
Projeto Dispositivo modular SWIRL				Data 26-06-2016	Folha 1 (1)

Vista isométrica

Alter.	Zona	Descrição alteração			3D	Data	Resp.
1°Diedro			Escala	Material	Tolerância geral		
			1:2	Alumínio 7075	±1 ±1°		
Engenheiro responsável
GUSTAVO MARTIOLI							
Descrição					Identificação		
Suporte lado direito					51984425		
Projeto					Data	Folha	
Dispositivo modular SWIRL					26-06-2016	1 (1)

Vista isométrica

Alter.	Zona	Descrição alteração	3D	Data	Resp.
1ºDiedro		Escala 1:2	Material Alumínio 7075	Tolerância geral ±1 ±1°	
Engenheiro responsável GUSTAVO MARTIOLI
Descrição Suporte lado esquerdo					
Projeto Dispositivo modular SWIRL				Data 26-06-2016	Folha 1 (1)

51984426

52012570

Alter.	Zona	Descrição alteração		3D	Data	Resp.
1ºDiedro		Escala	Material	Tolerância geral $\pm 0,15$		
		1:2	Alumínio 1100 H14			
Engenheiro responsável				G F M		
GUSTAVO MARTIOLI				Identificação		
Descrição				52012570		
Anel espaçador						
Projeto				Data	Folha	
Dispositivo modular SWIRL				26-06-2016	1	(1)

A3

52012655

Vista isométrica

Alter.	Zona	Descrição alteração	3D	Data	Resp.
1ºDiedro			Escala	Material	Tolerância geral
Engenheiro responsável			1:1	Alumínio 1100 H14	±0,15
GUSTAVO MARTIOLI
Descrição			Identificação		
Anel espaçador			52012655		
Projeto			Data	Folha	
Dispositivo modular SWIRL			26-06-2016	1	(1)