



ConBRepro

XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

I CIGELUBRA

Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro

04 a 06 de dezembro de 2024

Energias Limpas nas Engenharias

Análise de vazamento nas sedes de válvulas de cabeçotes do motor através do Sistema Shainin

Reinaldo Dablander

Engenharia de Produção – Universidade Federal do ABC

Ricardo Henrique Parizotto

Engenharia de Produção – Universidade Federal do ABC

Ugo Ibusuki

Engenharia de Produção – Universidade Federal do ABC

Resumo: O principal objetivo deste artigo é analisar as causas de vazamento em sedes de válvulas de cabeçotes de motor utilizando os métodos WOW (Worst of the Worst) e BOB (Best of the Best). A pesquisa busca identificar as características críticas que causam o problema e fornece uma base para ações corretivas. O estudo de caso foi realizado em uma linha de montagem de cabeçotes de motor, onde foram identificados e analisados cabeçotes com diferentes níveis de vazamento. Foram realizados testes de estanqueidade e medições detalhadas das características das válvulas e sedes. Os resultados indicam que o problema de vazamento está relacionado às sedes de válvulas, particularmente nos ângulos e diâmetros fora das especificações. A troca de válvulas entre cabeçotes WOW e BOB confirmou que o problema está nas sedes, não nas válvulas. A metodologia aplicada se mostrou eficaz para esse estudo, porém para outros casos outras ferramentas podem ser mais eficientes. Os resultados fornecem subsídios para melhorias no processo de fabricação de cabeçotes de motor, sugerindo a necessidade de um controle mais rigoroso das características das sedes de válvulas e a reavaliação da inspeção de recebimento. Este artigo contribui para a literatura ao aplicar métodos específicos de análise de falhas, como WOW e BOB, em um contexto de manufatura automotiva, oferecendo uma abordagem prática para a identificação de causas raízes de vazamento em cabeçotes de motor.

Palavras-chave: Bob, Wow, Shainin System.

Valve seats Leak analysis of cylinder heads through the Shainin System

Abstract: The main objective of this article is to analyze the causes of leakage in cylinder head valve seats using the WOW (Worst of the Worst) and BOB (Best of the Best) methods. The survey seeks to identify the critical characteristics that cause the problem and provides a basis for corrective actions. The case study was carried out in an assembly line of engine heads, where heads with different levels of leakage were identified and analyzed. Leak tests and detailed measurements of the characteristics of the valves and seats were carried out. The results indicate that the leakage problem is related to the valve seats, particularly in the out-of-spec angles and diameters. Changing valves between WOW and BOB heads confirmed that the problem is with the seats, not the valves. The methodology applied proved to be effective for this study, but for other cases other tools may be more efficient.

Keywords: Bob, Wow, Shainin System.

1. Introdução

O sistema Shainin é um método prático de resolução de problemas para a indústria atual que opera em produção em massa, operando em alta velocidade e quantidades muito grandes e 24 horas por dia. O Sistema Shainin (SS) é eficaz para uso na fabricação para determinar a causa raiz dos problemas. Os estágios exclusivos dentro do SS são uma técnica fácil e barata para determinar o fator dominante, que parte da geração de evidências para a definição do problema, realizando várias comparações do pior dos piores grupos (WOW) com o melhor dos melhores grupos (BOB). Também é simples de ser compreendido por engenheiros e trabalhadores de chão de fábrica, pois é lógico com base em ciência básica e conhecimento de engenharia. A abordagem SS é considerada mais direta do que as outras abordagens DOE existentes, como o método de superfície de resposta, o método fatorial e o conhecido método ortogonal de Taguchi, e ainda é uma coleção poderosa de ferramentas para fornecer soluções práticas para os problemas industriais crônicos enfrentados pelos fabricantes **(NAIL, 2019)**. O SS é uma coleção de sete ferramentas vitais, a saber, gráficos multivariados, busca de componentes, comparação pareada, busca de variáveis, fatoriais completos, melhor análise versus análise atual e gráficos de paralelogramo de tolerância realista **(NAIL, 2019)**. As ferramentas do SS são simples e requerem cálculo matemático básico, eliminando assim a necessidade de pacotes de software estatístico de ponta. Nesse estudo adotamos o SS, em função da alta demanda, operar 24 horas por dia, dificultando a intervenção no processo, afetando a produtividade e pela praticidade, rapidez, ser fácil barata e poder ser aplicada diretamente no chão de fábrica. Na produção de cabeçotes de motor verificou-se um repentino aumento nos vazamentos entre sedes de válvulas e válvulas, estaremos analisando as causas raízes desse vazamento, utilizando o método SS. A metodologia aplicada será a de “WoW” e “BoB”. Esse artigo está dividido quatro seções, a primeira será a metodologia, aplicação do SS, com a troca entre as válvulas “WoW” com as “BoB”, segunda seção, análise de resultados, terceira seção conclusão e por final as referências.

2. Metodologia

O estudo de caso será baseado no Shainin System, em função de ser um estudo prático, fácil, barata, que pode ser aplicada principalmente no chão de fábrica em uma produção em 3 turnos. Seguiremos os seguintes passos: 3.1. Objeto de estudo, 3.2 Identificação dos cabeçotes, 3.3 Características Críticas, 3.4 Procedimento, 3.5 Análise dos Resultados, 3.6 Escolha dos “WOW e “BOB”, 3.7 Procedimento para identificação da causa raiz, 3.8 Medição das sedes e válvulas.

2.1. Objeto de estudo

O estudo de caso se baseia em um cabeçote SOHC (simple over-head camshaft), comando de válvulas simples sobre o cabeçote, de quatro cilindros, conforme figura 1. O comando de válvulas aciona as válvulas para abertura e fechamento; a sede de válvula de admissão, é a maior, visto que a admissão se dá pela sucção de ar e a de escape a menor, pois a exaustão é forçada pela ação dos pistões, conforme figura 2.

Figura 1 – Foto de um cabeçote 2.0 L



Fonte: Autoria própria

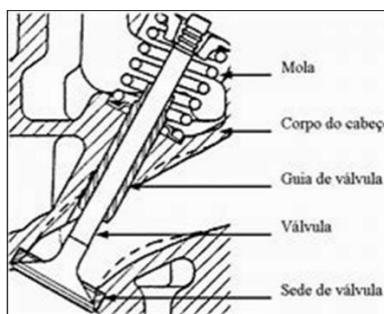
Figura 2 – Foto de um cabeçote 2.0 L: detalhe do conjunto válvula e sede de válvulas



Fonte: Autoria própria

Para uma perfeita combustão, é necessário que a câmara de combustão seja estanque, com o mínimo de vazamento possível. No caso do cabeçote o mais provável é que esse vazamento se dê, pelo acoplamento entre válvula e sede de válvula. A folga entre guia e haste da válvula, pode causar um mau alinhamento e por consequência acoplamento não estanque entre sede e válvula, por isso também se faz necessário observar essa característica, conforme figura 3 e as tolerâncias conforme tabela 1.

Figura 3 – Desenho em corte do cabeçote, mostrando o conjunto de peças para o funcionamento da abertura e fechamento das válvulas.



Fonte: Researchgate adaptado de Volvo, 2006 <https://remafe.com.br/wp-content/uploads/2023/04/volvo-2006.png>

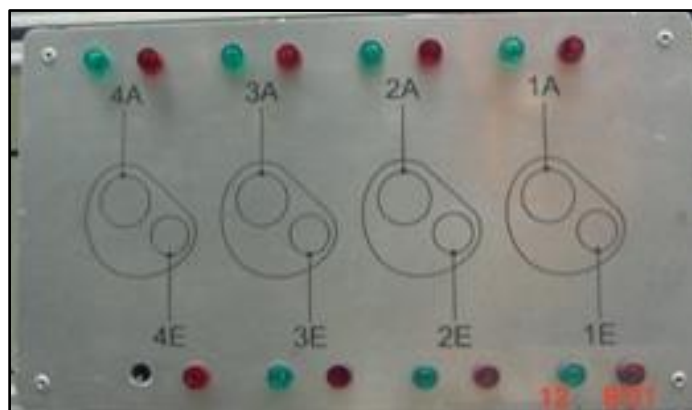
Tabela 1 – Tolerâncias das medidas a serem monitoradas.

<u>válvula</u>	<u>unidade</u>	<u>admissão:</u>	<u>escape:</u>
		<u>tolerância</u>	<u>tolerância</u>
diâmetro da haste	mm	6,998-7,012	6,978-6,992
diâmetro da sede da válvula	mm	41,65-41,95	36,30-36,70
circularidade da sede	mm	0,006	0,006
cilindricidade da haste	mm	0,01	0,01
batimento da sede	mm	0,03	0,03
rugosidade da sede	µm	0,8	0,8
ângulo	graus	91,75 - 92,75	91,75 - 92,75
<u>sede do cabeçote</u>	<u>unidade</u>	<u>admissão</u>	<u>escape</u>
		<u>tolerância</u>	<u>tolerância</u>
vazão	cm3/min	<= 700	<= 700
diâmetro da guia	mm	7,03-7,05	7,03-7,05
diâmetro de gauge	mm	40,7-40,8	35,4-35,5
ângulo de gauge	graus	89,0-91,0	89,0-91,0
cilindricidade da guia	mm	0,005	0,005
circularidade da sede	mm	0,015	0,015
batimento da sede	mm	0,05	0,05
rugosidade da sede	µm	15	15
folga entre guia e haste	mm	0,018-0,052	0,038-0,072

Fonte: Autoria própria

O teste de estanqueidade mostra se a válvula de admissão “A” e a de escape “E” dos quatro cilindros/válvulas foram aprovados, luz verde, ou reprovados, luz vermelha os valores podem ser retirados do painel de controle, conforme figura 4 e a medição conforme tabela 2.

Figura 4 – Painel de controle de aprovação, ou não, do teste de estanqueidade.



Fonte: Autoria própria

Tabela 2 – Medição III cabeçote “L”

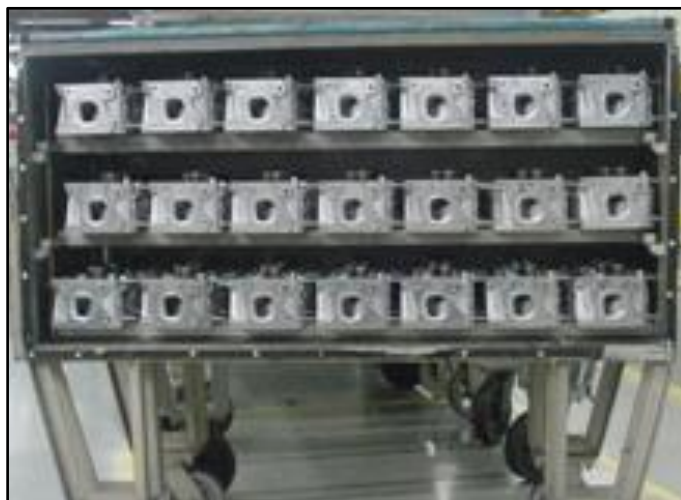
OK	OK	NOK	OK
19,1	13,2	---	82,6
4A	3A	2A	1A
4E	3E	2E	1E
23,5	12,0	78,0	184,7
OK	OK	OK	OK

Fonte: Autoria própria

2.2. Identificação dos cabeçotes

Para se identificar os cabeçotes “WOW” e “BOB”, se separou 21 cabeçotes, identificados de “A” a “U”, para fazer o teste, conforme Figura 5.

Figura 7 – Cabeçotes identificados de “A” a “U”.



Fonte: Autoria própria

2.3. Características críticas

Verificou-se as características que podem interferir na estanqueidade, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Tolerâncias das medidas a serem monitoradas.

<u>válvula</u>	<u>unidade</u>	<u>admissão:</u>	<u>escape:</u>
		<u>tolerância</u>	<u>tolerância</u>
diâmetro da haste	mm	6,998-7,012	6,978-6,992
diâmetro da sede da válvula	mm	41,65-41,95	36,30-36,70
circularidade da sede	mm	0,006	0,006
cilindricidade da haste	mm	0,01	0,01
batimento da sede	mm	0,03	0,03
rugosidade da sede	µm	0,8	0,8
ângulo	graus	91,75 - 92,75	91,75 - 92,75
<u>sede do cabeçote</u>	<u>unidade</u>	<u>admissão</u>	<u>escape</u>
		<u>tolerância</u>	<u>tolerância</u>
vazão	cm3/min	<= 700	<= 700
diâmetro da guia	mm	7,03-7,05	7,03-7,05
diâmetro de gauge	mm	40,7-40,8	35,4-35,5
ângulo de gauge	graus	89,0-91,0	89,0-91,0
cilindricidade da guia	mm	0,005	0,005
circularidade da sede	mm	0,015	0,015
batimento da sede	mm	0,05	0,05
rugosidade da sede	µm	15	15
folga entre guia e haste	mm	0,018-0,052	0,038-0,072

Fonte: Autoria própria

2.4. Procedimento

Os 21 cabeçotes passaram pelo teste de estanqueidade, se efetuou 3 testes na sequência, o vazamento deve ser inferior a 700 cm³/min, os valores foram registados, conforme Figura 8. Os valores "---", são referentes a valores com vazamentos superiores a 999 cm³/min., conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Medições de estanqueidade dos 21 cabeçotes.

A	med.I	med.II	med.III	B	med.I	med.II	med.III	C	med.I	med.II	med.III	D	med.I	med.II	med.III
1A	7,1	8,7	5,6	1A	62,0	77,0	85,9	1A	15,8	20,8	21,4	1A	66,6	86,4	89,3
2A	67,6	61,9	67,2	2A	50,3	46,4	56,8	2A	58,0	56,0	50,8	2A	28,7	27,1	30,3
3A	4,7	11,3	0,8	3A	12,8	10,5	6,3	3A	150,9	130,7	139,4	3A	10,1	9,1	9,1
4A	686,0	689,8	699,6	4A	172,1	181,3	189,5	4A	12,4	13,8	12,6	4A	12,4	7,8	14,0
1E	13,8	17,5	11,6	1E	178,7	204,6	433,6	1E	227,0	144,9	203,1	1E	58,8	85,7	92,0
2E	3,6	2,4	6,5	2E	27,1	29,2	39,3	2E	2,9	-0,7	2,5	2E	34,1	33,1	34,8
3E	29,6	26,2	14,6	3E	45,3	39,7	37,4	3E	121,0	24,8	64,8	3E	--	--	--
4E	27,4	27,8	26,8	4E	811,2	718,7	629,6	4E	115,5	100,9	103,7	4E	104,2	57,6	31,2
E	med.I	med.II	med.III	F	med.I	med.II	med.III	G	med.I	med.II	med.III	H	med.I	med.II	med.III
1A	-0,4	3,3	0,6	1A	10,4	3,5	0,3	1A	6,5	6,5	16,4	1A	40,5	47,2	52,4
2A	725,9	718,1	694,5	2A	2,2	8,5	1,6	2A	0,4	-0,2	3,3	2A	14,7	21,4	12,6
3A	23,3	19,6	14,8	3A	7,5	1,2	7,1	3A	923,2	900,7	849,1	3A	6,9	8,7	11,3
4A	60,0	47,1	44,3	4A	1,8	2,0	2,4	4A	-3,2	-4,2	-0,2	4A	15,4	1,5	10,4
1E	65,7	92,0	89,8	1E	--	549,0	407,9	1E	146,4	146,0	122,1	1E	--	--	--
2E	31,0	34,0	36,3	2E	27,8	36,3	36,6	2E	80,5	85,1	80,5	2E	4,3	4,1	3,9
3E	139,8	121,6	89,1	3E	80,5	77,8	68,0	3E	101,7	93,3	93,1	3E	212,7	184,5	131,4
4E	-1,6	2,9	-1,9	4E	-0,4	-1,2	0,1	4E	14,3	11,8	12,8	4E	750,3	805,4	844,9
I	med.I	med.II	med.III	J	med.I	med.II	med.III	K	med.I	med.II	med.III	L	med.I	med.II	med.III
1A	-5,4	-8,5	-7,3	1A	29,8	33,3	30,6	1A	6,0	8,5	4,6	1A	63,9	73,7	82,6
2A	-8,3	-17,3	-10,2	2A	18,5	20,2	18,3	2A	785,1	815,0	817,0	2A	--	--	--
3A	-8,3	-6,5	-4,1	3A	4,5	7,7	2,8	3A	7,3	8,3	3,2	3A	11,7	9,5	13,2
4A	671,1	693,4	704,6	4A	1,2	-7,4	-1,0	4A	88,5	97,1	99,3	4A	7,4	10,4	19,1
1E	19,8	19,8	22,8	1E	80,4	86,8	89,3	1E	22,8	26,4	29,1	1E	173,3	182,6	184,7
2E	31,4	30,1	30,3	2E	--	--	--	2E	40,0	42,0	46,6	2E	75,6	77,5	78,0
3E	43,7	45,0	49,7	3E	163,5	180,8	184,3	3E	9,5	8,4	11,2	3E	11,2	11,4	12,0
4E	32,2	34,0	31,1	4E	58,2	54,4	54,4	4E	-1,2	-1,5	-1,5	4E	23,0	24,6	23,5
M	med.I	med.II	med.III	N	med.I	med.II	med.III	O	med.I	med.II	med.III	P	med.I	med.II	med.III
1A	34,1	41,6	39,3	1A	4,8	13,5	9,6	1A	134,2	120,5	130,9	1A	21,2	21,4	20,6
2A	--	--	--	2A	--	--	--	2A	--	--	--	2A	0,4	3,5	-0,6
3A	7,3	13,0	7,9	3A	1,2	5,7	8,1	3A	30,4	32,0	36,1	3A	6,9	9,7	9,9
4A	71,2	98,1	102,7	4A	247,1	259,1	262,8	4A	44,5	70,4	79,6	4A	55,0	51,1	56,4
1E	70,9	74,2	77,6	1E	10,7	9,4	7,0	1E	25,7	25,2	25,4	1E	56,0	55,9	58,9
2E	37,0	37,0	41,4	2E	18,6	21,7	16,4	2E	52,4	53,3	53,1	2E	15,1	18,1	18,1
3E	10,1	12,8	13,1	3E	21,2	20,6	21,5	3E	7,2	10,4	6,9	3E	145,1	149,5	161,3
4E	0,3	1,0	-0,6	4E	92,1	90,8	87,2	4E	-0,6	-3,8	-3,1	4E	1,2	-1,5	1,9
Q	med.I	med.II	med.III	R	med.I	med.II	med.III	S	med.I	med.II	med.III	T	med.I	med.II	med.III
1A	59,3	62,0	55,1	1A	602,0	635,3	640,2	1A	-0,6	0,0	1,2	1A	0,8	2,7	4,6
2A	47,2	48,2	46,8	2A	3,5	0,0	5,9	2A	2,2	-0,2	-0,8	2A	1,0	6,9	1,2
3A	15,0	18,8	21,9	3A	3,4	3,2	2,2	3A	11,3	9,5	9,5	3A	6,5	5,3	4,9
4A	93,7	89,3	86,4	4A	0,2	-0,8	-4,4	4A	-0,2	3,2	2,8	4A	88,5	97,5	99,9
1E	25,4	25,8	29,8	1E	76,1	75,2	72,7	1E	58,4	56,3	58,4	1E	39,4	39,5	40,7
2E	--	--	--	2E	11,1	14,0	9,0	2E	48,4	52,9	53,1	2E	11,5	16,5	14,3
3E	95,1	88,6	94,8	3E	38,1	47,2	50,0	3E	922,8	913,3	902,4	3E	948,3	950,9	976,5
4E	470,5	464,5	450,2	4E	14,3	14,7	21,1	4E	2,2	1,3	1,0	4E	76,9	77,7	77,6
U	med.I	med.II	med.III												
1A	2,9	-2,1	0,8												
2A	14,5	10,4	6,3												
3A	2,2	5,3	10,3												
4A	-4,0	3,8	-1,4												
1E	35,0	37,2	36,6												
2E	47,4	48,7	47,4												
3E	801,5	864,6	862,7												
4E	7,7	6,3	7,0												

Fonte: Autoria própria

2.5. Análise dos Resultados

Não se verificou nenhuma tendência de vazamento em algum conjunto válvula e sede, porém, no conjunto válvula e sede a válvula de admissão 2A teve a maior incidência de vazamento superiores a 700 cm³/min, conforme tabela 4.

Tabela 4 – Incidência de vazamento em cada conjunto válvula e sede.

Incidência	
2A	6
3E	4
1E	2
2E	2
4E	2
4A	2
3A	1
1A	1

Fonte: Autoria própria

2.6. Escolha dos “WOW” e “BOB”

Os casos de “WOW”, onde não se teve medição em função de vazamentos superiores a 999 cm³/min foram, “L,M,N,O”, descartamos a amostra “O”, nesse primeiro momento. E escolhemos os 3 casos de “BOB”, que foram “P,S,T”, conforme tabela 5.

Tabela 5 – “WOW” e “BOB” escolhidos.

WOW											
L	med.I	med.II	med.III	M	med.I	med.II	med.III	N	med.I	med.II	med.III
1A	63,9	73,7	82,6	1A	34,1	41,6	39,3	1A	4,8	13,5	9,6
2A	--	--	--	2A	--	--	--	2A	--	--	--
3A	11,7	9,5	13,2	3A	7,3	13,0	7,9	3A	1,2	5,7	8,1
4A	7,4	10,4	19,1	4A	71,2	98,1	102,7	4A	247,1	259,1	262,8
1E	173,3	182,6	184,7	1E	70,9	74,2	77,6	1E	10,7	9,4	7,0
2E	75,6	77,5	78,0	2E	37,0	37,0	41,4	2E	18,6	21,7	16,4
3E	11,2	11,4	12,0	3E	10,1	12,8	13,1	3E	21,2	20,6	21,5
4E	23,0	24,6	23,5	4E	0,3	1,0	-0,6	4E	92,1	90,8	87,2

BOB											
P	med.I	med.II	med.III	S	med.I	med.II	med.III	T	med.I	med.II	med.III
1A	21,2	21,4	20,6	1A	-0,6	0,0	1,2	1A	0,8	2,7	4,6
2A	0,4	3,5	-0,6	2A	2,2	-0,2	-0,8	2A	1,0	6,9	1,2
3A	6,9	9,7	9,9	3A	11,3	9,5	9,5	3A	6,5	5,3	4,9
4A	55,0	51,1	56,4	4A	-0,2	3,2	2,8	4A	88,5	97,5	99,9
1E	56,0	55,9	58,9	1E	58,4	56,3	58,4	1E	39,4	39,5	40,7
2E	15,1	18,1	18,1	2E	48,4	52,9	53,1	2E	11,5	16,5	14,3
3E	145,1	149,5	161,3	3E	922,8	913,3	902,4	3E	948,3	950,9	976,5
4E	1,2	-1,5	1,9	4E	2,2	1,3	1,0	4E	76,9	77,7	77,6

Fonte: Autoria própria

2.7. Procedimento para identificação da causa raiz

Para identificação da causa raiz, se seguiu o seguinte procedimento, desmontagem do conjunto sede e válvula, limpeza, montagem e teste, para verificar se o resultado permanece, depois se executou nova montagem trocando as válvulas de cabeçotes “BOB”, por “WOW” e vice-versa, para identificar se o problema está na sede ou na válvula. Em seguida se desmontou e montou os conjuntos na condição inicial obtendo os resultados as tabelas 6 e 7.

Tabela 6 – Troca das válvulas “WOW” pelas “BOB”.

WOW (worst of worst)	Medição Inicial				Desm./Limpeza/Montagem				Troca Válvulas LxP/MxS/NxT				Volta a Condição inicial			
	L	med.I	med.II	med.III	L	med.I	med.II	med.III	L	med.I	med.II	med.III	L	med.I	med.II	med.III
	1A	63,9	73,7	82,6	1A	97,2	106,5	105,5	1A	84,3	92,6	89,9	1A	58,3	62,8	60,8
	2A	--	--	--	2A	--	--	--	2A	--	--	--	2A	--	--	--
	3A	11,7	9,5	13,2	3A	6,7	4,9	1,0	3A	4,3	2,4	6,5	3A	3,6	6,3	1,2
	4A	7,4	10,4	19,1	4A	5,2	4,0	9,6	4A	1,8	11,0	14,0	4A	5,0	13,0	22,7
	1E	173,3	182,6	184,7	1E	87,1	92,8	95,7	1E	77,6	74,5	76,4	1E	72,0	72,2	75,7
	2E	75,6	77,5	78,0	2E	74,0	74,9	75,7	2E	69,4	69,6	69,1	2E	65,3	65,5	69,3
	3E	11,2	11,4	12,0	3E	9,5	10,0	10,3	3E	10,6	10,6	7,0	3E	14,0	11,7	10,0
	4E	23,0	24,6	23,5	4E	1,2	4,4	2,3	4E	6,0	9,8	7,0	4E	11,1	5,2	9,2
	M	med.I	med.II	med.III	M	med.I	med.II	med.III	M	med.I	med.II	med.III	M	med.I	med.II	med.III
	1A	34,1	41,6	39,3	1A	24,1	25,2	26,0	1A	28,5	28,1	30,6	1A	25,8	27,1	32,0
	2A	--	--	--	2A	1.180,2	1.186,9	1.186,9	2A	605,8	606,6	593,3	2A	1.384,3	1.379,2	--
	3A	7,3	13,0	7,9	3A	0,6	3,4	6,5	3A	7,1	5,7	11,1	3A	7,3	5,1	7,3
	4A	71,2	98,1	102,7	4A	74,6	84,4	93,7	4A	65,4	84,2	95,3	4A	58,2	84,4	102,1
	1E	70,9	74,2	77,6	1E	70,2	82,0	89,8	1E	97,1	90,4	99,0	1E	70,0	68,8	74,6
	2E	37,0	37,0	41,4	2E	31,7	29,9	31,7	2E	26,9	25,0	25,2	2E	21,2	22,3	21,0
	3E	10,1	12,8	13,1	3E	12,9	18,5	15,1	3E	12,1	12,8	9,0	3E	12,5	15,7	14,6
	4E	0,3	1,0	-0,6	4E	-1,0	-2,3	-1,3	4E	0,3	1,5	2,3	4E	-0,3	3,1	2,5
	N	med.I	med.II	med.III	N	med.I	med.II	med.III	N	med.I	med.II	med.III	N	med.I	med.II	med.III
	1A	4,8	13,5	9,6	1A	30,0	36,6	30,4	1A	7,3	5,2	10,2	1A	6,7	15,2	15,6
	2A	--	--	--	2A	--	--	--	2A	--	--	--	2A	--	--	--
	3A	1,2	5,7	8,1	3A	1,0	0,4	-1,8	3A	-0,6	-2,6	6,7	3A	-0,2	-4,0	7,5
	4A	247,1	259,1	262,8	4A	189,1	203,8	208,8	4A	225,4	242,7	243,5	4A	253,7	267,4	270,4
	1E	10,7	9,4	7,0	1E	6,4	6,7	9,2	1E	7,8	7,1	7,2	1E	8,6	8,1	9,2
	2E	18,6	21,7	16,4	2E	16,5	16,5	18,8	2E	11,8	14,4	12,5	2E	12,8	14,7	13,3
	3E	21,2	20,6	21,5	3E	3,1	4,8	3,7	3E	3,4	1,7	3,7	3E	5,4	8,6	5,6
	4E	92,1	90,8	87,2	4E	84,0	80,6	78,4	4E	91,4	93,7	85,4	4E	90,1	85,1	80,9

Fonte: Autoria própria

Tabela 7 – Troca das válvulas “BOB” pelas “WOW”.

BOB (best of best)	Medição Inicial			Desm./Limpeza/Montagem			Troca Válvulas LxP/MxS/NxT			Volta a Condição inicial		
	P	med.I	med.II	med.III	P	med.I	med.II	med.III	P	med.I	med.II	med.III
	1A	21,2	21,4	20,6	1A	14,1	14,6	17,1	1A	17,7	14,1	18,5
	2A	0,4	3,5	-0,6	2A	31,3	27,1	30,7	2A	80,2	81,2	74,1
	3A	6,9	9,7	9,9	3A	-2,2	8,7	1,2	3A	-0,4	1,2	4,3
	4A	55,0	51,1	56,4	4A	184,9	183,1	181,7	4A	137,6	137,6	131,2
	1E	56,0	55,9	58,9	1E	31,4	26,5	32,0	1E	45,8	40,4	50,3
	2E	15,1	18,1	18,1	2E	12,6	15,1	12,9	2E	27,8	28,3	29,9
	3E	145,1	149,5	161,3	3E	118,0	118,5	123,3	3E	124,9	128,9	126,1
	4E	1,2	-1,5	1,9	4E	0,6	-2,2	0,3	4E	0,7	2,0	1,7
	S	med.I	med.II	med.III	S	med.I	med.II	med.III	S	med.I	med.II	med.III
	1A	-0,6	0,0	1,2	1A	0,6	1,2	-2,3	1A	0,0	-3,1	2,7
	2A	2,2	-0,2	-0,8	2A	3,5	3,9	-4,3	2A	11,6	10,8	13,4
	3A	11,3	9,5	9,5	3A	1,2	3,8	4,1	3A	2,6	2,0	5,5
	4A	-0,2	3,2	2,8	4A	-3,0	2,0	1,6	4A	3,0	-2,4	3,0
	1E	58,4	56,3	58,4	1E	52,8	51,3	54,3	1E	53,8	51,5	51,5
	2E	48,4	52,9	53,1	2E	48,2	50,6	51,2	2E	42,6	46,1	50,9
	3E	922,8	913,3	902,4	3E	909,7	874,8	871,1	3E	1.013,8	1.007,3	913,0
	4E	2,2	1,3	1,0	4E	1,2	0,0	-1,5	4E	-1,7	0,9	1,9
	T	med.I	med.II	med.III	T	med.I	med.II	med.III	T	med.I	med.II	med.III
	1A	0,8	2,7	4,6	1A	1,0	4,2	0,4	1A	2,7	6,7	1,2
	2A	1,0	6,9	1,2	2A	8,5	11,4	15,7	2A	25,9	27,1	27,9
	3A	6,5	5,3	4,9	3A	0,2	-13,8	-6,7	3A	1,4	-7,3	-1,2
	4A	88,5	97,5	99,9	4A	65,0	65,8	70,8	4A	61,4	58,4	57,4
	1E	39,4	39,5	40,7	1E	35,0	40,1	42,9	1E	31,4	27,5	29,3
	2E	11,5	16,5	14,3	2E	6,3	6,5	2,9	2E	6,6	8,8	9,1
	3E	948,3	950,9	976,5	3E	965,9	959,4	966,1	3E	893,1	931,2	899,8
	4E	76,9	77,7	77,6	4E	75,8	75,4	78,0	4E	63,6	63,7	63,7
	T	med.I	med.II	med.III	T	med.I	med.II	med.III	T	med.I	med.II	med.III
	1A	0,8	2,7	4,6	1A	1,0	4,2	0,4	1A	2,7	6,7	1,2
	2A	1,0	6,9	1,2	2A	8,5	11,4	15,7	2A	25,9	27,1	27,9
	3A	6,5	5,3	4,9	3A	0,2	-13,8	-6,7	3A	1,4	-7,3	-1,2
	4A	88,5	97,5	99,9	4A	65,0	65,8	70,8	4A	61,4	58,4	57,4
	1E	39,4	39,5	40,7	1E	35,0	40,1	42,9	1E	31,4	27,5	29,3
	2E	11,5	16,5	14,3	2E	6,3	6,5	2,9	2E	6,6	8,8	9,1
	3E	948,3	950,9	976,5	3E	965,9	959,4	966,1	3E	893,1	931,2	899,8
	4E	76,9	77,7	77,6	4E	75,8	75,4	78,0	4E	63,6	63,7	63,7
	T	med.I	med.II	med.III	T	med.I	med.II	med.III	T	med.I	med.II	med.III
	1A	0,8	2,7	4,6	1A	1,0	4,2	0,4	1A	2,7	6,7	1,2
	2A	1,0	6,9	1,2	2A	8,5	11,4	15,7	2A	25,9	27,1	27,9
	3A	6,5	5,3	4,9	3A	0,2	-13,8	-6,7	3A	1,4	-7,3	-1,2
	4A	88,5	97,5	99,9	4A	65,0	65,8	70,8	4A	61,4	58,4	57,4
	1E	39,4	39,5	40,7	1E	35,0	40,1	42,9	1E	31,4	27,5	29,3
	2E	11,5	16,5	14,3	2E	6,3	6,5	2,9	2E	6,6	8,8	9,1
	3E	948,3	950,9	976,5	3E	965,9	959,4	966,1	3E	893,1	931,2	899,8
	4E	76,9	77,7	77,6	4E	75,8	75,4	78,0	4E	63,6	63,7	63,7
	T	med.I	med.II	med.III	T	med.I	med.II	med.III	T	med.I	med.II	med.III
	1A	0,8	2,7	4,6	1A	1,0	4,2	0,4	1A	2,7	6,7	1,2
	2A	1,0	6,9	1,2	2A	8,5	11,4	15,7	2A	25,9	27,1	27,9
	3A	6,5	5,3	4,9	3A	0,2	-13,8	-6,7	3A	1,4	-7,3	-1,2
	4A	88,5	97,5	99,9	4A	65,0	65,8	70,8	4A	61,4	58,4	57,4
	1E	39,4	39,5	40,7	1E	35,0	40,1	42,9	1E	31,4	27,5	29,3
	2E	11,5	16,5	14,3	2E	6,3	6,5	2,9	2E	6,6	8,8	9,1
	3E	948,3	950,9	976,5	3E	965,9	959,4	966,1	3E	893,1	931,2	899,8
	4E	76,9	77,7	77,6	4E	75,8	75,4	78,0	4E	63,6	63,7	63,7
	T	med.I	med.II	med.III	T	med.I	med.II	med.III	T	med.I	med.II	med.III
	1A	0,8	2,7	4,6	1A	1,0	4,2	0,4	1A	2,7	6,7	1,2
	2A	1,0	6,9	1,2	2A	8,5	11,4	15,7	2A	25,9	27,1	27,9
	3A	6,5	5,3	4,9	3A	0,2	-13,8	-6,7	3A	1,4	-7,3	-1,2
	4A	88,5	97,5	99,9	4A	65,0	65,8	70,8	4A	61,4	58,4	57,4
	1E	39,4	39,5	40,7	1E	35,0	40,1	42,9	1E	31,4	27,5	29,3
	2E	11,5	16,5	14,3	2E	6,3	6,5	2,9	2E	6,6	8,8	9,1
	3E	948,3	950,9	976,5	3E	965,9	959,4	966,1	3E	893,1	931,2	899,8
	4E	76,9	77,7	77,6	4E	75,8	75,4	78,0	4E	63,6	63,7	63,7
	T	med.I	med.II	med.III	T	med.I	med.II	med.III	T	med.I	med.II	med.III
	1A	0,8	2,7	4,6	1A	1,0	4,2	0,4	1A	2,7	6,7	1,2
	2A	1,0	6,9	1,2	2A	8,5	11,4	15,7	2A	25,9	27,1	27,9
	3A	6,5	5,3	4,9	3A	0,2	-13,8	-6,7	3A	1,4	-7,3	-1,2
	4A	88,5	97,5	99,9	4A	65,0	65,8	70,8	4A	61,4	58,4	57,4
	1E	39,4	39,5	40,7	1E	35,0	40,1	42,9	1E	31,4	27,5	29,3
	2E	11,5	16,5	14,3	2E	6,3	6,5	2,9	2E	6,6	8,8	9,1
	3E	948,3	950,9	976,5	3E	965,9	959,4	966,1	3E	893,1	931,2	899,8
	4E	76,9	77,7	77,6	4E	75,8	75,4	78,0	4E	63,6	63,7	63,7

Fonte: Autoria própria

Os vazamentos nos cabeçotes “WOW” das amostras “LMN” permaneceram altos e nos cabeçotes “BOB” das amostras “PST” permaneceram baixos, portanto, o problema não está nas válvulas e sim nas sedes de válvulas.

3.8. Medição das sedes e válvulas

Conforme as medições realizadas se percebe que a causa raiz do vazamento está nas sedes de válvulas, mais precisamente no diâmetro e ângulo de “gauge”, conforme tabela 8.

Tabela 8 – medição das características críticas das válvulas e sedes de válvulas.

válvula de admissão 2A		unidade	wow1	wow2	wow3	bob1	bob2	bob3
	tolerância		válvula L	válvula M	válvula N	válvula P	válvula S	válvula T
diâmetro da haste	6,998-7,012	mm	7,005	7,004	7,005	7,002	7,001	6,997
diâmetro da sede da válvula	41,65-41,95	mm	41,805	41,805	41,800	41,804	41,847	41,810
circularidade da sede	0,006	mm	0,0097	0,0063	0,0053	0,0057	0,0057	0,0085
cilindricidade da haste	0,01	mm	0,0159	0,0063	0,0076	0,0085	0,008	0,0064
batimento da sede	0,03	mm	0,015	0,022	0,020	0,015	0,009	0,014
rugosidade da sede	0,8	µm	0,66	0,60	0,57	0,29	0,23	0,39
ângulo	91,75 - 92,75	graus	92,021	92,062	92,003	92,057	91,968	91,976
sede do cabeçote 2A		unidade	wow1	wow2	wow3	bob1	bob2	bob3
	tolerância		cabeçote L	cabeçote M	cabeçote N	cabeçote P	cabeçote S	cabeçote T
vazão (cm3/min)	<= 700	cm3/min	---	1180,2/593,3	---	0,0	0,0	1,0
diâmetro da guia	7,03-7,05	mm	7,027	7,028	7,030	7,043	7,045	7,047
diâmetro de gauge	40,7-40,8	mm	40,446	39,940	40,343	40,155	40,145	40,224
ângulo de gauge	89,0-91,0	graus	92,20	91,92	91,63	88,77	91,85	92,58
cilindricidade da guia	0,005	mm	0,0076	0,0099	0,0082	0,0066	0,0078	0,0082
circularidade da sede	0,015	mm	0,0162	0,0080	0,0154	0,0059	0,0051	0,0072
batimento da sede	0,05	mm	0,01705	0,0077	0,0166	0,0086	0,00685	0,0083
rugosidade da sede	15	µm	4,26	7,98	4,38	2,79	5,06	5,26
folga entre guia e haste	0,018-0,052	mm	0,022	0,024	0,025	0,041	0,044	0,050

Fonte: Autoria própria

3. Resultados

Conforme Figura 13, algumas características das válvulas estão milésimos de milímetro fora do especificado, que não tem influência significativa no vazamento da câmara de combustão. Portanto entendemos que a válvula está conforme, dentro do especificado. Com relação a guia de válvulas, a cilindridade está ligeiramente fora do especificado, porém a folga entre guia e haste está dentro do especificado, o que não deve ter influência no alinhamento da válvula. Já o ângulo e diâmetro de “*gauge*” estão fora do especificado, exatamente onde ocorre a vedação com a válvula, por isso essas características são a causa raiz do vazamento encontrado na linha de montagem de cabeçotes.

4.0 Conclusões

Verificou-se que o método “WOW” e “BOB” foi eficiente nesse estudo, caracterizando a causa raiz do problema, evitando uma medição completa de todas as características de vários cabeçotes, o que viabiliza o processo. Na prática se identificou-se que a válvula 2A apresentava o maior índice de problema, que na prática não mostrou ser realmente esse o problema, mas serviu para focar o estudo. Na troca entre as válvulas “WOW” e “BOB” se identificou que o problema se concentrou nos mesmos cabeçotes e nas mesmas sedes de válvulas, o que determinou uma análise mais aprofundada da causa raiz. Foi necessária a medição de algumas válvulas e sedes apenas, o que agilizou o processo. O lote foi devolvido ao fornecedor para análise do problema e elaboração de um relatório 8D, visando a identificação de causas e ações corretivas. Internamente a frequência de análise de “*skip lote*” na inspeção de recebimento foi suspensa, voltando para inspeção em todos os lotes para futuramente aumentar o intervalo entre inspeções.

A falta de estanqueidade dos cabeçotes, medida na última estação de montagem, de onde os cabeçotes são enviados para a linha de montagem dos motores, causou um refugo enorme por causa das sedes de válvulas de baixo custo. As sedes não podem ser desmontadas, assim sendo o cabeçote tem que ser refugado, se aproveitando apenas as molas, travas e as válvulas, acarretando um custo elevado da não qualidade. Cabe uma análise de capacidade no fornecedor e inserir uma estação de controle das sedes antes da prensagem nos cabeçotes.

Referências

Artigo de periódico

DWORNICKA, R. and, PIETRASZEK, J. The outline of the expert system for the design of experiment, **Production Engineering Archives**, Polonia, 20(20), pp. 43–48, 2018.

GOODMAN, J. and WYLD D. C. The Hunt for the Red X: A Case Study in the use of Shainin Design of Experiment (doe) in an Industrial Honing Operation, **Management Research News**, Estados Unidos, 24 (8-9), pp. 1–17, 2001.

JEGADEESAN A.J., *et al.* Investigation and improvement in peak failure load of hot staked joints in starter motor armatures using complementing problem-solving tools, **Journal of Mechanical Science and Technology**, Índia, 29 (4), pp. 1731–1736, 2015.

KIATCHAROENPOL, T. and VICHIRAPRASERT, T. Application of Taguchi method and Shainin DOE compared to classical DOE in plastic injection molding process, **International Journal of Intelligent Engineering and Systems**, Tailândia, 12(3), 2, 2019.

KUIPER, A., VAN RAALTE, M. and DOES, R. J. M. M. Quality quandaries: Improving the overall equipment effectiveness at a pharmaceutical company, **Quality Engineering**, Holanda, 26(4), pp. 478–483, 2014.

MITTAL, K., *et al.* Productivity improvement under manufacturing environment using Shainin system and fuzzy analytical hierarchy process: a case study, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Índia, 92(1-4), pp. 407–421 2017.

MOOREN, J., DE MAST, J. and DOES, R. J. M. M. Quality quandaries: The case of premature drill wear out, **Quality Engineering**, Holanda, v. 24, n. 2, p., 2012.

NAIK, N., *et al.* Failure analysis of governor in diesel engine using Shainin System, **Engineering Failure Analysis**, Índia, 101, pp. 456–463, 2019.

PRASHAR, A. A parametric optimization approach for radial shaft seal production processes for rubber waste reduction, **Journal of Cleaner Production**, Índia, 5 (11), pp. 1199–1214, 2024.

PRASHAR, A. Managing the powder coat waste stream: an industrial experimentation approach, **Production Planning and Control**, Índia, 35(11), pp. 1199–1214, 2024.

PRASHAR, A. Integration of Taguchi and Shainin DOE for Six Sigma improvement: an Indian case, **International Journal of Quality and Reliability Management**, Índia, 34(7), pp. 898–924, 2017.

PRASHAR, A. A conceptual hybrid framework for industrial process improvement: integrating Taguchi methods, Shainin System and Six Sigma, **Production Planning and Control**, Índia, 27(16), pp. 1389–1404, 2016.

PRASHAR, A. Using Shainin DOE for Six Sigma: an Indian case study, **Production Planning and Control**, Índia 27(2), pp. 83–101, 2016.

Apostila

QUALITY COLLEGE. Red-X. Journeyman Seminar. Tradução: R. Bibo, D. Prior. Versão 21/11/02. Tradução em 05/10/04. **General Motors University - Quality College**, 2002. (CTIS # 20481).

RAMANUJAM, V., *et al.* Cost reduction for achieving competitiveness through industrial experimentation in SG casting for Automotive application, **Canadian Metallurgical Quarterly**, Canada, 61(2), pp. 227–241, 2022.

RANA, P.; KAUSHIK, P. Initiatives of six-sigma in an automotive ancillary unit: A case study. **Management Science Letters**, Índia, 8(6), pp. 569–580, 2018.

SHERUGAR, S. and JAYCHANDRAN, K. Root cause detection for excess control rod vibration in Fuel Injection Pump Using Shainin methodology, **International Journal of Engineering and Technology**, Índia, (UAE),7(3), pp. 364–367, 2018.

STEIN, S. et al. A guided analytics tool for feature selection in steel manufacturing with an application to blast furnace top gas efficiency, **Computational Materials Science**, Reino Unido, 186, 110053, 2021.

THOMAS, A. et al. Implementing Lean Six Sigma into curriculum design and delivery – a case study in higher education, **International Journal of Productivity and Performance Management**, Reino Unido, 66(5), pp. 577–59, 2017.

TRIMARIOKO, A. Integration of nominal group technique, Shainin system and DMAIC methods to reduce defective products: A case study of tire manufacturing industry in Indonesia, **Management Science Letters**, Indonésia, 9(Spceial Issue13), pp. 2421–2432, 2019.