



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

OTÁVIO GERMANO DE MORAES DIAS

**ANÁLISE METALOGRÁFICA E MECÂNICA DE VÁLVULAS CONVENCIONAIS E
BIMETÁLICAS PARA APLICAÇÃO EM MOTOCICLETAS.**

TERESINA

2025

OTÁVIO GERMANO DE MORAES DIAS

ANÁLISE METALOGRÁFICA E MECÂNICA DE VÁLVULAS CONVENCIONAIS E
BIMETÁLICAS PARA APLICAÇÃO EM MOTOCICLETAS

Trabalho de Conclusão de Curso
(monografia) apresentado como exigência
parcial para obtenção do diploma do
Curso de Bacharelado em Engenharia
Mecânica do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí,
Campus Teresina Central .

Orientador: Prof. Dr^e. Petteson Linniker
Carvalho Serra.

.

TERESINA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Dias, Otávio Germano de Moraes

D541a Análise metalográfica e mecânica de válvulas convencionais e bimetálicas para aplicação em motocicletas / Otávio Germano de Moraes Dias. - 2025.
46 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica)
- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Central, 2025.

Orientador : Prof Dr. Petteson Linniker Carvalho Serra.

1. Válvulas automotivas . 2. Construção bimetálica. 3. Caracterização
metalúrgica. 4. Microdureza Vickers. I.Título.

CDD - 620

Elaborado por Maria Rosismar Farias CRB 3/631

OTÁVIO GERMANO DE MORAES DIAS

ANÁLISE METALOGRÁFICA E MECÂNICA DE VÁLVULAS AUTOMOTIVAS
CONVENCIONAIS E BIMETÁLICAS PARA APLICAÇÃO EM MOTOCICLETAS

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para
obtenção do diploma do Curso de Bacharelado em
Engenharia Mecânica do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Central

Aprovada em: _19_/_12_/_2025_.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Petteson Linniker Carvalho Serra (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. XXXXXXXXX XXXXXXXX
Instituição XXXXXXXXX

Prof. Dr. XXXXXXXXX XXXXXXXX
Instituição XXXXXXXXX

Dedico este trabalho aos meus pais, amigos e mestres.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os professores e servidores do Instituto Federal do Piauí – Campus Teresina Central, que, direta ou indiretamente, contribuíram para a minha formação acadêmica e para a concretização deste trabalho.

Agradeço, de forma especial, à minha família, que esteve presente desde os primeiros passos desta trajetória, oferecendo apoio incondicional, incentivo constante e confiança para que eu pudesse alcançar este objetivo. Estendo meus agradecimentos aos amigos e colegas, que compartilharam desafios, aprendizados e momentos importantes ao longo dessa caminhada.

Por fim, agradeço a Deus, por me conceder força, perseverança e equilíbrio nos momentos em que mais precisei, tornando possível a superação dos obstáculos e a conclusão desta etapa.

A obra que realizas agora é tudo o que
possuis.

Marco Aurélio

RESUMO

O Brasil figura entre os maiores mercados mundiais de motocicletas, com uma frota superior a 35 milhões de unidades, o que intensifica a competitividade no setor de motopeças e demanda componentes com elevado desempenho, durabilidade e custo competitivo. Nesse cenário, as válvulas de admissão e escape assumem papel crítico no motor de combustão interna, pois operam sob condições severas de temperatura, carregamento mecânico, desgaste e ambiente químico agressivo. Recentemente, uma empresa nacional do setor identificou, em produtos concorrentes, a adoção de uma inovação tecnológica relevante: o uso de materiais distintos para válvulas de admissão e escape e, especificamente, a aplicação de válvulas de escape com construção bimetálica, combinando diferentes ligas metálicas na haste e na cabeça. Diante dessa inovação, este trabalho teve como objetivo a caracterização técnica dessas válvulas concorrentes, visando avaliar os materiais, os processos de fabricação e a qualidade metalúrgica e superficial dos componentes. Para isso, foram realizados ensaios metalográficos, ensaios de microdureza Vickers e ensaios de rugosidade superficial em válvulas de admissão, válvulas de escape monolíticas e válvulas de escape bimetálicas. A análise microestrutural identificou microestruturas martensíticas revenidas nas hastes, microestruturas austeníticas nas cabeças de válvulas de escape e zonas de transição características na construção bimetálica. Os ensaios de dureza evidenciaram a influência de tratamentos superficiais e revestimentos, bem como variações significativas entre as diferentes regiões das válvulas, enquanto os ensaios de rugosidade permitiram avaliar o acabamento superficial em relação às exigências funcionais de resistência ao desgaste. Os resultados indicam coerência entre as soluções construtivas adotadas e as condições operacionais das válvulas, demonstrando que a utilização de materiais distintos e da construção bimetálica constitui uma estratégia tecnicamente viável para a otimização do desempenho. O estudo fornece subsídios relevantes tanto para a análise acadêmica quanto para a tomada de decisão estratégica no contexto industrial do setor de motopeças.

Palavras-chave: Válvulas automotivas; Construção bimetálica; Caracterização metalúrgica; Microdureza Vickers; Rugosidade superficial.

ABSTRACT

Brazil is among the world's largest motorcycle markets, with a fleet exceeding 35 million units, intensifying competitiveness in the motorcycle parts sector and demanding components with high performance, durability, and competitive cost. In this scenario, intake and exhaust valves play a critical role in the internal combustion engine, as they operate under severe conditions of temperature, mechanical load, wear, and an aggressive chemical environment. Recently, a national company in the sector identified, in competing products, the adoption of a relevant technological innovation: the use of different materials for intake and exhaust valves and, specifically, the application of exhaust valves with bimetallic construction, combining different metal alloys in the stem and head. Given this innovation, this work aimed at the technical characterization of these competing valves, evaluating the materials, manufacturing processes, and metallurgical and surface quality of the components. To this end, metallographic tests, Vickers microhardness tests, and surface roughness tests were performed on intake valves, monolithic exhaust valves, and bimetallic exhaust valves. Microstructural analysis identified tempered martensitic microstructures in the stems, austenitic microstructures in the exhaust valve heads, and characteristic transition zones in the bimetallic construction. Hardness tests revealed the influence of surface treatments and coatings, as well as significant variations between different regions of the valves, while roughness tests allowed for the evaluation of surface finish in relation to functional requirements for wear resistance. The results indicate consistency between the adopted construction solutions and the operating conditions of the valves, demonstrating that the use of different materials and bimetallic construction constitutes a technically viable strategy for performance optimization. The study provides relevant support for both academic analysis and strategic decision-making in the industrial context of the motorcycle parts sector.

Keywords: Automotive valves; Bimetallic construction; Metallurgical characterization; Vickers microhardness; Surface roughness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Câmara de combustão de um motor ciclo Otto.....	20
Figura 2	– Nomenclatura das válvulas.....	21
Figura 3	– Barra de aço estrutural "pino a pino" soldada a uma "cabeça" de aço de alta liga.....	22
Figura 4	– Soldagem por fricção "cabeça a pino" da válvula.....	22
Figura 5	– Tolerâncias gerais para válvulas.....	23
Figura 6	– a) Estrutura de austenita ligada da válvula de escape b) Estrutura de troostita da válvula de admissão.....	25
Figura 7	– Microestrutura do aço 21-4N com baixa precipitação de carbonetos e resposta dúctil após impacto com o pistão..	26
Figura 8	– Microestrutura do aço 21-4N com alta precipitação de carbonetos (zonas mais escuras), frágil, com quebra após impacto com o pistão.....	26
Figura 9	– Definições de Rugosidade Superficial.....	28
Figura 10	– Fluxograma da metodologia.....	29
Figura 11	– Válvulas selecionadas.....	30
Figura 12	– Cortadora metalográfica Tecnalgo CM-60.....	30
Figura 13	– Desenho das regiões de corte das válvulas.....	31

Figura 14	– a) Seção longitudinal da cabeça da válvula, b) Seção transversal da cabeça da válvula (Face da cabeça), c) Seção longitudinal da haste da válvula.....	31
Figura 15	– Microscópio óptico Olympus CX41.....	33
Figura 16	– Microdurômetro Shimadzu HMV-2.....	34
Figura 17	– Rugosímetro TIME TR-210 na base de medição.....	35
Figura 18	– Microscopia haste da válvula de admissão.....	36
Figura 19	– Microscopia da cabeça da válvula de escape.....	36
Figura 20	– a) Microscopia da zona de transição bimetálica (lado cabeça) e b) Microscopia da zona de transição bimetálica (lado haste).....	36
Gráfico 1	– Resultados das médias e dos valores máximos e mínimos obtidos nos ensaios de microdureza.....	40
Gráfico 2	– Dados do ensaio de rugosidade.....	41
Figura 21	– Imagem da superfície da face da válvula.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação microestrutural entre as regiões analisadas.....	38
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
HV	Dureza Vickers
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
OEM	Original Equipment Manufacturer
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
Ra	Rugosidade média aritmética
Rz	Rugosidade média máxima
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
ZTA	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Grau Celsius
μm	Micrômetro
HV	Unidade de dureza Vickers
N	Newton
kgf	Quilograma-força
mm	Milímetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	19
2.1	OBJETIVO GERAL	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3	REFERENCIAL TEÓRICO	20
3.1	VÁLVULAS DE ADMISSÃO E ESCAPE	20
3.2	METALOGRAFIA	24
3.3	RUGOSIDADE	27
4	METODOLOGIA	29
4.1	PROCESSO METALOGRÁFICO.....	30
4.2	ENSAIO DE MICRODUREZA	33
4.3	ENSAIO DE RUGOSIDADE	34
5	RESULTADOS	36
5.1	AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL	36
5.2	ANÁLISE DOS DADOS DE MICRODUREZA	39
5.3	EXAME DOS DADOS DE RUGOSIDADE	41
6	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

O Brasil consolidou-se como um dos maiores mercados mundiais de motocicletas, possuindo uma frota superior a 35 milhões de unidades e uma produção anual que ultrapassou 1,4 milhão de veículos nos últimos anos (ABRACICLO, 2025). Esse cenário impulsiona significativamente o setor de motopeças, tornando-o altamente competitivo e estrategicamente relevante para a indústria nacional. Nesse contexto, a busca por componentes que conciliem desempenho técnico, durabilidade e custo acessível torna-se um fator decisivo para a competitividade das empresas que atuam no mercado de reposição e fornecimento automotivo.

No ambiente comercial contemporâneo, as empresas nacionais do setor de autopeças enfrentam o desafio de competir simultaneamente com fabricantes originais (OEM) e com marcas paralelas, muitas vezes de origem internacional. A intensificação da concorrência, aliada à globalização das cadeias produtivas, exige que os fabricantes locais adotem estratégias fundamentadas em inovação tecnológica, melhoria contínua de processos e diferenciação técnica de seus produtos, sem perder de vista a viabilidade econômica (PORTER, 2019).

É nesse cenário desafiador que componentes críticos do motor, como as válvulas de admissão e escape, ganham destaque. Esses elementos são fundamentais para o funcionamento eficiente dos motores de combustão interna, sendo responsáveis pelo controle preciso da entrada da mistura ar-combustível e da saída dos gases de exaustão durante o ciclo termodinâmico. De acordo com Coisse (2010), as válvulas operam sob condições extremamente severas, submetidas simultaneamente a altas temperaturas, pressões, esforços mecânicos cíclicos e ambientes quimicamente agressivos. As válvulas de escape, em particular, podem atingir temperaturas superiores a 800 °C em regime de operação, o que impõe requisitos rigorosos quanto à resistência à fadiga térmica, ao desgaste e à oxidação em alta temperatura (FARINA et al., 2012).

Além das exigências mecânicas e térmicas, o desempenho das válvulas exerce influência direta sobre a eficiência energética e o comportamento ambiental dos motores. Estudos indicam que o estado de conservação e a qualidade construtiva das válvulas impactam significativamente a eficiência da combustão, podendo influenciar em até 15% o consumo específico de combustível (TAYLOR,

2020). Válvulas com especificações inadequadas ou desgaste excessivo comprometem a vedação da câmara de combustão, resultando em perda de compressão, aumento do consumo de combustível e elevação das emissões de poluentes, como hidrocarbonetos não queimados e óxidos de nitrogênio (HEYWOOD, 2018).

Paralelamente, a crescente rigidez das normas ambientais tem intensificado a necessidade de desenvolvimento de componentes mais eficientes e confiáveis. No Brasil, programas como o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) impõem limites cada vez mais restritivos às emissões veiculares, pressionando fabricantes a adotarem soluções tecnológicas que contribuam para a redução do impacto ambiental dos motores (IBAMA, 2023). Nesse contexto, válvulas com melhor desempenho termo-mecânico e maior estabilidade dimensional deixam de representar apenas uma vantagem competitiva e passam a constituir uma exigência técnica para o atendimento à legislação vigente.

Nesse contexto, uma empresa nacional do segmento de motopeças identificou, recentemente, em produtos de concorrentes diretos, a adoção de uma inovação tecnológica relevante, caracterizada pela utilização de materiais distintos nas válvulas de admissão e de escape e, de forma mais específica, pelo emprego de válvulas de escape com construção bimetálica, nas quais diferentes ligas metálicas são combinadas na haste e na cabeça do componente. Tal abordagem construtiva visa à otimização localizada das propriedades mecânicas e térmicas da válvula, adequando cada região às solicitações específicas impostas durante o funcionamento do motor.

Diante dessa inovação, emergiu a necessidade técnica de investigar as válvulas concorrentes, tanto para compreender os potenciais benefícios associados à solução adotada quanto para identificar possíveis limitações ou riscos relacionados à qualidade dos materiais empregados, aos processos de fabricação e aos tratamentos térmicos e superficiais aplicados.

Este trabalho encontra-se estruturado de forma a apresentar, inicialmente, uma contextualização e a fundamentação teórica sobre válvulas de admissão e escape, bem como sobre os principais ensaios metalúrgicos aplicáveis à sua caracterização. Na sequência, é descrita a metodologia experimental adotada para a realização dos ensaios. Posteriormente, são apresentados e discutidos os

resultados obtidos, correlacionando microestrutura, propriedades mecânicas e acabamento superficial. Por fim, são expostas as conclusões do estudo.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o impacto da utilização de materiais distintos e da construção bimetálica em válvulas de admissão e escape de motocicletas, por meio de ensaios metalográficos, de dureza e de rugosidade superficial, visando compreender como essas inovações influenciam a qualidade e o desempenho potencial do componente.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

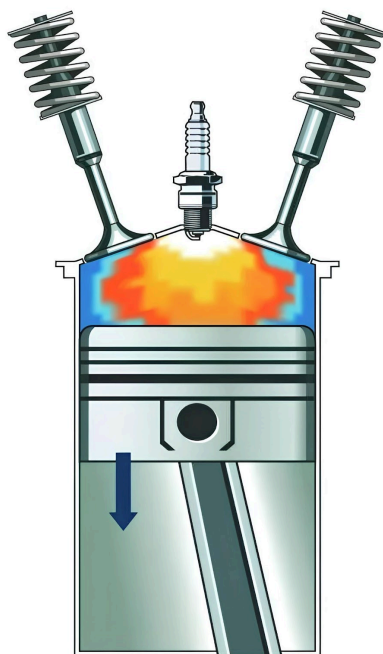
- Identificar a microestrutura das válvulas de admissão e escape do concorrente, identificando as fases presentes e relacionando-as aos materiais e processos de fabricação empregados;
- Analisar especificamente a válvula de escape bimetálica, com ênfase na zona de transição entre a haste e a cabeça, avaliando os efeitos metalúrgicos decorrentes da união de materiais distintos;
- Avaliar a influência de tratamentos e revestimentos superficiais na microdureza superficial;
- Comparar os perfis de dureza entre válvulas de admissão e válvulas de escape bimetálicas, identificando possíveis vantagens e limitações da solução inovadora;
- Avaliar a rugosidade superficial das válvulas, relacionando os parâmetros obtidos com as exigências funcionais de resistência ao desgaste e interação com os demais componentes do sistema de distribuição;
- Correlacionar microestrutura, dureza e rugosidade ao desempenho das válvulas, avaliando a inovação construtiva adotada pelo concorrente e a qualidade dos materiais e processos empregados.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 VÁLVULAS DE ADMISSÃO E ESCAPE

As válvulas de admissão e escape são componentes fundamentais do sistema de distribuição de motores de combustão interna, responsáveis pelo controle preciso do fluxo de fluidos durante o ciclo termodinâmico. A válvula de admissão regula a entrada da mistura ar-combustível na câmara, enquanto a válvula de escape comanda a exaustão dos gases queimados, atuando como barreiras selantes que operam em sincronismo com o movimento do pistão (TOMASZEWSKI et. al., 2023), observe a Figura 1. Este funcionamento cíclico as submete a um ambiente operacional extremamente severo, caracterizado por elevados gradientes térmicos, cargas mecânicas dinâmicas e exposição química aos gases de combustão.

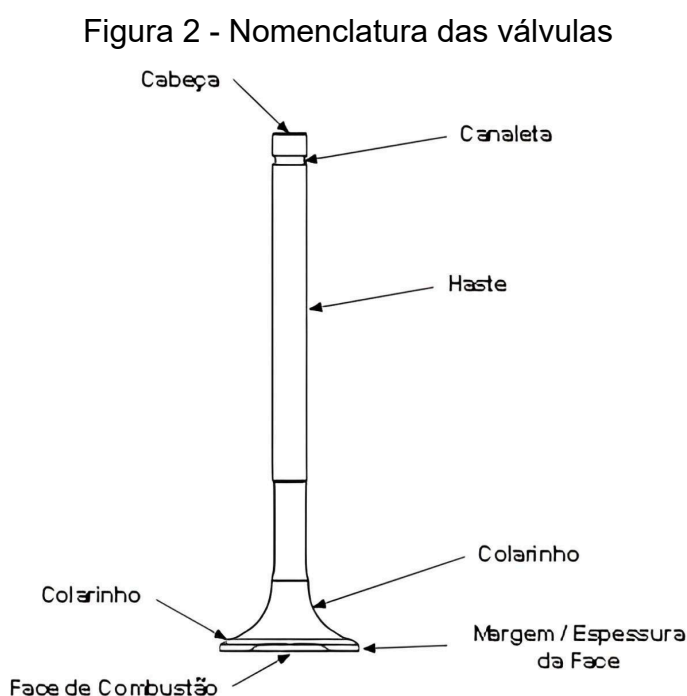
Figura 1 - Câmara de combustão de um motor ciclo Otto.



Fonte: MCNESSOR (2018).

Os esforços impostos às válvulas podem ser categorizados em térmicos, mecânicos e triboquímicos. Termicamente, a cabeça da válvula de escape, exposta diretamente aos gases de combustão, pode atingir temperaturas entre 600°C e 950°C, enquanto a haste opera em condições muito mais amenas (PARCZEWSKI;

WENCELIS, 2005). Este gradiente gera tensões térmicas significativas, exigindo materiais com alta resistência à oxidação, corrosão a quente e fluência (creep) na região da cabeça (CURELLO, 2021). Adicionalmente, a haste sofre desgaste abrasivo por atrito contra a guia e cargas de impacto na ponta, onde é acionada. Quimicamente, a exposição a gases corrosivos e combustíveis modernos de baixa lubrificidade (como gasolina sem chumbo) acelera a degradação superficial (CAVALIERI et. al, 2016). Abaixo é possível ver as nomenclaturas das diferentes seções de uma válvula segundo a SAE na Figura 2.



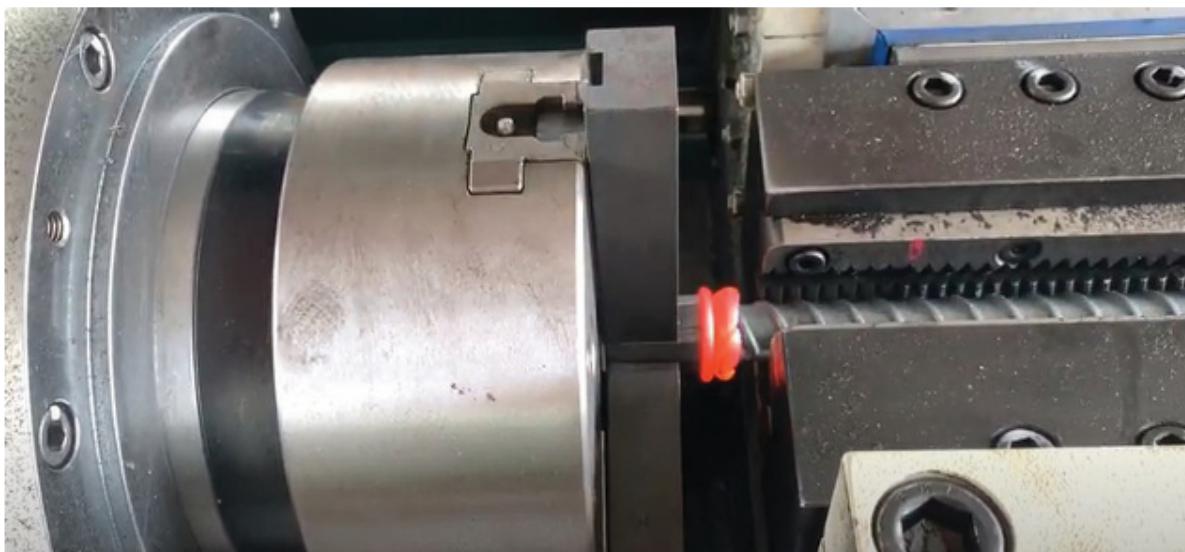
Fonte: Adaptada de SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS – SAE, (2004).

Para otimizar o desempenho e o custo frente a essas demandas conflitantes, desenvolveu-se a tecnologia das válvulas bimetálicas. Este conceito consiste na união sólida de dois materiais distintos em um único componente: uma haste, tipicamente fabricada em aço martensítico de média liga, e uma cabeça produzida em material de alta resistência térmica, como aços austeníticos ou superligas à base de níquel (ex.: Inconel) (CURELLO, 2021; TOMASZEWSKI et. al., 2023). A principal vantagem é econômica, pois emprega material nobre e dispendioso apenas onde suas propriedades são indispensáveis (cabeça da válvula de escape), enquanto a

haste, que demanda boa resistência ao desgaste e tenacidade, é confeccionada com material de custo inferior.

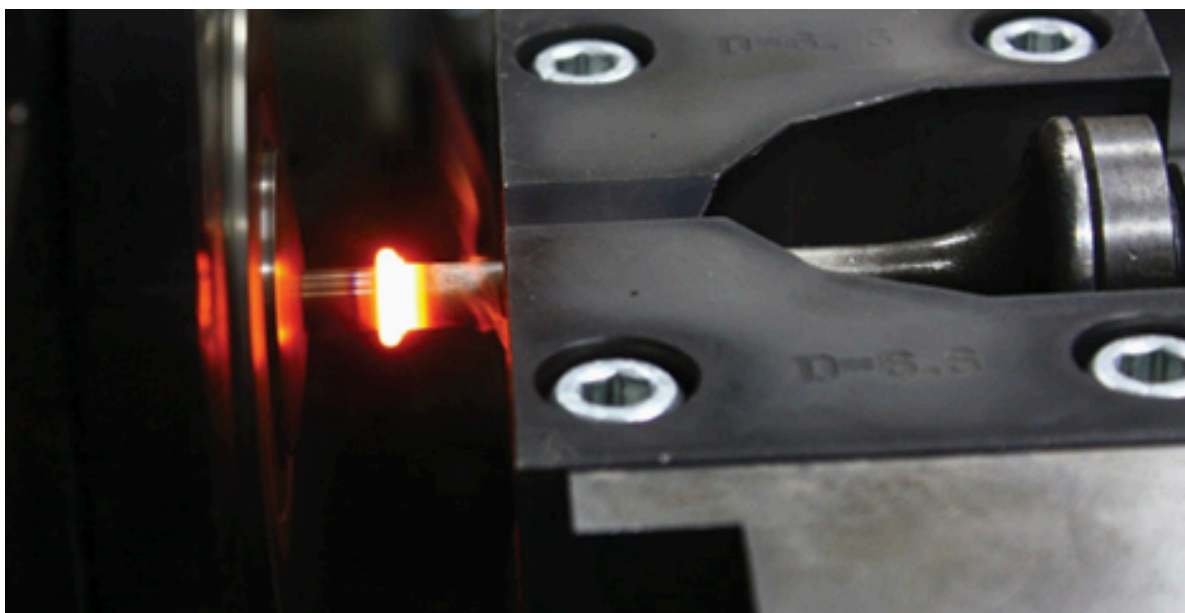
O processo industrial consolidado para fabricação dessas válvulas é a soldagem por atrito rotativo (Friction Welding), observe as Figuras 3 e 4. Conforme detalhado por Curello (2022), trata-se de um processo de união em estado sólido onde uma das partes (geralmente a haste) é girada em alta velocidade e pressionada axialmente contra a parte fixa (a cabeça). O calor gerado pela fricção eleva a temperatura da interface a um estado plástico, e a força axial aplicada promove uma consolidação metalúrgica, criando uma junta sólida e íntegra sem necessidade de metal de adição. A rebarba ("flash") formada é posteriormente usinada. Este método é largamente adotado pela indústria devido à sua confiabilidade, repetibilidade e aptidão para produção em massa.

Figura 3 - Barra de aço estrutural “pino a pino” soldada a uma “cabeça” de aço de alta liga.



Fonte: Curello (2022).

Figura 4. Soldagem por fricção “cabeça a pino” da válvula

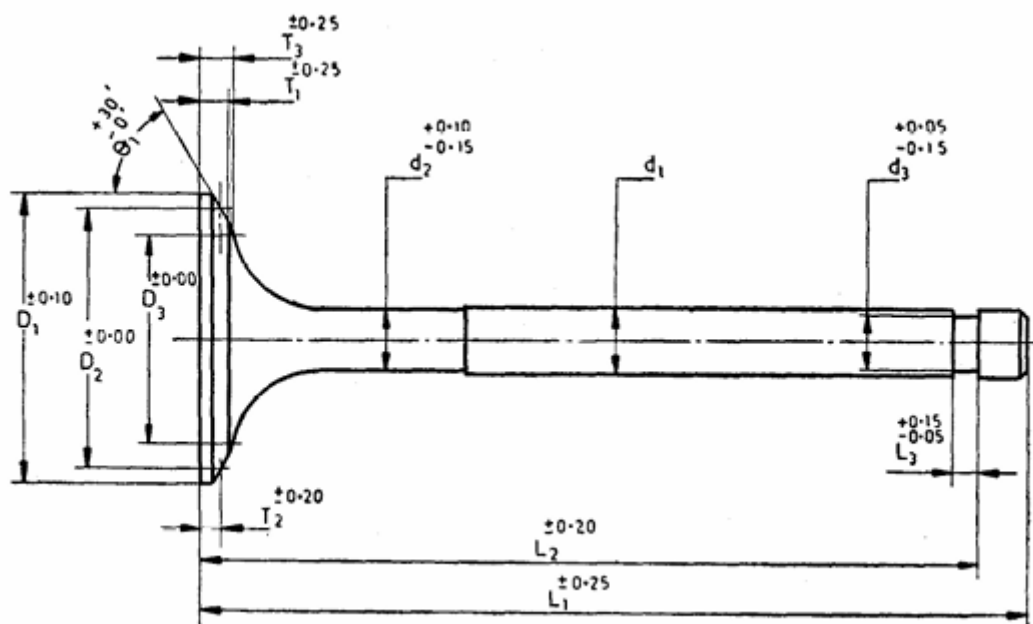


Fonte: Curello (2022).

Em linha com a otimização de materiais, pesquisas recentes exploram ligas alternativas para válvulas, visando redução de massa e desempenho superior. Chen et al. (2019) desenvolveram uma válvula de titânio para motores de motocicleta utilizando a liga Ti-Al-Fe-Mo produzida via metalurgia do pó. O processo, que envolve mistura elementar, prensagem isostática a frio, sinterização a vácuo, laminação a quente e forjamento, resultou em uma válvula com resistência à tração de 1232 MPa, alongamento de 6,5% e dureza de 49 HRC. Após revestimento com TiN via PVD, a válvula apresentou desempenho satisfatório em testes de bancada, com redução de massa de aproximadamente 40% em relação às válvulas de aço, aumento de potência e torque em cerca de 12%, redução de consumo de combustível em 1% e atenuação significativa de ruído.

Além da seleção de materiais, o projeto geométrico e a análise termomecânica são cruciais para a confiabilidade. O padrão indiano IS 810:1991 estabelece requisitos abrangentes para válvulas de motores de combustão interna, especificando materiais, tolerâncias dimensionais, acabamento superficial, tratamentos térmicos e métodos de ensaio. Ele categoriza válvulas em peça única e bimetalicas, e prevê tratamentos superficiais como cromagem dura e nitretação para melhorar resistência ao desgaste e à corrosão.

Figura 5 - Tolerâncias geométricas para diferentes regiões das válvulas.



Fonte: IS 810 (1991): Internal Combustion Engines - Engine Valves.

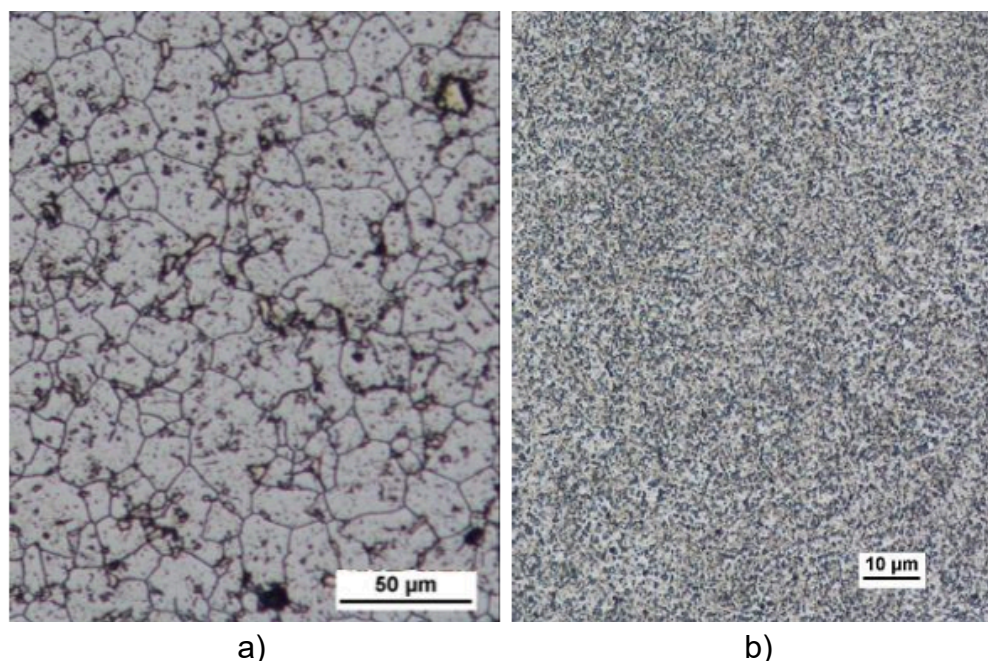
3.2 METALOGRAFIA

A metalografia constitui uma técnica analítica fundamental para a caracterização microestrutural de materiais metálicos, permitindo a investigação detalhada da estrutura interna de componentes críticos como as válvulas automotivas. Esta metodologia proporciona a visualização e quantificação de características microestruturais essenciais para a compreensão do comportamento mecânico e térmico dos materiais sob condições operacionais severas (CALLISTER; RETHWISCH, 2018). No contexto específico das válvulas de motores de combustão interna, a análise metalográfica revela informações críticas sobre a distribuição, tamanho e morfologia de fases constituintes, a presença e natureza de inclusões não-metálicas, a homogeneidade microestrutural em diferentes regiões do componente, os efeitos de tratamentos térmicos e processos de fabricação, além da detecção de descontinuidades, trincas e outros defeitos manufactureiros (ASM INTERNATIONAL, 2004).

A importância da metalografia no desenvolvimento e avaliação de válvulas automotivas tem crescido significativamente com a evolução dos materiais e processos de fabricação. A análise microestrutural permite correlacionar diretamente as características metalográficas com o desempenho em serviço dos componentes,

especialmente em condições extremas de temperatura e pressão (VANDER VOORT, 1999). No caso específico das válvulas bimetálicas, a análise metalográfica é ainda mais crítica, pois permite avaliar a qualidade da junta soldada e a integridade da zona de transição entre os dois materiais. Estudos como os realizados por Tomaszewski et. al. (2023) demonstram a aplicação prática da metalografia na caracterização de válvulas usadas, onde análises microestruturais em microscópio metalográfico permitiram identificar estruturas de austenita ligada (válvulas de escape) e troostita de revenimento (válvulas de admissão), correlacionando essas estruturas com composições químicas e valores de dureza medidos, observe a Figura 6.

Figura 6 - a) Estrutura de austenita ligada da válvula de escape b) Estrutura de troostita da válvula de admissão.



Fonte: Tomaszewski et. al. (2023).

Conforme evidenciado por Kodess et al. (2021) em seu estudo sobre válvulas com disco intermetálico, técnicas metalográficas avançadas são essenciais para caracterizar a complexa zona de união entre materiais diferentes. Em sua pesquisa, a análise da microestrutura na interface entre a haste de liga de titânio e a cabeça de intermetálico TiAl revelou uma zona de difusão com largura controlada entre 35 e 95 µm, demonstrando a eficácia do processo IFFM (Impact Fused-Forging

Modelling). A metalografia permitiu ainda identificar a formação das fases γ (TiAl) e α_2 (Ti₃Al) no disco da válvula, com proporções na faixa de 8-15% de fase α_2 , indicando um processo de solidificação rápida adequado.

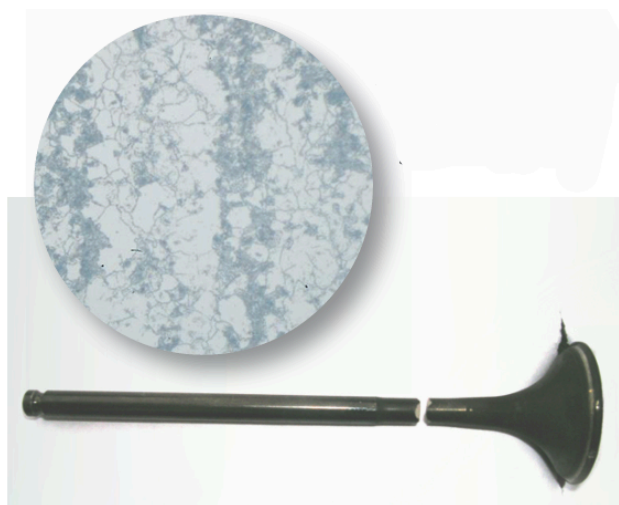
Curello (2021) destaca em seu artigo sobre materiais para válvulas a importância da análise metalográfica para avaliar a precipitação de carbonetos em aços austeníticos como o 21-4N, onde o aumento da precipitação durante o envelhecimento em serviço pode levar à fragilização do material. Imagens metalográficas apresentadas em seu trabalho mostram claramente a diferença entre uma microestrutura com baixa precipitação de carbonetos (dúctil) e outra com alta precipitação (frágil), veja as Figuras 7 e 8.

Figura 7 - Microestrutura do aço 21-4N com baixa precipitação de carbonetos e resposta dúctil após impacto com o pistão.



Fonte: Curello (2021)

Figura 8 - Microestrutura do aço 21-4N com alta precipitação de carbonetos (zonas mais escuras), frágil, com quebra após impacto com o pistão.



Fonte: Curello (2021)

3.3 ENSAIO DE RUGOSIDADE

O ensaio de rugosidade superficial constitui uma ferramenta analítica fundamental na caracterização de componentes mecânicos críticos, especialmente válvulas automotivas. Sua importância reside na capacidade de quantificar as irregularidades superficiais que influenciam diretamente múltiplos aspectos do desempenho em serviço. A textura superficial controla a interação entre superfícies em movimento relativo, determinando a formação e estabilidade do filme de lubrificante, a geração de calor por atrito e a propagação de trincas por fadiga (Bhushan, 2013).

A literatura técnica especializada confirma essa relevância. Cavalieri et. al. (2016), em seu estudo sobre desgaste em válvulas, destacam que a rugosidade superficial inicial é um parâmetro chave no modelo de desgaste adesivo, influenciando a taxa de perda de material na interface válvula-assento. Já Curello (2022), ao descrever os processos de fabricação, menciona que etapas finais como o superfinish da haste têm como objetivo justamente atingir a rugosidade superficial especificada, essencial para garantir a retenção de óleo e reduzir o atrito na guia – um fator crítico dado que, sob restrições de emissões, a quantidade de óleo nessa interface é a menor de todo o motor.

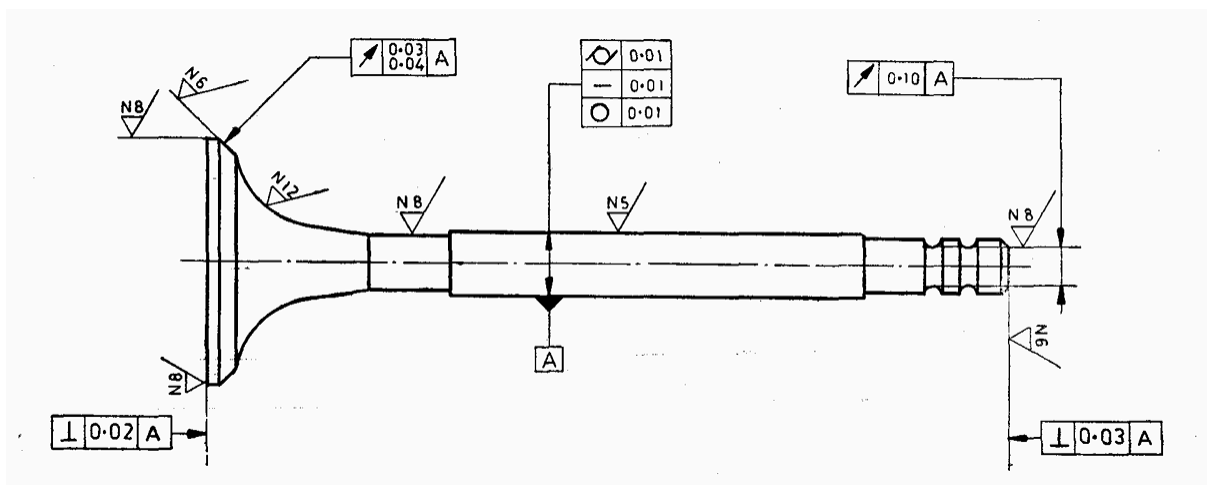
Superfícies com rugosidade inadequada podem levar a aumento do atrito, desgaste acelerado, vazamento de gases da combustão e redução significativa da vida útil do componente. Do ponto de vista tribológico, a rugosidade superficial

controla o regime de lubrificação (hidrodinâmico, misto ou limite), influencia a formação de microfilmes de óleo e determina os mecanismos predominantes de desgaste (STACHOWIAK E BATCHELOR, 2014)

Além dos aspectos funcionais, a rugosidade serve como indicador da qualidade do processo de fabricação. Variações nos parâmetros de rugosidade podem revelar desgaste de ferramentas de usinagem, inconsistências nos parâmetros de corte ou defeitos em tratamentos térmicos e superficiais (CALLISTER; RETHWISCH, 2018). Essa relação é evidente nos processos descritos por Curello (2022), onde a usinagem final do assento da válvula em retificadoras de produção de alta rigidez visa garantir não apenas a concentricidade, mas também a rugosidade superficial e a ausência de vibrações que poderiam degradar o acabamento. Da mesma forma, após a deposição de revestimentos duros como o cromo, é muitas vezes necessário um acabamento final para evitar a presença de nódulos que, devido à rugosidade irregular, causariam desgaste acelerado da guia.

Em um contexto de padronização técnica, a norma indiana IS 810:1991 estabelece valores máximos de rugosidade superficial para diferentes regiões da válvula, garantindo a conformidade com requisitos funcionais críticos. Observe a Figura 9.

Figura 9 - Definições de Rugosidade Superficial



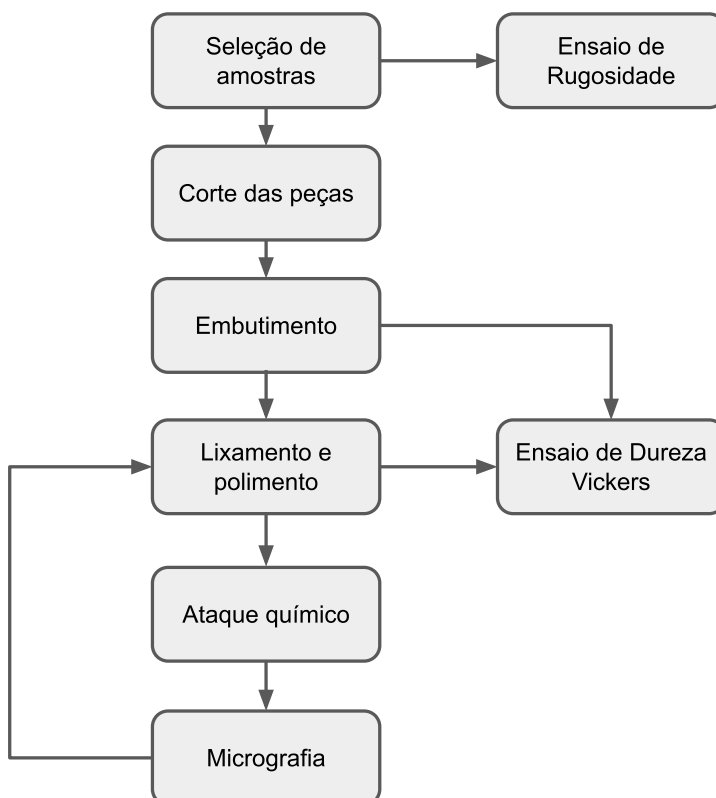
Fonte: IS 810 (1991): Internal Combustion Engines - Engine Valves.

4 METODOLOGIA

O fluxograma apresentado na Figura 10, ilustra a sequência lógica das etapas metodológicas adotadas. Inicialmente, procedeu-se à seleção dos modelos de válvulas a serem caracterizados. Para as análises metalográficas e de microdureza, as válvulas selecionadas foram cortadas em posições específicas, separadas e embutidas. As amostras destinadas à metalografia passaram por lixamento sequencial, polimento final e ataque químico seletivo, permitindo a realização da micrografia óptica.

Após a análise microestrutural, as mesmas amostras foram novamente lixadas e polidas para a realização do ensaio de microdureza Vickers, assegurando a correlação direta entre microestrutura e propriedades mecânicas. Paralelamente, válvulas inteiras e não seccionadas foram destinadas exclusivamente ao ensaio de rugosidade superficial, preservando a topografia original das superfícies funcionais e garantindo a integridade das amostras para cada tipo de ensaio.

Figura 10 - Fluxograma da metodologia



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 PROCESSO METALOGRÁFICO

O trabalho iniciou-se com a seleção das válvulas de admissão e escape de uma motocicleta nacional de 250 cc, sendo estas amplamente representativas do mercado brasileiro, veja a Figura 11. A válvula de escape foi analisada com especial atenção devido à sua configuração bimetálica, que apresenta maior complexidade construtiva. Para a caracterização completa, foram utilizadas duas unidades de cada tipo, totalizando quatro componentes. As válvulas selecionadas apresentavam as seguintes dimensões: cabeças com diâmetros de 25,0 mm para a válvula de admissão e 21,5 mm para a válvula de escape; hastes com diâmetros de 4,98 mm (admissão) e 4,96 mm (escape), e comprimentos totais de 83,0 mm e 83,4 mm, respectivamente.

Figura 11 - Válvulas de selecionadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

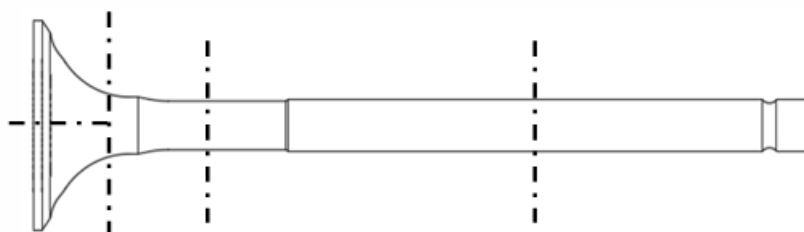
O processo de corte foi realizado com a Teclago CM-60, Figura 12. De cada válvula, foram obtidas três amostras distintas: duas metades longitudinais da cabeça (seção transversal completa) e um segmento longitudinal da haste com 32 mm de comprimento, conforme a Figura 13. Esta abordagem permitiu a análise das diferentes regiões críticas do componente: interface cabeça-haste (zona bimetálica), superfície exposta aos gases e núcleo da haste.

Figura 12 - Cortadora metalográfica Teclago CM-60



Fonte: Elaborado pelo autor

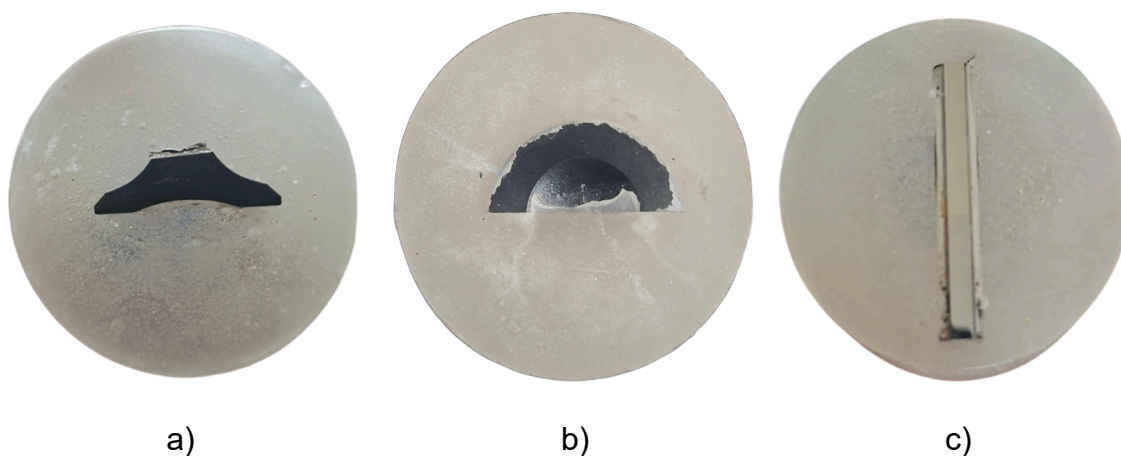
Figura 13 - Desenho das regiões de corte das válvulas



Fonte: Elaborado pelo autor.

As amostras foram embutidas e posicionadas estrategicamente no interior dos moldes com as regiões de interesse voltadas para cima: (1) seção transversal da cabeça, (2) seção longitudinal da cabeça incluindo face de selagem e transição, e (3) seção longitudinal da haste. Observe a Figura 14.

Figura 14 - a) Seção longitudinal da cabeça da válvula, b) Seção transversal da cabeça da válvula (Face da cabeça), c) Seção longitudinal da haste da válvula.



Fonte: Elaborado pelo autor

A preparação superficial seguiu sequência padronizada de lixamento manual utilizando lixadeira metalográfica de bancada com movimento linear controlado. O processo iniciou com lixas de carbeto de silício com granulometrias progressivas: 220, 320, 400, 600, 800 e 1200 mesh, posteriormente o polimento final foi executado com alumina de 0,5 μm em disco de feltro úmido, utilizando uma politriz.

Para o ataque químico, foi empregada exclusivamente água régia, preparada in situ na proporção volumétrica de 3:1 de ácido clorídrico concentrado (HCl) para ácido nítrico concentrado (HNO_3), conforme metodologia estabelecida por Vander Voort (1999) para a revelação de aços inoxidáveis e superligas. As amostras foram imersas na solução por tempos controlados: 15 segundos para a válvula de admissão e 20 segundos para a válvula de escape. Após o ataque, as amostras foram lavadas em água corrente por 30 segundos, submetidas à limpeza final com álcool etílico 70%, utilizando gaze de algodão e, por fim, secas com um secador, a temperatura ambiente.

A análise microestrutural foi conduzida em microscópio óptico Olympus CX41, Figura 15, acoplado a uma câmera digital, utilizando objetiva de 40x, o que resultou em um aumento total de 400x. Para cada amostra, foram capturadas imagens representativas das seguintes regiões de interesse: interface bimetálica (válvula de escape), núcleo da haste, região periférica da haste e zona termicamente afetada. Ressalta-se que a análise metalográfica da cabeça da válvula de admissão não foi realizada devido à priorização da caracterização da válvula de escape bimetálica que possui maior complexidade microestrutural e criticidade operacional.

Figura 15 - Microscópio óptico Olympus CX41



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 ENSAIO DE MICRODUREZA

Para a avaliação da dureza superficial, foram utilizadas as amostras previamente embutidas para metalografia que apresentavam a face da válvula voltada para baixo. Estas amostras não foram submetidas a lixamento ou polimento adicional, preservando integralmente o acabamento superficial resultante do processo de fabricação e de quaisquer revestimentos aplicados, como nitretação ou deposição de cromo duro.

Paralelamente, para a avaliação da dureza do material base, as mesmas amostras utilizadas na análise metalográfica foram preparadas adicionalmente. Após a obtenção das imagens microestruturais, estas amostras foram novamente lixadas e polidas para remover a camada superficial atacada quimicamente e quaisquer imperfeições remanescentes, expondo o material interno livre de efeitos superficiais. Esta preparação adicional, utilizando a lixa 1200 mesh e polimento com alumina de $0,5\ \mu\text{m}$, garante uma superfície plana e isenta de riscos adequada para indentação precisa do núcleo do material.

O ensaio foi realizado em microdurômetro Shimadzu HMV-2, Figura 16, equipado com penetrador piramidal de diamante com ângulo entre faces opostas de 136° . A configuração de teste foi estabelecida no modo Single (indentação única),

com carregamento de 19.614 N (equivalente a 2 kgf), correspondente à escala HV2, e tempo de aplicação da carga de 15 segundos.

Figura 16 - Microdurômetro Shimadzu HMV-2



Fonte: Elaborado pelo autor

O procedimento de medição seguiu um protocolo sistemático. Para cada amostra, foram realizadas cinco indentações em cada região de interesse (hastes, cabeças e interfaces bimetálicas quando aplicável).

4.3 ENSAIO DE RUGOSIDADE

Para este ensaio, foram selecionadas novas amostras, distintas daquelas utilizadas na metalografia e no ensaio de dureza, compreendendo uma válvula de admissão e escape do mesmo modelo de motocicleta de 250 cc. Esta abordagem assegurou que as superfícies a serem caracterizadas estivessem em seu estado original de fabricação, livres de qualquer alteração decorrente de processos de corte, embutimento ou preparação metalográfica, com o objetivo principal de avaliar a rugosidade resultante do processo de fabricação e dos revestimentos aplicados, em condições representativas da peça pronta para instalação.

As válvulas foram fixadas e posicionadas em um dispositivo de suporte isostático especialmente adaptado, que permitiu a estabilização mecânica e o alinhamento preciso dos eixos a serem medidos, minimizando erros de inclinação. Foram avaliadas duas regiões críticas em cada válvula: a superfície longitudinal da

haste, onde ocorre o deslizamento e contato com a guia, e a face inferior da cabeça, que apresenta um acabamento superficial característico do processo de fabricação.

O ensaio foi realizado utilizando um rugosímetro portátil TIME TR-210, Figura 17, equipado com unidade de deslocamento, ponteira de diamante e sistema de aquisição digital. As configurações do equipamento foram estabelecidas com comprimento de amostragem (l_r ou cut-off λ_c) de 0,8 mm, adequado para a faixa de rugosidade esperada em componentes automotivos usinados; número de amostragens de 5; comprimento de avaliação (l_n) de 4,0 mm; e filtro de onda Gaussiano.

Figura 17 - Rugosímetro TIME TR-210 na base de medição



Fonte: Elaborado pelo autor

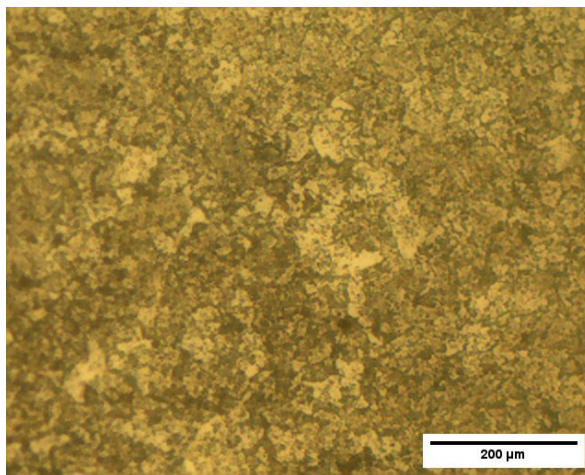
O procedimento de medição foi sistemático, com cinco medições repetidas realizadas em posições equidistantes para cada região de interesse. O parâmetro primário avaliado foi o R_a (Rugosidade Média Aritmética), com parâmetros secundários R_z (Altura Média das Irregularidades) e R_{max} (Altura Máxima do Perfil) também registrados. Os resultados para cada válvula e região foram expressos como a média aritmética das cinco medições repetidas, fornecendo dados representativos da qualidade do acabamento superficial para correlação com o desempenho tribológico.

5. RESULTADOS

5.1 AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL

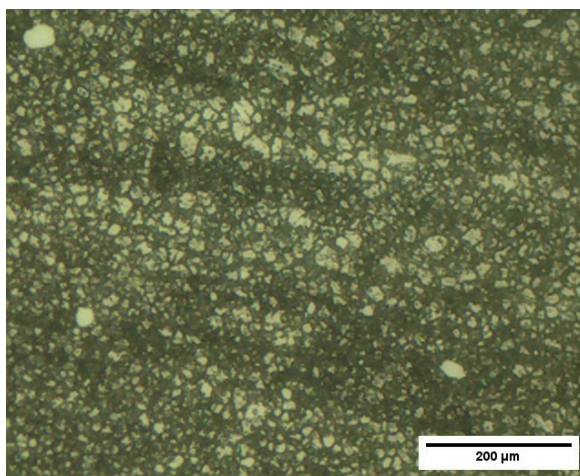
As Figuras 18, 19 e 20 apresentam as microscopias ópticas das três peças selecionadas, com a distinção da zona de transição bimetálica na zona de escape entre o lado da haste e o da cabeça.

Figura 18 - Microscopia haste da válvula de admissão.



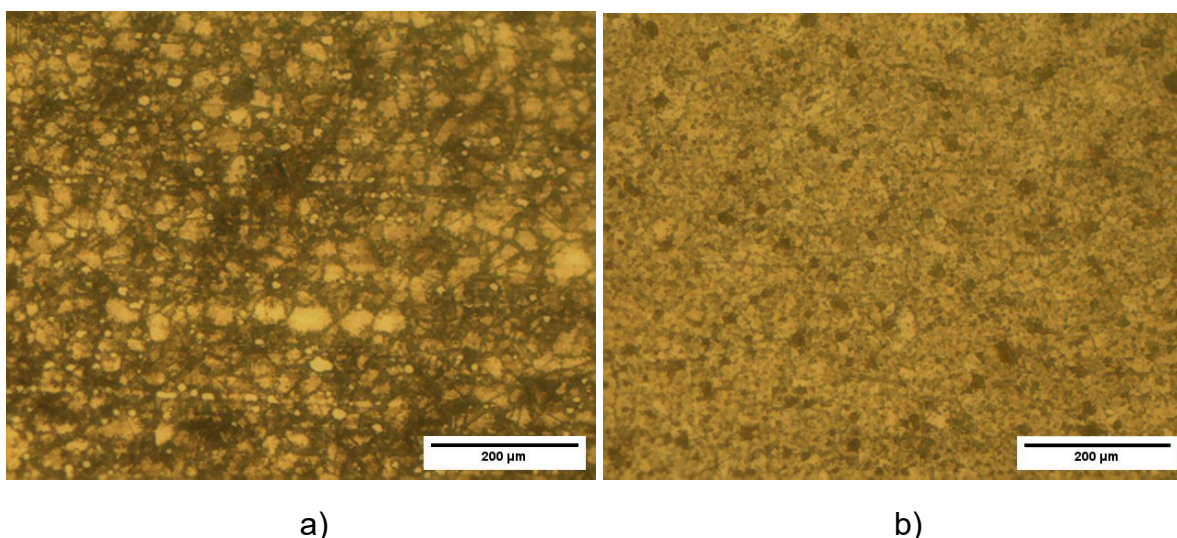
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 - Microscopia da cabeça da válvula de escape.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 - a) Microscopia da zona de transição bimetálica (lado cabeça - escape) e
b) Microscopia da zona de transição bimetálica (lado haste - escape).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise microestrutural das válvulas evidencia comportamentos coerentes com os materiais normalmente empregados em componentes de admissão e escape, conforme descrito na literatura especializada.

A haste da válvula de admissão, Figura 18, apresenta uma microestrutura constituída por martensita revenida na parte clara e troostita na parte mais escura, característica típica de aços martensíticos alto-ligados utilizados para aplicações que exigem elevada dureza e resistência ao desgaste. Em análises de válvulas usadas, observou-se estruturas de troostita revenida com precipitação de carbonetos, indicando que o aço passou por um processo de revenimento em alta temperatura (TOMASZEWSKI, et. al, 2023). Os carbonetos, ao mesmo tempo em que reforçam a resistência abrasiva, fundamental para o contato com a guia, podem atuar como potenciais sítios de nucleação de trincas sob carregamento cíclico (MURAKAMI et al., 1989), especialmente em regiões submetidas à flexão repetitiva. Assim, embora a microestrutura seja adequada à função de suporte mecânico e desgaste, deve-se considerar que a heterogeneidade do tamanho dos carbonetos influencia significativamente a vida em fadiga da peça (BATHIAS, 2005).

A cabeça da válvula de escape, Figura 19, apresenta microestrutura predominantemente austenítica com precipitação fina de troostita, o que é típico de aços inoxidáveis resistentes ao calor, como o 21-4N, além de (CURELLO, 2021). Esse tipo de estrutura oferece elevada estabilidade térmica, resistência à oxidação e boa tenacidade em temperaturas elevadas, favorecendo o desempenho em ambientes expostos diretamente aos gases de combustão. A ausência de fases

frágeis visíveis, como sigma ou carbonetos grosseiros, sugere um histórico térmico adequado e boa resistência à degradação em serviço. No entanto, o processo de envelhecimento em serviço em temperaturas próximas a 1400°F (760°C) pode promover precipitação contínua de carbonetos, tornando a liga progressivamente mais dura e frágil ao longo do tempo (CURELLO, 2021).

Nas válvulas bimetálicas de escape, observou-se um comportamento microestrutural distinto e tecnicamente superior em determinados aspectos. O lado da haste, Figura 20b, apresentou uma martensita revenida mais refinada e homogênea em comparação à haste monolítica de admissão, indicando um efeito benéfico do ciclo térmico associado ao processo de soldagem por fricção. Curello (2022) descreve o processo de soldagem por atrito como uma união em estado sólido que gera calor por fricção, podendo resultar em refino microestrutural nas zonas próximas à solda. Esse refino microestrutural tende a melhorar a resistência à fadiga, reduzindo a sensibilidade à nucleação de trincas sob carregamentos cíclicos.

Por outro lado, o lado da cabeça da válvula bimetálica, Figura 20a, apresentou uma microestrutura mais complexa, com maior densidade de precipitados e contrastes metalográficos, atribuídos à influência da zona afetada pelo calor e à possível difusão de elementos entre os materiais distintos. Kodess et al. (2021) observaram fenômeno similar em válvulas bimetálicas produzidas por IFFM, onde identificaram uma zona de difusão com largura controlada entre os materiais diferentes. Embora essa complexidade seja esperada em juntas bimetálicas, ela ressalta a importância do controle rigoroso do processo de soldagem, uma vez que a integridade metalúrgica dessa região é crítica para o desempenho térmico e estrutural da válvula.

De maneira geral, as microestruturas observadas são coerentes com o comportamento esperado para válvulas submetidas a ambientes térmicos e mecânicos severos. Cada região apresenta uma configuração metalúrgica que atende às exigências específicas de serviço, resistência térmica na cabeça, resistência ao desgaste na haste e equilíbrio entre tenacidade e dureza na zona bimetálica. A partir da Tabela 1 é possível ver uma comparação direta entre os resultados.

Tabela 1 - Comparação microestrutural entre as regiões analisadas.

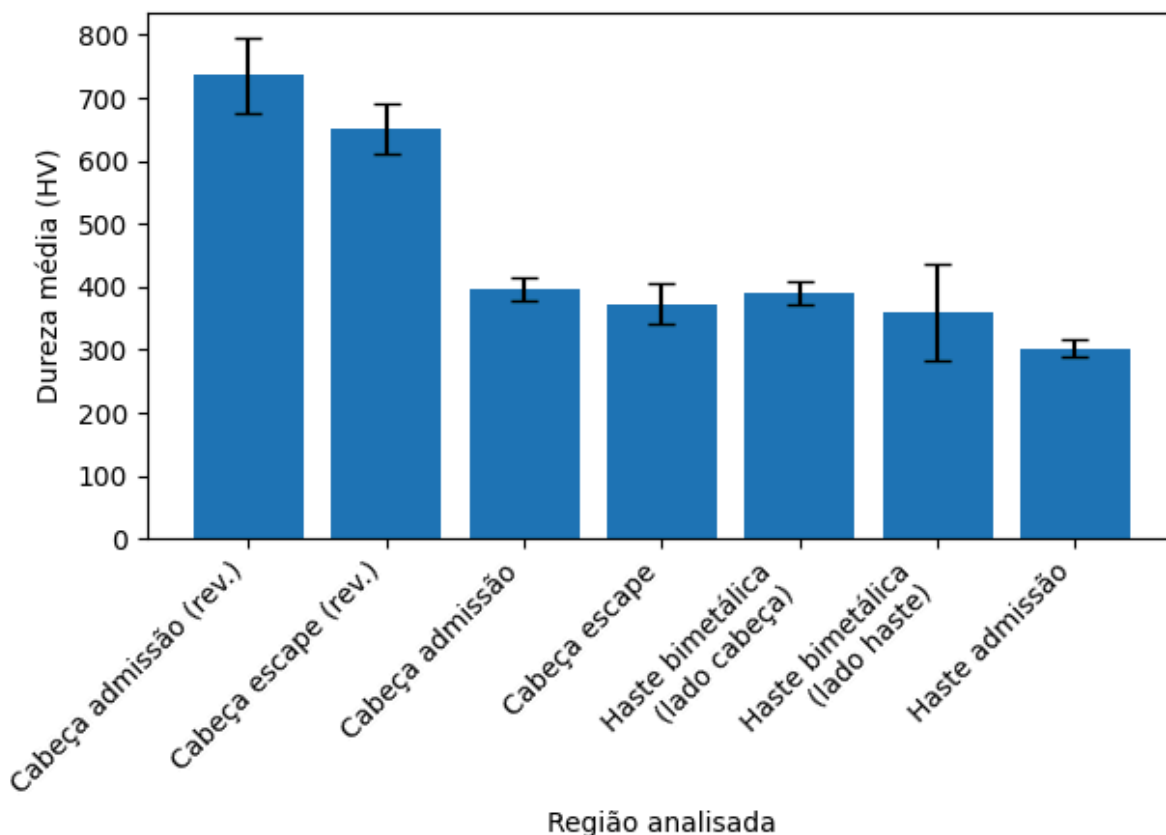
Região analisada	Microestrutura observada	Impacto no desempenho em serviço
Haste – válvula de admissão.	Martensita revenida com carbonetos de Cr e Mo, distribuição relativamente heterogênea.	Alta dureza e boa resistência ao desgaste; carbonetos grosseiros podem favorecer nucleação de trincas por fadiga.
Cabeça – válvula de escape.	Matriz austenítica com precipitação fina e boa homogeneidade.	Excelente resistência térmica; menor dureza que martensíticos, mas alta estabilidade estrutural em operação quente.
Válvula bimetálica – zona de transição (lado cabeça).	Martensita revenida com carbonetos maiores e rede parcialmente contínua.	Alta resistência ao desgaste; carbonetos grosseiros podem reduzir tenacidade e favorecer falhas por fadiga na região.
Válvula bimetálica – zona de transição (lado haste).	Microestrutura refinada, precipitados moderados, grão mais fino.	Maior tenacidade e boa resistência à propagação de trincas; região crítica para a integridade da junta soldada.

Fonte: Elaborado pelo autor

5.2 ANÁLISE DOS DADOS DE MICRODUREZA

O Gráfico 1, apresenta os resultados referentes aos ensaios de microdureza.

Gráfico 1 - Resultados das médias e dos valores máximos e mínimos obtidos nos ensaios de microdureza.



Fonte: Elaborado pelo autor

A análise da dureza das válvulas, conforme apresentado na Gráfico 1, revela variações significativas entre as diferentes regiões e condições, oferecendo *insights* valiosos sobre os revestimentos aplicados e as características dos materiais empregados. Os dados obtidos permitem estabelecer correlações diretas com as propriedades mecânicas esperadas para cada componente.

As diferenças significativas de dureza entre as regiões com e sem revestimento confirmam a presença de revestimentos, provavelmente nitretação ou nitrocarbonetação. A coloração escura observada nas válvulas é característica desses processos, que introduzem nitrogênio na superfície do material, formando carbonitretos que aumentam a dureza superficial (CURELLO, 2021). Os valores elevados de dureza nas cabeças revestidas (736,2 HV para admissão e 652,0 HV para escape) são essenciais para resistir ao desgaste abrasivo e adesivo na interface válvula-assento, especialmente em condições de combustão moderna com combustíveis de baixa lubrificidade (CAVALIERI, ZENKLUSEN E CARDONA, 2016).

A diferença de dureza entre as cabeças de admissão e escape sem revestimento (396,0 HV vs 373,0 HV) reflete as distintas naturezas metalúrgicas desses componentes. A cabeça da válvula de admissão, tipicamente fabricada em aços martensíticos, apresenta maior dureza intrínseca devido à microestrutura de martensita revenida. Em contraste, a cabeça da válvula de escape, geralmente produzida em aços austeníticos como o 21-4N, prioriza a estabilidade térmica e resistência à oxidação em altas temperaturas, resultando em menor dureza (CURELLO, 2021; TOMASZEWSKI, GRYGIER E DZIUBEK, 2023).

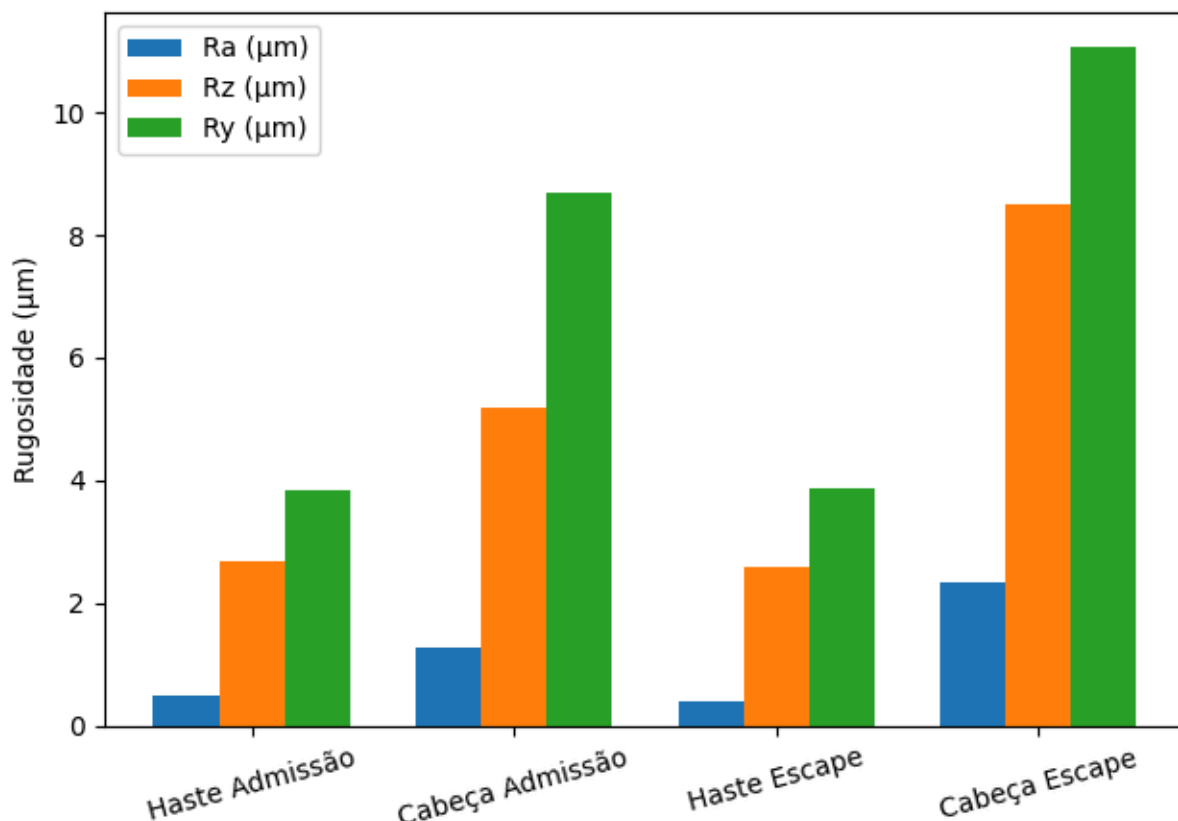
Na válvula bimetálica, o gradiente de dureza entre o lado da cabeça (391,0 HV) e o lado da haste (359,0 HV) com elevado desvio padrão (76,68 HV) revela a complexidade microestrutural da zona de transição. Como observado por Kodess et al. (2021) em válvulas com discos intermetálicos, a região de junção entre materiais diferentes apresenta gradientes de composição e propriedades mecânicas. O alto desvio padrão na região da haste bimetálica sugere heterogeneidade microestrutural, possivelmente relacionada ao processo de união por soldagem por atrito, onde as condições térmicas e mecânicas variam ao longo da interface (CURELLO, 2022).

A menor dureza da haste da válvula de admissão (302,0 HV) é coerente com os requisitos funcionais desta região. Enquanto a cabeça necessita de alta resistência ao desgaste e ao impacto, a haste exige maior tenacidade e resistência à fadiga por flexão, características associadas a valores moderados de dureza (PARCZEWSKI E WENCELIS, 2005). Esta diferença otimizada de propriedades entre cabeça e haste é fundamental para o desempenho global da válvula, permitindo que cada região atenda às suas demandas específicas de serviço.

5.3 EXAME DOS DADOS DE RUGOSIDADE

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de rugosidade superficial estão apresentados no Gráfico 2, na qual são compilados os valores médios e os parâmetros analisados para as diferentes regiões das válvulas avaliadas.

Gráfico 2 - Dados do ensaio de rugosidade



Fonte: Elaborado pelo autor

A análise da rugosidade superficial das válvulas, conforme apresentada na tabela, revela um padrão coerente com as especificações técnicas estabelecidas para componentes automotivos de alta performance. Os dados obtidos demonstram conformidade diferenciada entre as regiões da haste e da cabeça, refletindo as distintas exigências funcionais de cada área.

A haste da válvula de admissão apresenta $Ra = 0,499 \mu\text{m}$, valor que se aproxima, mas ultrapassa ligeiramente, o limite máximo especificado segundo a IS 810:1991 de $0,4 \mu\text{m}$ (grau de rugosidade N5) para a região de contato com a guia. Esta discreta variação pode estar associada a características específicas do processo de fabricação ou ao desgaste em serviço, conforme observado em estudos de caracterização de válvulas usadas (TOMASZEWSKI, GRYGIER E DZIUBEK, 2023). A haste da válvula de escape, com $Ra = 0,395 \mu\text{m}$, apresenta maior conformidade com o limite especificado, situando-se dentro da faixa aceitável para o grau N5. Este valor otimizado é particularmente importante para válvulas de escape, que operam em condições térmicas mais severas e requerem eficiente transferência de calor através da interface haste-guia (PARCZEWSKI E WENCELIS, 2005).

Os parâmetros Rz e Ry para ambas as hastes (variando entre 2,597-2,691 μm e 3,828-3,867 μm , respectivamente) indicam perfis superficiais com irregularidades de magnitude moderada, compatíveis com processos de retificação centerless de precisão (CURELLO, 2022). A ligeira diferença entre os valores de Ry (altura máxima) sugere variações no processo de acabamento ou na microgeometria resultante do desgaste diferencial entre os materiais das hastes de admissão e escape.

Em contraste, as cabeças das válvulas apresentam valores significativamente mais elevados: Ra = 1,271 μm para admissão e Ra = 2,340 μm para escape. Ambos os valores estão dentro do limite especificado pela IS 810:1991, de 3,2 μm (grau de rugosidade N8) para a região da cabeça, com a válvula de escape apresentando rugosidade aproximadamente 84% maior que a de admissão. Esta diferença é tecnicamente significativa e está diretamente relacionada aos diferentes materiais, tratamentos térmicos e processos de fabricação aplicados a cada tipo de válvula. Conforme estabelecido pela literatura especializada em tribologia aplicada a componentes automotivos, a rugosidade superficial é intencionalmente otimizada para atender às diferentes condições operacionais (HEYWOOD, 2018).

Além disso, os valores significativamente elevados de Rz (5,196 μm para admissão e 8,494 μm para escape) e Ry (8,691 μm para admissão e 11,080 μm para escape) são diretamente atribuíveis à textura superficial característica da face da válvula, que apresenta padrões de círculos concêntricos em alto relevo, conforme evidenciado na Figura 21.

Figura 21 - Imagem da superfície da face da válvula



Fonte: Elaborado pelo autor.

6 CONCLUSÃO

A partir dos ensaios metalográficos realizados, foi possível identificar diferenças microestruturais claras entre as válvulas de admissão e de escape, bem como entre válvulas monolíticas e bimetálicas. As microestruturas observadas mostraram-se coerentes com a aplicação funcional de cada região da válvula, evidenciando o uso de aços martensíticos nas hastes, visando elevada resistência ao desgaste, e de ligas austeníticas na cabeça das válvulas de escape, adequadas à resistência térmica e à oxidação. No caso da válvula de escape bimetálica, a análise da zona de transição indicou uma interface metalurgicamente consistente, embora caracterizada por gradientes microestruturais que podem atuar como regiões críticas sob carregamentos cíclicos.

Os ensaios de microdureza Vickers permitiram avaliar tanto a dureza superficial, associada à presença de revestimentos ou tratamentos superficiais, quanto a dureza interna dos materiais. Os resultados evidenciaram diferenças significativas entre válvulas com e sem revestimento, bem como entre as distintas regiões da válvula bimetálica, confirmando a existência de uma estratégia de projeto voltada à otimização localizada das propriedades mecânicas. Entretanto, variações elevadas de dureza em determinadas regiões indicam a necessidade de controle rigoroso dos processos térmicos e de fabricação, especialmente quando se empregam soluções construtivas mais complexas.

A análise da rugosidade superficial complementou a avaliação mecânica e microestrutural, permitindo relacionar o acabamento superficial das válvulas com requisitos funcionais como desgaste, vedação e contato com componentes do sistema de distribuição. Os resultados reforçam a importância do controle do acabamento superficial como fator determinante para a durabilidade e o desempenho do conjunto válvula–guia–sede.

De forma integrada, os resultados obtidos demonstram que a inovação tecnológica adotada pelo concorrente, uso de materiais distintos e válvula de escape bimetálica apresenta potencial para melhorar o desempenho funcional do componente, desde que associada a processos de fabricação e controle de qualidade adequados. Ao mesmo tempo, o estudo evidencia que essa solução também introduz desafios metalúrgicos e mecânicos, especialmente relacionados à zona de transição bimetálica e à homogeneidade das propriedades.

Conclui-se, portanto, que a caracterização experimental realizada fornece subsídios técnicos relevantes para a avaliação crítica dessa inovação, permitindo à empresa nacional compreender seus pontos positivos e limitações. O trabalho contribui tanto para o avanço do conhecimento acadêmico quanto para a aplicação prática no desenvolvimento e aprimoramento de válvulas automotivas, apoiando decisões estratégicas fundamentadas em critérios técnicos e de desempenho.

REFERÊNCIAS

ABRACICLO (Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares). **Anuário da Indústria Brasileira de Duas Rodas: 2024**. São Paulo: ABRACICLO, 2024.

ASM INTERNATIONAL. **Metallography and Microstructures**. ASM Handbook, Volume 9. Materials Park, OH: ASM International, 2004.

BATHIAS, C. **There is no infinite fatigue life in metallic materials**. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, v. 28, n. 5, p. 483-495, 2005.

BHUSHAN, B. **Principles and Applications of Tribology**. 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). **Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE: Relatório de Emissões Veiculares 2023**. Brasília: IBAMA, 2023.

CAVALIERI, F. J.; ZENKLUSEN, F.; CARDONA, A. **Determination of wear in internal combustion engine valves using the finite element method and experimental tests**. Mechanism and Machine Theory, v. 104, p. 81-99, 2016.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 10th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2018.

CHEN, Feng et al. **Motorcycle engine use Ti-Al-Fe-Mo valve preparation and performance characterization**. Rare Metal Materials and Engineering, v. 48, n. 10, p. 3297-3301, out. 2019.

COISSE, R. C. **A influência da microestrutura e dos tratamentos superficiais na vida em fadiga de aços inoxidáveis martensítico e austenítico usados na fabricação de válvulas para motores a combustão interna**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

CURELLO, F. **Valve Materials**. Engine Professional, p. 60-76, out./dez. 2021.

CURELLO, F. **How Valves Are Born**. Engine Professional, p. 66-78, jul./set. 2022.

FARINA, A. B. et al. **Desenvolvimento de novos aços válvula para aplicação em motores de alta performance**. In: CONGRESSO DA ABM, 67., 2012, Rio de Janeiro. Anais [...]. São Paulo: ABM, 2012.

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. 2nd edition. New York: McGraw-Hill Education, 2018.

INDIAN STANDARDS INSTITUTION. **IS 810:1991 - Automotive Engine Valves: Materials and Dimensional Requirements**. New Delhi: ISI, 1991.

KODESS, B. N. et al. **Structure and Mechanical Properties of the Engine Valves with Intermetallic Disk**. In: Anais de conferência... ICS&E, 2021. p. K8.37.1-K8.37.5.

MCNESSOR, Mike. ***The Belly of the Beast***. Hemmings; publicado em 23 set. 2018. Disponível em: <https://www.hemmings.com/stories/the-belly-of-the-beast/>. Acesso em: 14 dez. 2025.

MURAKAMI, Y.; KODAMA, S.; KONUMA, S. **Effects of non-metallic inclusions on fatigue strength of high strength steels**. International Journal of Fatigue, v. 11, n. 5, p. 291-298, 1989.

PARCZEWSKI, K.; WENCELIS, J. **Analysis of the co-operation of bimetallic valves and a valve guide – thermal problems**. Archivum Motoryzacji, v. 2, p. 105-119, 2005.

PORTER, Michael E. ***Vantagem Competitiva: Criando e Sustentando um Desempenho Superior***. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **SAE J775 – Engine Poppet valve Information Report**. SAE International, Surface Vehicle Information Report. Pennsylvania, 2004.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.

TAYLOR, Charles Fayette. ***The Internal Combustion Engine in Theory and Practice***. 2. ed. Cambridge, MA: MIT Press, 2020.

TOMASZEWSKI, S.; GRYGIER, D.; DZIUBEK, M. **Assessment of engine valve materials. Combustion Engines, 2023**.

VANDER VOORT, G. F. **Metallography: Principles and Practice**. ASM International, 1999. ISBN: 0-87170-672-5