

Análise Comparativa de Desgaste e Rugosidade Superficial em Pistões das Gerações G4 e G5 do Motor VW EA-111 1.0 Volkswagen

Comparative Analysis of Wear and Surface Roughness in G4 and G5 Pistons of the VW EA-111 1.0 Engine Volkswagen

Análisis Comparativo del Desgaste y la Rugosidad Superficial en Pistones de las Generaciones G4 y G5 del Motor VW EA-111 1.0 Volkswagen

Lucas Henrique Pereira Paixão ¹
Mario Luiz Nunes da Silva ²

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise experimental comparativa de pistões das gerações G4 e G5 do motor Volkswagen EA-111 1.0, com foco no desgaste dimensional e na rugosidade superficial da região da saia. Foram avaliadas amostras reais de pistões novos e usados, por meio de medições micrométricas e de rugosidade (Ra), aplicadas em múltiplos pontos nos lados direito e esquerdo da saia. Os resultados indicaram que os pistões G5 apresentam menores valores de rugosidade e maior variação dimensional em comparação aos pistões G4, evidenciando maior desgaste e perda da camada grafitada original. Conclui-se que a redução de massa e área de contato adotada no projeto G5 contribuiu para maior sensibilidade ao atrito e desgaste.

Palavras-chave: pistão. EA-111. Rugosidade. Desgaste. Tribologia.

Abstract: This study presents an experimental comparative analysis of G4 and G5 pistons from the Volkswagen EA-111 1.0 engine, focusing on dimensional wear and surface roughness of the piston skirt. Real samples of new and used pistons were evaluated through micrometric and surface roughness (Ra) measurements taken at multiple points on the right and left sides of the skirt. Results show that G5 pistons exhibit lower roughness values and greater dimensional variation compared to G4 pistons, indicating increased wear and loss of the original graphite coating. It is concluded that the reduced mass and skirt contact area adopted in the G5 design increased its sensitivity to friction and wear.

Keywords: piston. EA-111. roughness. wear. tribology.

Resumen: Este estudio presenta un análisis experimental comparativo de los pistones de las generaciones G4 y G5 del motor Volkswagen EA-111 1.0, enfocado en el desgaste dimensional y la rugosidad superficial de la falda del pistón. Se evaluaron muestras reales de pistones nuevos y usados mediante mediciones micrométricas y de rugosidad (Ra) en múltiples puntos de los lados derecho e izquierdo de la falda. Los resultados mostraron que los pistones G5 presentan valores de rugosidad menores y mayor variación dimensional en comparación con los pistones G4, lo que evidencia mayor desgaste y pérdida del recubrimiento grafitado original. Se concluye que la reducción de masa y de área de contacto adoptada en el diseño G5 incrementó su sensibilidad al desgaste y a la fricción.

Palabras-clave: pistón. EA-111. Rugosidad. Desgaste. Tribología.

Submetido 13/03/2026

Aceito 21/07/2026

Publicado 04/08/2026

1 Graduando em Engenharia Mecânica. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo. E-mail: lucas.paixao@aluno.ifsp.edu.br

2 Doutor em Engenharia Mecânica. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo. E-mail: marioluiznunes@ifsp.edu.br

Considerações iniciais

O motor EA111 1.0 (vht) Volkswagen, amplamente utilizado no Gol e entre outros modelos nas gerações 4 (G4, até 2008) e 5 (G5, a partir de 2008/2009). Na transição entre essas gerações, houve mudanças relevantes no projeto: o motor G4 utilizava componentes mais robustos, enquanto no G5 a Volkswagen implementou pistões e bielas mais leves, além de bronzinas mais estreitas, com o objetivo de reduzir atrito interno, consumo de combustível e emissões (Loureiro, 2009; Mahle, 2012). Tais modificações, embora positivas em termos de eficiência energética, comprometeram a robustez estrutural e a capacidade de dissipação térmica do conjunto.

No entanto, o projeto do G5 mostrou-se mais frágil do que o do G4. Os componentes aliviados, somados às bronzinas mais estreitas, apresentaram maior propensão a falhas em regime de uso intenso. Entre os problemas relatados estavam carbonização do óleo e entupimento do pescador, resultando em falhas graves de lubrificação (como o acendimento intermitente da luz de óleo) e desgaste acelerado das bronzinas. Também foram observadas falhas na bomba de óleo, oxidação em velas e bobinas de ignição, além de ocorrência frequente de ruídos nos tuchos e desgaste prematuro de partes móveis.

Relatos de proprietários, compilados em plataformas digitais como o Reddit, reforçam essa percepção. Diversos usuários descreveram o motor EA111 da geração G5 como “extremamente problemático”, citando pressão de óleo baixa e ruídos de tuchos mesmo em baixas quilometragens. Há registros de falhas graves em veículos com apenas 6 mil km de uso, alguns ainda dentro da garantia, acompanhadas de formação recorrente de borra de óleo, mesmo quando utilizado o lubrificante especificado. Registros informais de usuários disponíveis em fóruns públicos, como o Reddit, foram consultados apenas como percepção de uso real. Tais relatos não possuem caráter científico, mas ajudam a ilustrar a frequência com que proprietários reportam problemas recorrentes nos motores da geração G5. (REDDIT, 2020).

Dessa forma, o Gol G5 2009, equipado com o motor EA111, tornou-se um caso notório de falhas severas, associadas tanto à mudança inadequada de lubrificante quanto ao projeto de componentes internos menos robustos. O resultado foi o aumento do desgaste prematuro, ruídos característicos e altos custos de manutenção, elementos que comprometeram a reputação consolidada do modelo no mercado brasileiro (VOLKSWAGEN DO BRASIL, 2009; Loureiro,

2009). Diante desse cenário, o objetivo deste estudo é comparar, experimentalmente, o desgaste dimensional e a rugosidade superficial dos pistões das gerações G4 e G5, relacionando tais alterações às modificações geométricas e às condições tribológicas do conjunto pistão cilindro.

Revisão bibliográfica

Motor EA-111 1.0 (vht)

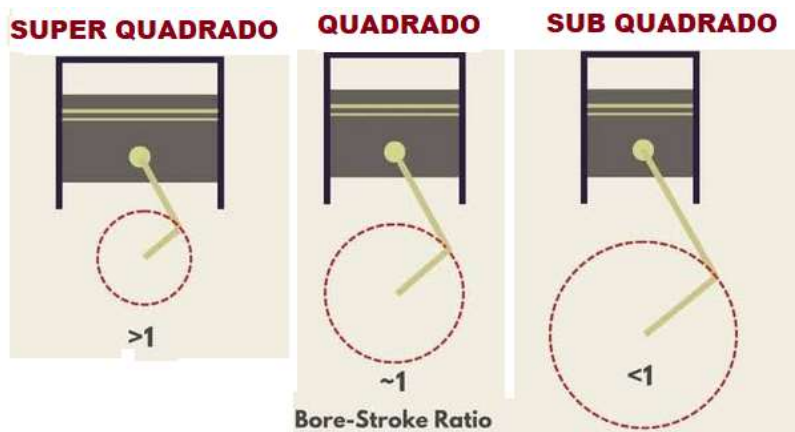
As modificações implementadas no motor EA111 da geração G5 como pistões mais leves, bielas reduzidas e bronzinas estreitas tiveram como objetivo reduzir atrito mecânico e emissões. Contudo, tais alterações comprometeram a robustez estrutural do conjunto, aumentando a sensibilidade ao desgaste em condições de uso severo.

A redução de massa dos pistões permitiu ao motor operar com taxa de compressão mais elevada (13:1 no sistema flex), aumentando o rendimento térmico. Contudo, essa estratégia resultou em maior suscetibilidade a falhas de durabilidade, uma vez que a menor inércia térmica favorece o superaquecimento localizado e a dilatação excessiva, afetando a vida útil do conjunto pistão, anel e camisa (Heywood, 1988; Holmberg et al., 2012).

O motor EA111 1.0 apresenta curso de 70,6 mm e diâmetro de 67,1 mm, caracterizando-o como subquadrado, sendo assim sua relação *Bore/Stroke* é de 0,95, que corresponde à razão entre o diâmetro do cilindro (*Bore*) e o curso do pistão (*stroke*). Valores inferiores a 1 indicam que o curso é maior que o diâmetro, classificando o motor como subquadrado e valores superiores a 1 indicam que o curso é menor que o diâmetro considerando-o motor super quadrado e valores iguais a 1 indicam que o diâmetro e o curso são a mesma medida, como mostra a Figura 1.

Nessa configuração, a geometria favorece maior alavancagem do virabrequim, o que resulta em maior torque em baixas rotações, característica desejável para uso urbano. Em contrapartida, motores subquadrados apresentam limitações em altas rotações, além de impor maiores esforços mecânicos sobre pistões, bielas e bronzinas, já que o movimento alternativo do pistão é mais longo, aumentando as cargas dinâmicas e a velocidade média do pistão (Heywood, 1988; Loureiro, 2009).

Figura 1 – Tipos de quadrados nos motores.



Fonte: HEMRAJ ELECTRONIC PROJECT (2022) Editado (2025)

Função do pistão

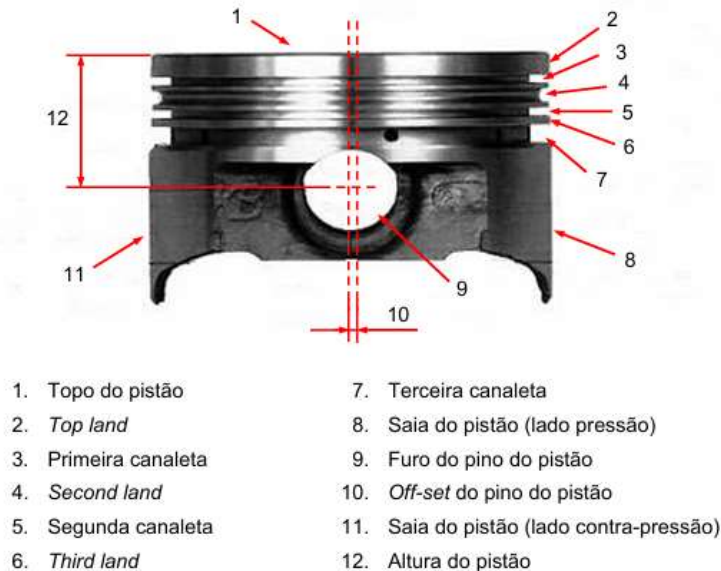
A função principal do pistão, geralmente fabricado em liga de alumínio, é comprimir o ar ou a mistura ar combustível dentro da câmara, elevando pressão e temperatura, além de transmitir a energia da combustão à biela, expulsar os gases resultantes da queima e dissipar parte da carga térmica recebida, principalmente através dos anéis de vedação e do contato com as paredes do cilindro (Heywood, 1988).

Para que o pistão exerça suas funções adequadamente, é necessário que todo o conjunto do motor esteja em condições ideais. Isso implica que cilindro e pistão devem respeitar as tolerâncias geométricas e dimensionais especificadas pelo fabricante, o sistema de lubrificação deve operar com pressão adequada e óleo em boas condições (sem degradação ou contaminação), e o sistema de arrefecimento deve manter a temperatura de trabalho controlada.

A falha em qualquer um desses subsistemas compromete diretamente a durabilidade do pistão e do motor como um todo o formato do pistão exerce influência tanto no rendimento mecânico quanto no rendimento térmico do motor.

A Figura 2 exemplifica os principais elementos geométricos, como cabeça, anéis, canaletas e saias.

Figura 2 – Principais pontos da geometria do pistão



Fonte: Loureiro, T. W., 2009 (2025)

De acordo com Taylor (1971), as saias do pistão têm papel determinante nas perdas por atrito. Elas guiam o movimento dentro do cilindro e suportam as cargas laterais oriundas da combustão. A saia voltada ao lado de pressão recebe maior esforço durante a expansão, enquanto a saia oposta (lado de contrapressão) sofre carga no movimento de retorno. Na prática, a saia funciona como um mancal de deslizamento pivotado, o que explica sua grande relevância para o atrito e para a dissipação de esforços laterais.

No EA-111 para a geração 5, observa-se uma redução significativa do tamanho e da massa do pistão em relação ao G4, a massa do G5 é de 0,155 Kg já o do G4 é de 0,201 Kg, uma redução de 22% mais leve. Na Figura 3 observa-se propriamente dito a geometria dos pistões, mas também o comprimento da biela das duas gerações, sendo uma mais comprida que outra onde altera a relação *Bore Stroke* do motor comentado anteriormente.

Figura 3 – Comparativo dimensional e geométrico entre pistões G4 e G5.

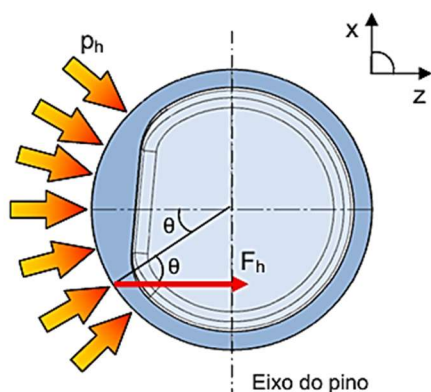


Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=JpnYGcdhFiE> (2022)

Esforço lateral e suas implicações tribológicas

Motores de ignição por centelha operam segundo o ciclo Otto de quatro tempos, no qual o pistão executa movimentos alternados entre PMS (ponto morto superior) e PMI (ponto morto inferior) para realizar admissão, compressão, combustão e escape (Heywood, 1988). Durante esses deslocamentos, a inclinação natural da biela em relação ao eixo do cilindro gera componentes laterais de força que pressionam a saia do pistão contra a parede da camisa como mostra a Figura 4, fenômeno fundamental para compreender os mecanismos de desgaste avaliados neste trabalho.

Figura 4 - Esquema da distribuição das forças normais à saia do pistão



Fonte: Loureiro, C. R., 2009.

A literatura clássica (heywood, 1988; taylor, 1971) descreve que essas forças laterais variam ao longo do ciclo, atingindo valores máximos na fase de expansão, quando a pressão dos gases é elevada. Nessa condição, parte do filme lubrificante pode ser temporariamente reduzido, levando ao regime de lubrificação mista, no qual ocorrem contatos intermitentes metal, metal.

O esforço lateral depende principalmente de três fatores:

Ângulo instantâneo da biela, que determina a componente horizontal da força;

Pressão de combustão, que modifica a intensidade da carga aplicada;

Relação geométrica L/R (comprimento da biela e raio do virabrequim).

Heywood (1988) destaca que uma redução da relação L/R aumenta a excentricidade do pistão e intensifica a força lateral aplicada sobre a saia. Isso acelera desgaste, aumenta a dissipação térmica local e pode levar à ovalização da saia em uso prolongado. Estudos modernos de atrito em motores (Holmberg; Andersson; Erdemir, 2012) reforçam que o comportamento tribológico do conjunto é extremamente sensível a variações geométricas e às condições de lubrificação, especialmente em motores compactos de alta taxa de compressão como o EA-111.

Simulações numéricas descritas por Loureiro (2009) para o motor EA-111 mostram faixas de força lateral entre 200 e 400 N e coeficiente de atrito médio entre 0,05 e 0,10, compatíveis com regime misto. Embora esses resultados sirvam como referência, outros autores (Mahle, 2012; MS MOTOR SERVICE, 2025) confirmam independentemente que pistões com menor altura de saia, massa reduzida ou área de contato limitada tendem a apresentar maior sensibilidade ao calor e ao atrito lateral, reforçando que o fenômeno não é exclusivo do modelo estudado por Loureiro.

Assim, ao analisar pistões G4 e G5, torna-se essencial considerar como essas forças laterais influenciam a rugosidade final, o desgaste por polimento e a capacidade de retenção do filme lubrificante, pontos diretamente avaliados neste estudo experimental.

Acabamento superficial, lubrificação e desgaste

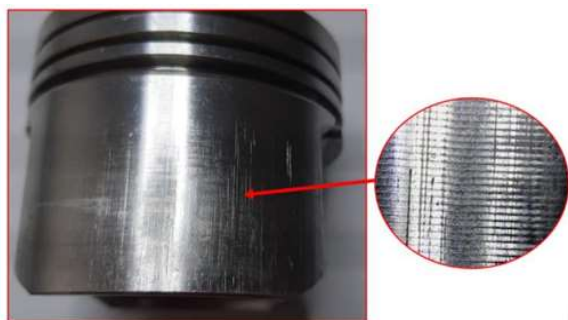
A rugosidade superficial (R_a) exerce papel decisivo na interação pistão camisa, superfícies muito lisas reduzem a capacidade de retenção de óleo, favorecendo o atrito limite, já rugosidades mais elevadas aumentam a presença de microreservatórios de óleo, estabilizando o regime hidrodinâmico (Mahle, 2012; MOTOR SERVICE, 2025). Holmberg et al. (2012) destacam que o equilíbrio entre rugosidade, velocidade relativa e viscosidade define a espessura do filme lubrificante e, portanto, o nível de desgaste esperado. No contexto do EA-111, a adoção de pistões mais leves e com menor área de contato caso do G5 implica alteração significativa na distribuição de esforços e na dinâmica da lubrificação. A literatura tribológica mostra que pistões compactos sofrem maior variação térmica e maior sensibilidade ao atrito, especialmente quando operam em combustíveis de alta temperatura de chama, como o etanol (Heywood, 1988; Mahle, 2012). Esses fatores justificam a investigação experimental das rugosidades e dos desgastes dimensionais apresentados neste trabalho.

Falhas de pistões

Os pistões automotivos operam em condições severas de carga térmica, mecânica e tribológica. Assim, sua durabilidade depende diretamente da integridade do sistema de lubrificação, do controle térmico, da montagem correta e da qualidade dos materiais. Quando qualquer desses fatores é comprometido, surgem modos de falha característicos, amplamente documentados na literatura técnica (Heywood, 1988; Mahle, 2012; Motta; Soares, 2021). Na Figura 5 visualiza-se uma única ilustração composta, as falhas mais recorrentes em pistões, identificadas em motores. Cada subfigura (A–D) representa um tipo específico de falha,

Figura 5 – Principais modos de falha em pistões automotivos A-D

A - Desgaste abrasivo da saia

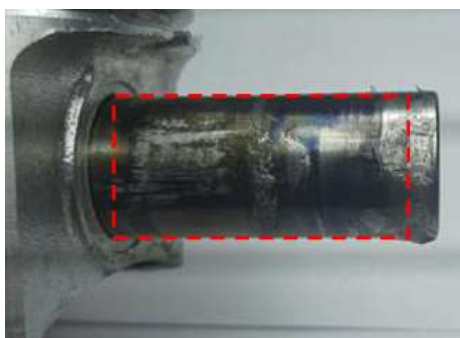


B- Montagem incorreta, seta invertida



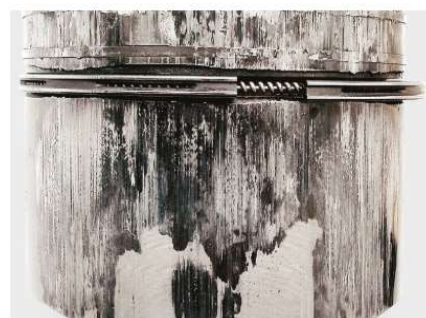
Fonte: Motta, A. F.; Soares, D. R. (2021)

C- Engripamento do pino do pistão



Fonte: Motta, A. F.; Soares, D. R. 2021

D- Superaquecimento



Fonte: MS MOTOR SERVICE. 2025

A) Desgaste abrasivo (Figura 12-A) ocorre quando partículas sólidas provenientes do óleo contaminado ou do ambiente entram na interface pistão-camisa. Essas partículas promovem riscos longitudinais e aumentam o atrito, reduzindo a vedação e elevando o consumo de óleo.

B) Montagem incorreta (Figura 12-B). Pistões possuem pino levemente descentralizado e seta indicativa de montagem. Quando instalados invertidos, ocorre perda do ponto de apoio durante a compressão, gerando ruído (“batida de saia”), aumento de vibração e desgaste irregular.

C) Engripamento do pino (Figura 12-C). Resultado de montagem sem controle térmico ou sem lubrificação adequada. O pino pode travar no alojamento, gerando dilatações irregulares e desgaste severo, podendo levar ao travamento completo do conjunto.

D) Superaquecimento (Figura 12-D). Falhas no sistema de arrefecimento ou lubrificação podem elevar excessivamente a temperatura do pistão. Observam-se marcas de fricção, perda de material e engripamento, iniciando na saia ou na cabeça, conforme descrito por Heywood (1988) e pela Motorservice (2025).

Esses mecanismos de falha ajudam a explicar os padrões tribológicos que serão observados na comparação G4 $\times$ G5. Portanto, compreender esses modos de falha reforça a interpretação dos dados de rugosidade e desgaste obtidos experimentalmente.

Metodologia

No presente estudo adota-se uma abordagem experimental e comparativa com o objetivo de caracterizar o desgaste dimensional e a rugosidade superficial de pistões das gerações G4 e G5 do motor Volkswagen EA-111 1.0. O foco da análise é a região da saia, considerando-se a influência geométrica, tribológica e de carga lateral entre as duas gerações.

As análises foram realizadas em pistões usados cujas condições reais de rodagem eram desconhecidas, mas apresentavam sinais evidentes de desgaste acumulado, como perda da variação dimensional e alteração da rugosidade. Assim, o termo “desgaste prolongado” refere-se ao uso típico de motores em serviço, independentemente da quilometragem exata. A ausência do histórico de quilometragem é uma limitação assumida neste estudo, portanto os resultados devem ser interpretados como uma comparação entre padrões de desgaste, e não como uma correlação direta com a vida útil.

A escolha da quantidade como uma coleta de dados sendo 8 unidades para cada geração (Figura 6) decorreu da disponibilidade real de amostras coletadas em oficinas da região, garantindo variedade suficiente para análise estatística básica, a medição foi feita com micrômetro e rugosímetro ao longo das saias dos dois lados dos pistões. Utilizou-se dois pistões novos de referência das duas gerações, em embalagem lacrada do fabricante, garantindo que não houve manipulação ou desgaste prévio.

Figura 6 – Amostras dos pistões usados G4 na esquerda e G5 na direita



Fonte: próprio autor. (2025)

Para avaliar diferenças construtivas entre as gerações, os pistões foram modelados em *SolidWorks* 2019, permitindo medir dimensões como:

- altura total do pistão,
- Espessura das paredes,
- Área aproximada de contato da saia.
- Massa dos pistões (peso);
- Deslocamento *off-set*;
- Distancia do centro do pino ao topo do pistão

A seguir a Figura 7 mostra claramente as diferenças de geometria dos pistões, sendo o pistão G4 na parte superior e o G5 na parte inferior.

Figura 7 – Ilustração CAD de diferença de geometria dos pistões



Fonte: próprio autor. (2025)

Medição dimensional com micrômetro

A geometria das saias foi medida com:

- Micrômetro Mitutoyo SJ-210 (50-75mm)
- Resolução: 0,01 mm,

Seis regiões da saia foram medidas conforme a Figura 8 (superior, intermediária e inferior, em ambos os lados). Os valores foram organizados em:

- Quadro 2 - Medições do pistão G4 (micrômetro);
- Quadro 3 - Medições do pistão G5 (micrômetro).

Figura 8 – Posição das 6 medições ao longo da saia / micrômetro



Fonte: próprio autor. (2025)

Medição de rugosidade superficial (Ra)

A rugosidade média aritmética foi medida com:

- Rugosímetro portátil *Instrutherm Rug-200*,
- Faixa: 0,05–15 μm ,
- Ponta de diamante 2 μm ,
- *Cut-off* de 0,8 mm. (deslocamento na medição)

Nove pontos foram definidos simetricamente na saia, conforme ilustração reorganizada na Figura 9, a imagem a seguir também ilustra as regiões de medição de rugosidade ao longo da saia conforme os pontos estabelecidos.

Figura 9 – Nove pontos de medição e ilustração da aplicação do rugosímetro



Fonte: próprio autor. (2025)

Os resultados foram compilados em:

- Quadro 4 — Rugosidade Ra dos pistões G5 (lado direito);
- Quadro 5 — Rugosidade Ra dos pistões G5 (lado esquerdo);
- Quadro 6 — Rugosidade Ra dos pistões G4 (lado esquerdo);
- Quadro 7 — Rugosidade Ra dos pistões G4 (lado direito).

Para analisar a variabilidade das amostras calculou-se média, desvio padrão, valores mínimo/máximo, distribuição de dados para comparação direta entre G4 e G5. O pistão novo foi utilizado como referência geométrica (dimensões ao longo da saia do pistão), referência de rugosidade original (superfície ao longo da saia do pistão). Não é tratado como padrão universal, apenas como padrão de fabricação da marca (Suloy) analisada. Essa limitação foi incluída e será retomada nos resultados.

Embora a ANOVA pudesse ser utilizada para avaliar diferenças entre grupos, a ausência de controle sobre a quilometragem real e condições de uso das amostras impede a aplicação de um modelo estatístico paramétrico robusto.

Análise dos resultados

Caracterização geométrica e dados do modelo CAD

A modelagem tridimensional dos pistões no *SolidWorks* 2019 permitiu quantificar diferenças dimensionais relevantes entre as gerações G4 e G5. Os resultados obtidos estão resumidos no Quadro 1, contemplando massa, altura total, altura da saia, espessura da saia, offset do pino, distância do pino ao topo e área real de contato lateral.

Esses parâmetros são essenciais para interpretar o comportamento tribológico, pois influenciam diretamente na rigidez estrutural da saia, distribuição da força lateral, capacidade de dissipação térmica, estabilidade geométrica sob carga, formação e sustentação do filme lubrificante.

A redução de 22% na massa do pistão G5 diminui as forças inerciais e contribui para menor atrito no ciclo ideal de projeto. Entretanto, como discutido por Heywood (1988) e Mahle (2012), pistões com menor massa, apresentam menor inércia térmica, aquecem mais rapidamente, sofrem maiores dilatações locais, tornam-se mais suscetíveis ao polimento por atrito.

Diferença na área de contato da saia, o pistão G5 possui 46% menos área de contato lateral do que o G4, isso é extremamente relevante, pois significa, maior pressão superficial na interface pistão camisa, maior sensibilidade ao colapso do filme de óleo, desgaste acelerado, especialmente por polimento, maior tendência à ovalização local na saia.

Altura da saia no G5 é 9,5 mm mais curta, reduzindo a zona de suporte lateral, e 2,5 mm de espessura mais fina, reduzindo rigidez estrutural, mais suscetível à deformação elástica sob carga lateral. Essa redução geométrica está alinhada com os padrões de desgaste observados.

Offset maior no G5 impacta no esforço lateral, ou seja, um *off-set* maior desloca o centro geométrico do pistão, modificando-o ângulo de inclinação no início do curso, instante de aplicação da força lateral, a magnitude da reação entre saia e cilindro.

Embora o *offset* maior reduza ruído de saia e melhore conforto, ele aumenta picos de força lateral, concentra desgaste em regiões menores.

Isso coincide com os resultados de rugosidade mais baixa (polimento) em pontos específicos do lado direito da saia G5.

Quadro 1 – Dados do *Solid Works* 2019

Dados de geometria & Massa do <i>Solid Works</i> 2019	G4	G5
Massa	201 g	157 g
Distancia <i>off-set</i>	20 mm	23,5 mm
Altura da saia	34 mm	24,5 mm
Altura total	50 mm	38 mm
Espessura da saia	4,5 mm	2 mm
Distância do centro do pino até o topo do pistão	31 mm	23,5 mm
Área de contato da saia	2239,6 mm ²	1202,45 mm ²

Fonte: próprio autor. (2025)

Desgaste dimensional da saia

Os Quadros 2 e 3 apresentam as medições micrométricas dos diâmetros nos seis pontos distribuídos ao longo da saia dos pistões G5 e G4, respectivamente, bem como as médias e desvios-padrão de cada amostra. De maneira geral, as amostras usadas de ambas as gerações apresentaram redução de diâmetro em relação aos pistões novos de referência, com variações típicas da ordem de centésimos de milímetro.

No conjunto G5, observa-se maior dispersão dos valores entre as amostras, com alguns pistões apresentando ovalização mais pronunciada em regiões específicas da saia. Isso indica uma sensibilidade maior a deformações locais, coerente com a menor altura e menor rigidez da saia. Já os pistões G4 tendem a apresentar desgaste mais homogêneo em relação ao G5.

O Gráfico 1 de barras construído a partir dos Quadros 2 e 3 (diâmetro médio por pistão) evidenciam essa diferença de comportamento, no G4 as barras de diâmetro das amostras usadas se mantêm mais próximas do pistão novo já no G5, há amostras que se afastam mais do valor de referência, indicando maior variação geométrica após o uso.

Quadro 2 - Medições do pistão G4 (micrômetro)

PISTÃO GERAÇÃO 4 (mm)							CÁLCULOS (mm)	
PEÇA	MEDIDA 1	MEDIDA 2	MEDIDA 3	MEDIDA 4	MEDIDA 5	MEDIDA 6	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
PISTÃO NOVO	67,07	66,9	66,93	66,87	67,06	66,93	66,960	0,077
PISTAÕ 1	67,06	66,87	67,07	66,93	66,99	66,89	66,968	0,078
PISTAÕ 2	67,06	66,99	66,04	66,98	66,97	66,97	66,835	0,357
PISTAÕ 3	67,08	66,86	66,9	66,85	66,94	66,91	66,923	0,076
PISTAÕ 4	67,03	66,96	67,02	66,92	66,97	66,99	66,982	0,037
PISTAÕ 5	66,96	66,94	66,9	66,94	66,96	66,95	66,942	0,020
PISTAÕ 6	67,08	66,98	66,97	66,92	66,99	66,91	66,975	0,056
PISTAÕ 7	67,03	66,99	66,93	66,93	67,03	66,93	66,973	0,045
PISTAÕ 8	67,08	66,91	66,94	66,94	67,01	66,91	66,965	0,061
MÉDIA	67,05	66,93	66,86	66,92	66,99	66,932222	66,95	0,0898

Fonte: próprio autor. (2025)

Quadro 3 - Medições do pistão G5 (micrômetro)

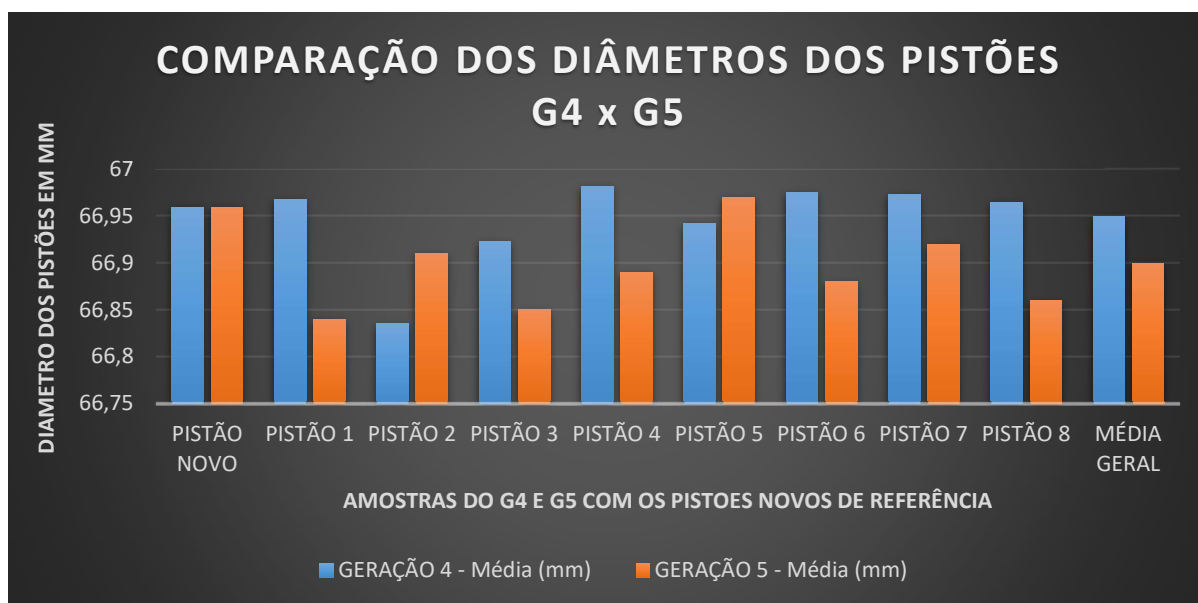
PISTÃO GERAÇÃO 5 (mm)					CÁLCULOS (mm)			
AMOSTRAS	MÉDIA 1	MÉDIA 2	MÉDIA 3	MÉDIA 4	MÉDIA 5	MÉDIA 6	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
PISTÃO NOVO	67,07	66,9	66,93	66,87	67,06	66,93	66,96	0,077
PISTAÕ 1	66,67	66,92	66,89	66,82	66,94	66,82	66,84	0,090
PISTAÕ 2	66,88	66,91	66,95	66,84	66,97	66,9	66,91	0,043
PISTAÕ 3	66,79	66,85	66,92	66,8	66,88	66,87	66,85	0,045
PISTAÕ 4	66,95	66,83	66,9	66,85	66,95	66,85	66,89	0,048
PISTAÕ 5	66,97	66,94	67	66,96	66,99	66,93	66,97	0,025
PISTAÕ 6	66,84	66,89	66,94	66,81	66,92	66,88	66,88	0,044



PISTÃO 7	66,9	66,93	66,98	66,86	66,96	66,91	66,92	0,039
PISTÃO 8	66,83	66,88	66,91	66,79	66,9	66,86	66,86	0,041
MÉDIA	66,88	66,89	66,94	66,84	66,95	66,88	66,90	0,050

Fonte: próprio autor. (2025)

Gráfico 1 - Comparação dos diâmetros dos pistões G4 x G5



Fonte: próprio autor. (2025)

Rugosidade superficial – lado de pressão (lado direito)

Os Quadros 4 e 7 e o respectivo Gráfico 2 de rugosidade média (Ra) comparam o lado direito da saia lado de reação da força da biela durante a expansão para as gerações G5 e G4. De maneira geral os pistões G5 apresentam valores médios de Ra menores, frequentemente abaixo de $1,5 \mu\text{m}$ já os pistões G4 concentram-se em uma faixa mais elevada de rugosidade, com diversos valores entre 2 e $4 \mu\text{m}$.

Essa tendência indica que, no G5, a superfície foi mais polida pelo atrito, reduzindo a rugosidade média. Isso é compatível com um regime de lubrificação mista com pontos de contato metal, metal, em que a superfície tende a “alisar” e perder a textura responsável por reter óleo. Holmberg et al. (2012) descreve esse comportamento como típico de regiões submetidas a altas cargas laterais e filme lubrificante instável.

Nos pistões G4, por outro lado, a rugosidade mais alta mantém ondulações e vales superficiais que atuam como micro reservatórios de lubrificante, favorecendo a sustentação do filme de óleo e reduzindo o atrito seco. Em termos tribológicos, isso sugere uma superfície mais adequada ao regime hidrodinâmico ou a uma lubrificação mista menos severa.

Quadro 4 - Rugosidade Ra dos pistões G5 (lado direito)

PISTÃO GERAÇÃO 5 Lado Direito (Ra μm)											
AMOS TRAS	MED IDA 1	MED IDA 2	MED IDA 3	MED IDA 4	MED IDA 5	MED IDA 6	MED IDA 7	MED IDA 8	MED IDA 9	MÉ DIA	DES VIO PAD RÃO
PISTÃO NOVO	2,92	3,28	2,486	2,659	2,761	3,105	2,496	2,553	2,635	2,766	0,264
PISTÃO O 1	0,769	0,587	0,401	1,355	0,145	0,908	0,094	0,112	1,387	0,640	0,476
PISTÃO O 2	0,798	0,612	0,82	3,124	1,215	1,202	2,355	1,626	1,389	1,460	0,767
PISTÃO O 3	1,574	0,733	1,11	2,817	2,828	2,812	2,808	2,849	3,016	2,283	0,835
PISTÃO O 4	0,711	0,519	0,995	1,138	0,678	1,288	1,139	0,484	0,756	0,856	0,275
PISTÃO O 5	0,959	0,84	0,89	1,2	0,484	1,345	0,949	0,842	1,532	1,005	0,293
PISTÃO O 6	0,434	0,541	0,684	0,978	0,816	0,064	0,071	0,238	0,685	0,501	0,306
PISTÃO O 7	0,811	1,423	1,094	0,503	0,812	1,697	0,751	0,704	0,755	0,95	0,362
PISTÃO O 8	0,889	0,432	1,051	2,549	3,217	3,218	1,725	1,358	2,294	1,859	0,958

MÉDIA						1,737				1,36	
A	1,096	0,996	1,059	1,814	1,440	67	1,376	1,196	1,605	9	0,504

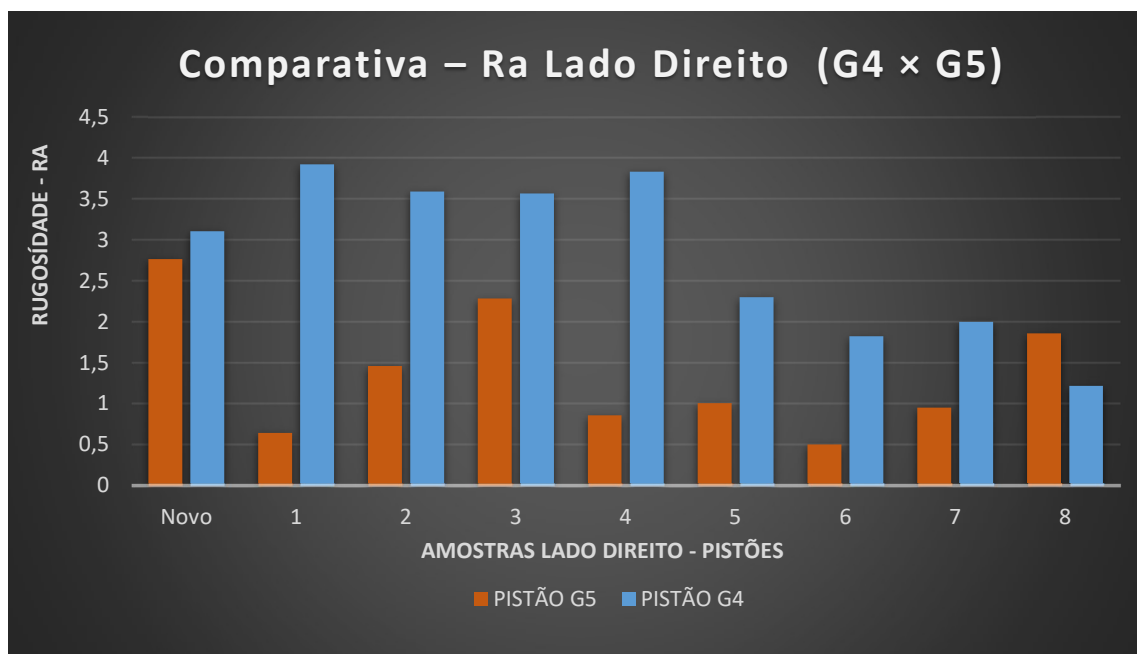
Fonte: próprio autor. (2025)

Quadro 7 - Rugosidade Ra dos pistões G4 (lado direito).

PISTÃO GERAÇÃO 4 Lado Direito (Ra µm)											
AMOSTRAS	MÉDIDA 1	MÉDIDA 2	MÉDIDA 3	MÉDIDA 4	MÉDIDA 5	MÉDIDA 6	MÉDIDA 7	MÉDIDA 8	MÉDIDA 9	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
PISTÃO NOVO	2,913	3,816	2,6	3,094	3,102	3,040	3,151	3,199	3,027	3,105	0,302
PISTÃO 1	1,461	2,035	2,998	4,840	4,946	4,924	4,572	4,825	4,7	3,922	1,300
PISTÃO 2	1,259	2,57	1,171	4,656	4,694	4,923	4,385	4,446	4,215	3,591	1,423
PISTÃO 3	1,234	2,064	1,486	4,371	4,661	4,588	4,586	4,636	4,482	3,568	1,412
PISTÃO 4	1,103	2,493	2,894	4,668	4,632	4,906	4,584	4,549	4,66	3,832	1,264
PISTÃO 5	0,752	0,382	0,633	2,576	2,897	4,251	3,111	2,561	3,557	2,302	1,308
PISTÃO 6	0,552	0,495	0,541	2,069	2,022	2,895	2,649	1,942	3,23	1,822	0,997
PISTÃO 7	0,953	1,998	1,974	1,119	2,19	2,958	3,173	1,781	1,832	1,998	0,690
PISTÃO 8	0,465	0,36	0,637	0,711	0,727	0,325	0,783	3,442	3,484	1,215	1,211
MÉDIA	1,188	1,801	1,659	3,123	3,319	3,646	3,444	3,487	3,687	2,817	1,101

Fonte: próprio autor. (2025)

Gráfico 2 - Comparação dos valores de rugosidade dos pistões G4 x G5 do lado direito



Fonte: próprio autor. (2025)

Rugosidade superficial – lado de retorno (lado esquerdo)

Os Quadros 4 e 5 e seus gráficos apresentam os resultados de rugosidade no lado esquerdo da saia, lado de retorno da biela. Em ambos os conjuntos, os valores de Ra tendem a ser ligeiramente maiores que no lado direito, indicando menor solicitação de contato direto. Essa assimetria é coerente com os modelos numéricos de força lateral: o pico de pressão ocorre no lado de reação da biela, enquanto o lado oposto recebe cargas menores e mais distribuídas ao longo do ciclo.

Nos pistões G5, mesmo o lado esquerdo mostra, em várias amostras, valores de Ra abaixo de 1,2 μm , sugerindo que o polimento se estende também à face de retorno, embora de forma menos intensa. Nos pistões G4, a rugosidade média permanece mais alta, com variação entre 2 e 3 μm em boa parte das amostras, reforçando a ideia de que o G4 preserva a textura necessária para o armazenamento de óleo mesmo após o uso.

A comparação no Gráfico 3 entre G4 e G5 para esse lado mostra um padrão consistente, G4 mais áspero, G5 mais polido. Essa diferença de textura está diretamente ligada ao tipo de desgaste predominante em cada geração.

Quadro 5 - Rugosidade Ra dos pistões G5 (lado esquerdo)

PISTÃO GERAÇÃO 5 Lado Esquerdo (Ra μm)											
AMOS TRAS	MED IDA 1	MED IDA 2	MED IDA 3	MED IDA 4	MED IDA 5	MED IDA 6	MED IDA 7	MED IDA 8	MED IDA 9	MÉ DIA	DES VIO PAD RÃO
PISTÃO NOVO	2,995	3,230	3,107	2,798	2,758	2,618	2,970	2,701	2,652	2,870	0,202
PISTÃO O 1	0,465	0,776	0,570	0,217	0,289	0,263	0,089	0,085	1,276	0,448	0,362
PISTÃO O 2	0,576	0,574	1,523	0,778	0,662	1,952	1,623	1,508	2,469	1,296	0,643
PISTÃO O 3	0,829	0,598	0,681	2,745	3,109	3,381	2,996	2,646	2,302	2,143	1,059
PISTÃO O 4	0,618	0,413	0,774	0,960	0,572	1,069	1,045	0,590	0,570	0,735	0,224
PISTÃO O 5	0,912	0,898	0,952	0,632	0,951	1,015	0,970	0,958	0,965	0,917	0,106
PISTÃO O 6	0,554	0,758	0,380	0,635	1,227	1,851	1,268	1,332	2,081	1,121	0,555
PISTÃO O 7	0,649	0,642	0,452	1,099	0,827	0,460	2,083	0,527	0,752	0,832	0,482
PISTÃO O 8	0,743	0,597	0,783	1,917	2,052	1,652	2,862	1,417	1,058	1,453	0,703
MÉDIA	0,927	0,943	1,025	1,309	1,383	1,585	1,767	1,307	1,569	1,313	0,482

Fonte: próprio autor (2025)

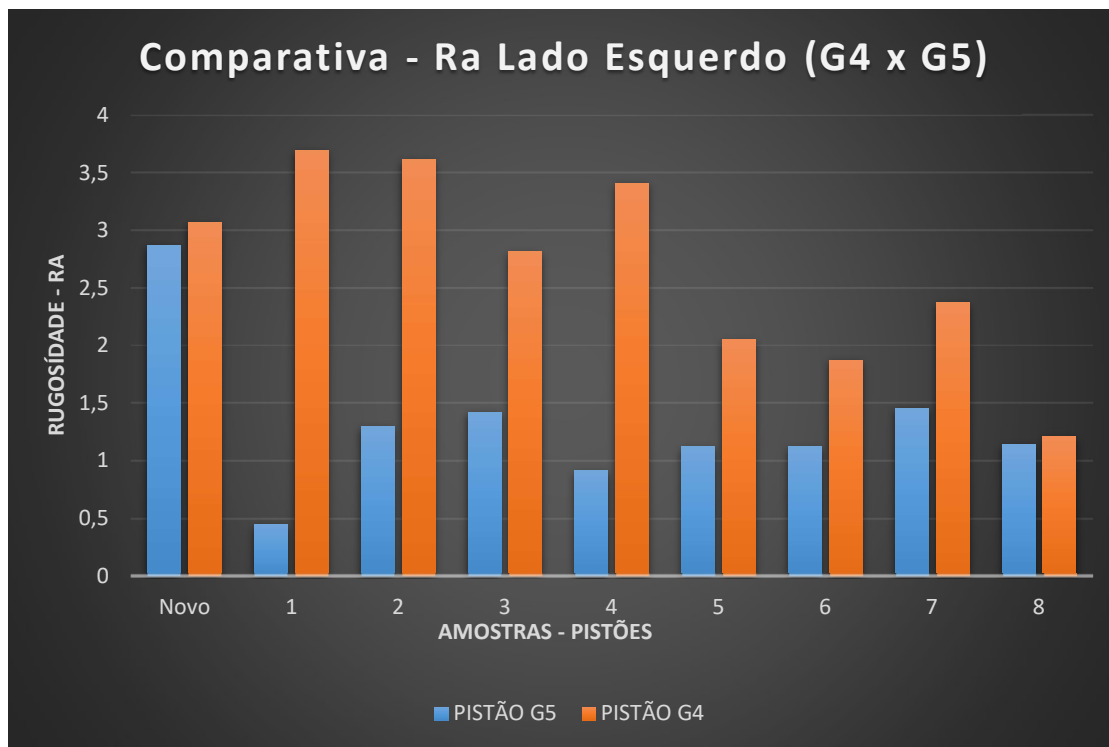
Quadro 6 - Rugosidade Ra dos pistões G4 (lado esquerdo)

PISTÃO GERAÇÃO 4 Lado Esquerdo (Ra μm)											
AMOS TRAS	MED IDA 1	MED IDA 2	MED IDA 3	MED IDA 4	MED IDA 5	MED IDA 6	MED IDA 7	MED IDA 8	MED IDA 9	MÉ DIA	DES VIO PAD RÃO
PISTÃO NOVO	3,059	3,102	3,168	2,926	2,957	3,002	3,242	3,085	3,045	3,065	0,094
PISTÃO O 1	1,244	3,42	0,76	4,227	4,459	4,919	4,817	4,593	4,831	3,697	1,506
PISTÃO O 2	1,002	2,398	0,93	4,309	4,601	4,986	4,907	4,755	4,635	3,614	1,594
PISTÃO O 3	1,142	2,767	1,655	4,389	3,055	3,335	3,291	2,889	2,783	2,812	0,894
PISTÃO O 4	1,691	3,431	1,082	4,605	4,808	3,431	4,622	3,744	3,247	3,407	1,219
PISTÃO O 5	0,563	0,602	3,359	2,963	3,478	2,648	3,152	0,879	0,813	2,051	1,219
PISTÃO O 6	0,32	0,605	0,297	2,053	1,745	3,276	3,711	2,329	2,517	1,873	1,180
PISTÃO O 7	0,79	0,93	1,666	2,562	2,633	3,311	3,397	2,985	3,086	2,373	0,943
PISTÃO O 8	0,628	1,09	0,590	3,005	1,605	1,485	0,673	0,964	0,838	1,209	0,721
MÉDIA	1,160	2,038	1,501	3,449	3,260	3,377	3,535	2,914	2,866	2,678	1,041

Fonte: próprio autor (2025)



Gráfico 3 - Comparação dos valores de rugosidade dos pistões G4 x G5 do lado esquerdo



Fonte: próprio autor. (2025)

Integração dos resultados geométricos, de rugosidade e do esforço lateral

Integrando os dados geométricos (modelos CAD), dimensionais (micrômetro) e de rugosidade (rugosímetro), é possível traçar um quadro mais completo, o pistão G5 possui menor massa e saia mais curta, o que reduz o atrito dinâmico e contribui para a eficiência energética, mas aumenta a pressão de contato local na região da saia, sob a ação das forças laterais, essa combinação favorece polimento da superfície, redução de Ra e maior sensibilidade à ruptura do filme de óleo. O pistão G4, com maior altura de saia e área de contato, distribui melhor as cargas laterais, apresenta desgaste dimensional mais homogêneo e mantém rugosidade mais alta, condição mais favorável à retenção de lubrificante.

Os gráficos comparativos entre G4 e G5 (Ra lado direito e Ra lado esquerdo) deixam claro esse contraste, as amostras do G5 se aproxima mais de valores de superfície “espelhada”, enquanto a do G4 permanece na faixa de rugosidade típica recomendada para pistões de liga de

alumínio submetidos a lubrificação mista, conforme relatado por Mahle (2012), Motta e Soares (2023) e MS Motorservice (2025).

É importante ressaltar que não foi possível conhecer a quilometragem exata de cada pistão usado, o que impede afirmar quantitativamente a vida útil remanescente de cada amostra. Os resultados apresentados devem ser interpretados como uma comparação de tendência entre as duas geometrias sob condições reais de uso, e não como uma correlação direta entre quilometragem e desgaste, sendo assim, os resultados obtidos são consistentes com a literatura sobre tribologia de pistões e mostram que a evolução do projeto do EA-111, embora tenha atendido à demanda por maior eficiência, trouxe desvantagens em termos de comportamento tribológico e sensibilidade ao desgaste na geração G5.

Discussão tribológica geral

A correlação entre os resultados experimentais e o modelo numérico confirma que o desgaste na saia dos pistões do motor EA-111 está diretamente associado ao regime de lubrificação mista, em que o filme de óleo é parcialmente rompido nas regiões de maior pressão lateral, promovendo contato metal, metal intermitente.

Nos pistões analisados neste trabalho, os valores de rugosidade remanescentes abaixo desse intervalo sugerem polimento excessivo e consequente redução da capacidade de retenção de óleo, dessa forma, observa-se que: Maior rugosidade ($R_a \approx 2-3 \mu\text{m}$); melhor retenção de óleo e menor atrito seco; Menor rugosidade ($R_a < 1 \mu\text{m}$); aumento do contato direto e desgaste acelerado, na Tabela 7 observa-se a comparativa técnica entre os dois pistões.

Tabela 7 - Síntese comparativa G4 $\times$ G5

PARÂMETRO	GERAÇÃO 4 (G4)	GERAÇÃO 5 (G5)	INTERPRETAÇÃO TÉCNICA
Massa do pistão	$\approx 201 \text{ g}$	$\approx 157 \text{ g}$	Redução de massa = maior eficiência, porém menor rigidez
Área de contato da saia	Alta	Reduzida	Aumenta a pressão superficial no G5



Rugosidade média (Ra)	1,8 a 2,4 μm	0,6 a 1,5 μm	G5 apresenta polimento por atrito
Tipo de contato	Predominantemente hidrodinâmico	Misto, com contato metal, metal	Maior atrito seco no G5
Tendência de desgaste	Moderada	Elevada	Polimento e ovalização local
Retenção de óleo	Boa	Limitada	Dificuldade de lubrificação plena

Fonte: próprio autor. 2025

Conclusão

A análise comparativa entre os pistões das gerações G4 e G5 do motor Volkswagen EA-111 1.0 permitiu identificar diferenças significativas no comportamento geométrico, tribológico e estrutural decorrentes das modificações implementadas no projeto da geração mais recente.

Com base nos dados geométricos obtidos no *SolidWorks*, observou-se que o pistão G5 apresenta redução de massa (de 201 g para 157 g), redução da altura da saia (de 34 mm para 24,5 mm), menor espessura da saia (4,5 mm para 2 mm) e redução de aproximadamente 46% da área de contato lateral (de 2239,6 mm² no G4 para 1202,45 mm² no G5). Tais alterações, embora coerentes com a estratégia de redução de atrito e perdas mecânicas, diminuem a rigidez lateral e aumentam a pressão de contato por unidade de área, favorecendo desgaste mais localizado.

Os resultados de rugosidade (Ra) obtidos experimentalmente reforçam essa interpretação. O pistão G4 apresentou valores médios de rugosidade mais elevados, compatíveis com uma superfície parcialmente preservada e capaz de reter filme lubrificante, característica típica de contato predominantemente misto hidrodinâmico. Em contraste, os pistões G5 apresentaram valores de Ra significativamente menores, indicando polimento superficial e maior probabilidade de contato metal, metal, coerente com regime de lubrificação mista sob maior pressão lateral.

A comparação entre os lados direito e esquerdo da saia evidenciou também a influência do esforço lateral decorrente do movimento da biela, conforme descrito pela literatura tribológica. Os valores menores de R_a no lado de reação da biela demonstram maior solitação e maior intensidade de atrito nessa região, especialmente nos pistões G5, cuja geometria reduzida concentra ainda mais a carga lateral.

É importante destacar que, embora o estudo não disponha do histórico de quilometragem das amostras, o padrão de desgaste encontrado a redução de rugosidade, polimento e maior variabilidade dimensional na geração G5 é coerente com a combinação de menor área de contato, menor espessura de saia e maior sensibilidade à formação e manutenção do filme lubrificante. Assim, mesmo sem conhecer o tempo de uso de cada pistão, os mecanismos de desgaste observados são consistentes com as diferenças geométricas entre as gerações.

Portanto, conclui-se que as modificações introduzidas no pistão G5 atendem ao objetivo de redução de massa e atrito inicial, porém comprometem parcialmente a durabilidade, devido à maior pressão superficial, maior sensibilidade ao atrito lateral e menor capacidade de retenção de óleo. Em contraposição, o pistão G4, mais robusto e com maior área de contato, demonstrou comportamento tribológico mais estável e menor tendência ao polimento excessivo.

Sugere-se que trabalhos futuros incluam simulações tribológicas e térmicas, análises de pressão lateral via método dos elementos finitos, ensaios controlados com pistões de quilometragem conhecida e correlação entre rugosidade, desgaste e temperatura de operação, a fim de complementar e validar os mecanismos propostos neste estudo.

Referências

HEMRAJ ELECTRONIC PROJECT. **Oversquare vs undersquare engines: torque, power and dynamics**. Facebook, 22 mar. 2022. Disponível em: <https://www.facebook.com/hemraj.electronicproject/...> Acesso em: 4 dez. 2025.

HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. New York: McGraw-Hill, 1988.

HOLMBERG, K.; ANDERSSON, P.; ERDEMIR, A. Global energy consumption due to friction in passenger cars. **Tribology International**, v. 47, p. 221–234, 2012.

LOUREIRO, T. W. **Análise paramétrica do conjunto pistão, biela e árvore de manivelas com foco na redução de perdas por atrito e consumo de combustível.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UFRGS.

MAHLE. **Catálogo técnico de pistões e anéis.** Metal Leve, 2012.

MOTTA, A. F.; SOARES, D. R. Análise comparativa de pistões automotivos sob diferentes regimes de desgaste. **Revista Brasileira de Engenharia Mecânica**, v. 40, n. 3, p. 145–153, 2023.

MS MOTOR SERVICE INTERNATIONAL GmbH. **Damage from overheating.** Motorservice Technipedia, 2025. Disponível em: <https://www.ms-motorservice.com/...> Acesso em: 20 set. 2025.

REDDIT. **Depoimentos de proprietários sobre motores VW EA111.** Reddit, 2020. Disponível em: <https://www.reddit.com>. Acesso em: 15 set. 2025.

TAYLOR, C. F. **The internal combustion engine in theory and practice.** Cambridge: MIT Press, 1971.

VOLKSWAGEN DO BRASIL. **Manual de serviço do motor EA111.** São Bernardo do Campo, 2009.

WOSCHNI, G. **A universally applicable equation for the instantaneous heat transfer coefficient in the internal combustion engine.** SAE Technical Paper 670931, 1967.

YOUTUBE. **Diferença do pistão G4 para o G5.** Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=JpnYGcdhFiE>. Acesso em: 31 ago. 2025.