



03 a 05 de dezembro de 2025

As Engenharias na Transformação Digital das PMEs

Caracterização da forma do spray diesel por meio de visão computacional: Influência da micro geometria do bico injetor

Bismark Diniz de Almeida Mendes

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal do Paraná

Débora Pelanda Amaro

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal do Paraná

Fabiano Oscar Drozda

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal do Paraná

Guilherme Henrique Cruz Caetano

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal do Paraná

Robespierre Diniz de Almeida Mendes

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal do Paraná

Resumo: O objetivo geral deste estudo é investigar a correlação entre micro variações geométricas nos orifícios de bicos injetores diesel, decorrentes do processo de fabricação, e a consequente morfologia do spray de combustível. Utilizando análise avançada de imagem e dados dimensionais precisos, busca-se compreender profundamente o impacto dessas variações na qualidade da atomização, um fator essencial para otimizar a eficiência da combustão e minimizar a emissão de poluentes. Para tal, um objetivo específico central é desenvolver e aplicar uma metodologia eficaz de análise quantitativa de imagens de alta velocidade do spray de injeção. Esta abordagem emprega técnicas de visão computacional, com algoritmos personalizados em Python e a biblioteca OpenCV, para extrair parâmetros morfométricos detalhados. A metodologia consiste na captura de imagens do spray por câmeras de alta velocidade, seguida de processamento para segmentação e quantificação. As áreas projetadas dos jatos foram correlacionadas com medições diretas e indiretas da geometria interna dos bicos, incluindo diâmetro de entrada e saída de injeção, fator de conicidade (fator K) e raio de arredondamento. Os resultados demonstram que pequenas variações geométricas influenciam significativamente o padrão do spray, podendo comprometer a eficiência da atomização e, por consequentemente, impactar o desempenho da combustão e os níveis de emissões. Assim, a abordagem proposta contribui para o aprimoramento do controle dimensional na fabricação de bicos e fomenta o desenvolvimento de tecnologias de injeção mais eficientes e emissões reduzidas.

Palavras-chave: injeção diesel, atomização, spray, visão computacional, manufatura, geometria do bico, emissões.

Diesel spray shape characterization using computer vision: Influence of injector nozzle microgeometry

Abstract: The overall objective of this study is to investigate the correlation between micro geometric variations in the orifices of diesel injector nozzles, resulting from the manufacturing process, and the consequent morphology of the fuel spray. Using advanced image analysis and precise dimensional data, the aim is to deeply understand the impact of these variations on atomization quality, an essential factor for optimizing combustion efficiency and minimizing pollutant emissions. To this end,

a central specific objective is to develop and apply an effective methodology for quantitative analysis of high-speed images of the injection spray. This approach employs computational vision techniques, with custom algorithms in Python and the OpenCV library, to extract detailed morphometric parameters. The methodology consists of capturing spray images with high-speed cameras, followed by processing for segmentation and quantification. The projected areas of the jets were correlated with direct and indirect measurements of the internal geometry of the nozzles, including injection inlet and outlet diameter, conicity factor (K-factor), and rounding radius. The results demonstrate that small geometric variations significantly influence the spray pattern, potentially compromising atomization efficiency and, consequently, impacting combustion performance and emission levels. Thus, the proposed approach contributes to the improvement of dimensional control in nozzle manufacturing and fosters the development of more efficient injection technologies with reduced emissions.

Keywords: diesel injection, atomization, spray, computer vision, manufacturing, nozzle geometry, emissions

1. Introdução

A busca por maior eficiência energética e redução das emissões em motores diesel tem colocado a atomização do combustível como ponto central no desenvolvimento de tecnologias de injeção. A qualidade da atomização é fortemente influenciada pela dinâmica do escoamento nos bicos injetores, que depende diretamente da geometria dos orifícios. Regimes turbulentos favorecem a formação de microgotas e a dispersão adequada do spray, promovendo combustão mais eficiente. Já escoamentos laminares tendem a gerar sprays mal distribuídos, comprometendo a mistura ar-combustível e aumentando a emissão de poluentes como material particulado (MP), monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC).

Características como diâmetro, conicidade e raio de arredondamento dos orifícios são determinantes para esses regimes e sensíveis a variações no processo de fabricação. Apesar disso, a inspeção direta e precisa dessas microgeometrias ainda é um desafio, principalmente devido à dificuldade de acesso e limitações dos métodos tradicionais de metrologia. Esse cenário evidencia um gap tecnológico: a ausência de métodos práticos, não invasivos e eficazes para avaliar, de forma integrada, os efeitos da variação dimensional no desempenho do spray. Nesse contexto, técnicas de visão computacional e aprendizado de máquina emergem como ferramentas promissoras para análise indireta da performance de bicos injetores. A partir da aquisição e processamento de imagens de sprays, é possível inferir características da atomização e correlacioná-las com imperfeições geométricas, contribuindo para o controle de qualidade e otimização do processo de fabricação.

Este trabalho propõe uma abordagem quantitativa para investigar como variações geométricas oriundas da fabricação de bicos diesel afetam a área projetada do spray. Para isso, serão utilizadas imagens de câmera de alta velocidade, seguidas de análise computacional para extração de métricas morfométricas. Os resultados serão comparados com medições diretas e indiretas da geometria dos orifícios, com o objetivo de identificar os parâmetros mais críticos para a eficiência da atomização e o desempenho ambiental dos motores.

2. Revisão bibliográfica

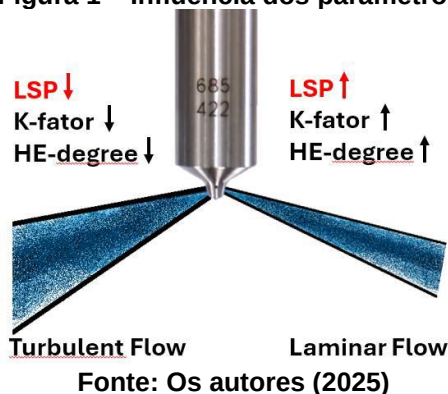
Nesta seção, são abordados os fundamentos teóricos que embasam a pesquisa, incluindo os efeitos do regime de escoamento na atomização de combustíveis em bicos injetores diesel, sua influência nas emissões e no desempenho da combustão, bem como a aplicação de técnicas de visão computacional para a análise quantitativa e qualitativa de escoamentos.

2.1 Atomização e escoamento em bicos injetores diesel

A eficaz atomização do combustível, essencial para uma boa combustão, depende criticamente do regime de escoamento – laminar ou turbulento – dentro dos bicos injetores, um fator quantificado pelo número de Reynolds (Mohamed et al., 2021; Klyus et al., 2024). Escoamentos laminares resultam em gotas maiores e atomização menos eficiente, enquanto escoamentos turbulentos intensificam a fragmentação do jato, gerando gotas menores e mais bem distribuídas, otimizando a mistura ar-combustível (Desantes et al., 2006; Djamari et al., 2022). A geometria do bico, a pressão de injeção e a viscosidade do combustível são determinantes nessa dinâmica (Wang et al., 2015; Zainab & Syed, 2023).

A cavitação, formação e colapso de bolhas de vapor devido a quedas de pressão, pode ocorrer em alta turbulência, auxiliando na quebra do combustível, mas também podendo causar danos ao bico e instabilidades no spray (Karathanassis et al., 2021; Wang et al., 2015). O controle preciso do regime de escoamento é vital: laminar demais prejudica a homogeneidade da nuvem de combustível, e cavitação excessiva desestabiliza o spray (Djamari et al., 2022). Assim, busca-se um equilíbrio entre turbulência adequada e cavitação controlada, influenciado pelo design do bico, a figura 1 apresenta as influências da geometria do bico injetor na formação do escoamento, sendo os fatores relação de conicidade do diâmetro de entrada e saída do furo de injeção (fator K), espessura e arredondamento dos orifícios de injeção (Achelis et al., 2024).

Figura 1 – Influência dos parâmetros.



2.2 Impacto do regime de escoamento nas emissões e no desempenho da combustão

A forma como o combustível é pulverizado e se mistura com o ar na câmara de combustão influencia profundamente a eficiência da queima e a formação de poluentes em motores diesel (Djamari et al., 2022; Klyus et al., 2024). Um escoamento predominantemente laminar no bico injetor resulta em atomização deficiente, com gotas de combustível maiores que dificultam a vaporização e a formação de uma mistura ar-combustível homogênea, levando à combustão incompleta e ao aumento na produção de fuligem (MP), hidrocarbonetos não queimados (HC) e monóxido de carbono (CO) (Djamari et al., 2022; Achelis et al., 2024). Esta ineficiência também se reflete em maior consumo de combustível.

Em contraste, um regime de escoamento com turbulência adequadamente controlada promove a quebra eficiente do jato de combustível em microgotas e assegura uma distribuição de spray mais uniforme, melhorando significativamente a mistura ar-combustível e propiciando uma combustão mais completa e eficiente (Klyus et al., 2024; Zainab & Syed, 2023; Mohamed et al., 2021). Isso resulta em uma tendência de redução nas emissões de material particulado (MP), embora a influência sobre os óxidos de nitrogênio (NOx) seja mais complexa, dependendo das temperaturas de combustão e da disponibilidade de oxigênio (Wang et al., 2015).

A otimização do regime de escoamento interno no bico injetor é, portanto, uma estratégia fundamental para atender às rigorosas legislações ambientais. O design cuidadoso dos

bicos, visando controlar os regimes de escoamento e os fenômenos de cavitação, pode levar a uma diminuição das perdas energéticas e a uma melhoria considerável no desempenho ambiental dos motores diesel (Zainab & Syed, 2023). Um entendimento detalhado da fluidodinâmica interna dos bicos é crucial para o desenvolvimento de tecnologias de combustão mais limpas e eficientes (Desantes et al., 2006).

2.2 Aplicações de visão computacional na análise de escoamentos

A visão computacional tornou-se uma ferramenta analítica versátil e de grande relevância na engenharia de fluidos, permitindo a caracterização detalhada e não invasiva de fenômenos de escoamento, como sprays e cavitação, através da análise de imagens e vídeos (Huzjan et al., 2023; Mohamed et al., 2021). A segmentação de imagens é uma etapa inicial fundamental, permitindo identificar e quantificar regiões de interesse com base em propriedades visuais (Huzjan et al., 2023). Para a aquisição dessas imagens, diversas técnicas de diagnóstico óptico são empregadas, como fotografia de alta velocidade para capturar eventos transientes, e métodos como schlieren e iluminação difusa de fundo (DBI) para visualizar gradientes de índice de refração e, conseqüentemente, variações de densidade ou interfaces (Karathanassis et al., 2021). A velocimetria por imagem de partículas (PIV) também é amplamente utilizada para medir campos de velocidade em escoamentos (Mohamed et al., 2021).

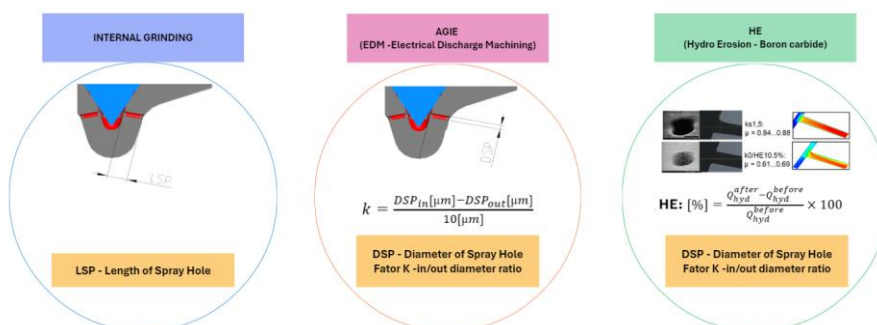
Avanços recentes em aprendizado profundo (deep learning), como o uso de redes neurais convolucionais (CNNs) do tipo U-Net, têm permitido a segmentação precisa de sprays e a estimativa automática de seus parâmetros macroscópicos com alta eficiência (Huzjan et al., 2023). Para investigar regiões opticamente opacas, como o interior de bicos metálicos ou sprays muito densos, técnicas de imagem por raios-X, como a tomografia computadorizada (CT) e a imagem de contraste de fase (XPCI), são particularmente valiosas, fornecendo informações sobre a geometria interna e a dinâmica do spray que seriam inacessíveis à luz visível (Wang et al., 2015).

A extração de dados quantitativos, como a distribuição de tamanho de gotas, é realizada com o auxílio de softwares de processamento de imagem e dispositivos especializados, como o Malvern Spraytec, que utiliza difração a laser (Klyus et al., 2024; Achelis et al., 2024). A combinação dessas técnicas avançadas de imagem e análise computacional representa um progresso significativo, permitindo não apenas a visualização detalhada, mas também a quantificação precisa e a modelagem de fenômenos complexos de escoamento, o que é essencial para o desenvolvimento de sistemas de combustão mais eficientes e com menor impacto ambiental (Huzjan et al., 2023; Karathanassis et al., 2021).

3. Metodologia

A presente investigação empregou uma metodologia experimental de natureza quantitativa, direcionada à avaliação da qualidade dos processos de fabricação de bicos injetores de ciclo Diesel, conforme descritos na figura 2.

Figura 2 – Etapas dos processos de fabricação.



Fonte: Os autores (2025)

O cerne da abordagem metodológica consistiu na análise da morfometria do spray de injeção, obtida por meio de técnicas de processamento digital de imagens capturadas em alta velocidade, correlacionando características do spray com dimensões micrométricas dos bicos.

3.1 Delineamento Experimental e Condições de Teste

Os ensaios foram conduzidos em uma bancada de testes dinamométricos, um equipamento padrão para a aferição de bicos injetores em contextos de controle de qualidade industrial, especificamente para a verificação da vazão e do padrão de pulverização. Empregou-se óleo de calibração em conformidade com a norma ISO 4113, cujas propriedades reológicas são designadas para simular o comportamento do óleo diesel em condições de teste. A pressão de injeção foi rigorosamente mantida em 250 bar para a totalidade dos experimentos, refletindo um parâmetro operacional padrão estabelecido nos protocolos de inspeção de processo para os componentes em estudo.

Notavelmente, a avaliação dos bicos injetores foi realizada com o spray descarregando em meio atmosférico (1 atm de contrapressão), prescindindo da replicação das condições de alta contrapressão encontradas no interior da câmara de combustão de um motor. Esta decisão metodológica alinha-se com os procedimentos de teste de qualidade frequentemente adotados em ambiente industrial, onde o foco reside na inspeção da geometria de pulverização intrínseca do bico, sob condições controladas e simplificadas, facilitando a identificação de desvios de fabricação.

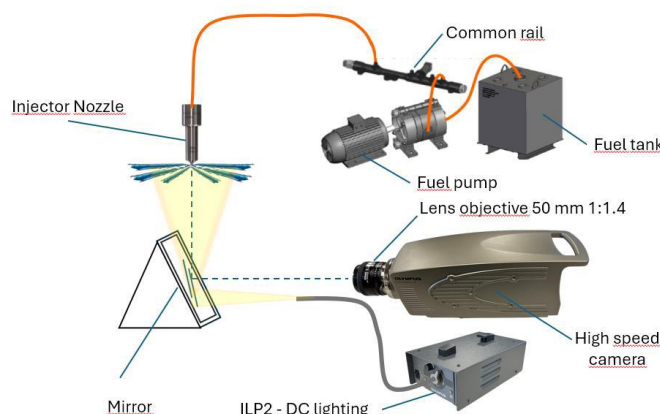
3.2 Materiais e aparato experimental

O escopo do estudo foi circunscrito a um modelo específico de bico injetor, selecionado em função de seu expressivo volume de produção e relevância industrial. Um lote de 20 unidades foi criteriosamente selecionado para os ensaios. Para mitigar a influência de variáveis geométricas secundárias, todos os espécimes selecionados apresentavam espessura de parede similar permitindo que a análise se concentrasse nos efeitos de micro variações dimensionais nos orifícios de injeção.

A bancada, operando com o fluido ISO 4113 à pressão constante de 250 bar, assegurou a repetibilidade das condições de injeção para cada bico testado. O sistema foi configurado para permitir a operação e avaliação individual de cada componente.

A caracterização visual da dinâmica do spray foi realizada utilizando uma câmera de alta velocidade (Olympus, modelo Ispeed-3), acoplada a uma objetiva de 50 mm com abertura máxima de f/1.14. A iluminação da região de interesse foi provida por um sistema de iluminação LED de alta intensidade e corrente contínua (ILP-2), assegurando uma luminância estável e homogênea. A figura 3 apresenta como o sistema foi montado.

Figura 3 – Montagem sistema de aquisição imagens.



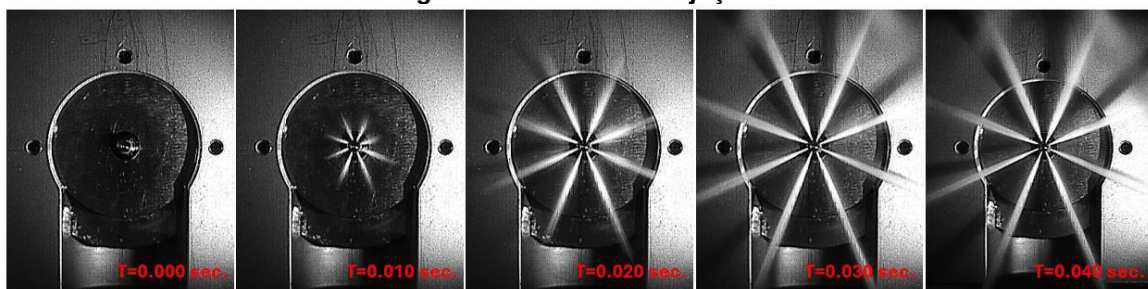
Fonte: Os autores (2025)

A taxa de aquisição foi configurada para 4000 quadros por segundo (fps), gerando imagens digitais com resolução espacial de 816×608 pixels. As imagens foram armazenadas no formato PNG (Portable Network Graphics), um formato lossless, para preservar a fidelidade dos dados visuais para o subsequente processamento. Para assegurar a consistência e a comparabilidade dos dados entre os diferentes ensaios, o arranjo geométrico do sistema óptico (câmera, iluminação e bico injetor) foi mantido rigorosamente fixo. Os parâmetros intrínsecos da câmera, incluindo velocidade do obturador, abertura do diafragma, sensibilidade ISO e plano focal, foram otimizados e fixados antes do início de cada bateria de medições. Este procedimento de calibração e ajuste fino visou maximizar a qualidade da imagem, estabelecendo um compromisso ótimo entre a definição das estruturas fluidodinâmicas do spray e uma exposição fotométrica adequada. Um espelho de primeira superfície foi estrategicamente posicionado para permitir a captura da imagem do spray de forma indireta, protegendo a objetiva da câmera contra a contaminação pelo fluido de teste e otimizando o ângulo de visualização.

O procedimento experimental para cada um dos 20 bicos injetores seguiu as seguintes etapas, instalação individual do bico injetor na bancada de testes, garantindo o alinhamento e a vedação adequados, a ativação do ciclo de injeção sob os parâmetros operacionais pré-estabelecidos (250 bar, fluido ISO 4113) e o registro videográfico contínuo da formação, desenvolvimento e estabilização do spray utilizando o sistema de alta velocidade.

Os arquivos de vídeo resultantes (formato AVI) foram submetidos a um processo de extração de quadros. Um script computacional, aproveitando a biblioteca FFmpeg, foi desenvolvido para automatizar a decomposição dos vídeos em sequências de imagens individuais. Cada quadro foi salvo como um arquivo PNG (Portable Network Graphics), conforme apresentado na figura 4 em um diretório dedicado, sistematicamente nomeado para rastreabilidade. Para a análise subsequente, foi selecionado, de cada sequência, o quadro que representava o instante de injeção plenamente estabelecida, caracterizado pela máxima penetração e desenvolvimento morfológico do spray.

Figura 4 – Frames da injeção.



Fonte: Os autores (2025)

3.3 Processamento computacional

As imagens estáticas selecionadas foram processadas e analisadas utilizando algoritmos customizados desenvolvidos em linguagem Python, com extensivo uso da biblioteca de visão computacional OpenCV.

3.3.1 Pré-processamento e localização do centro do bico injetor

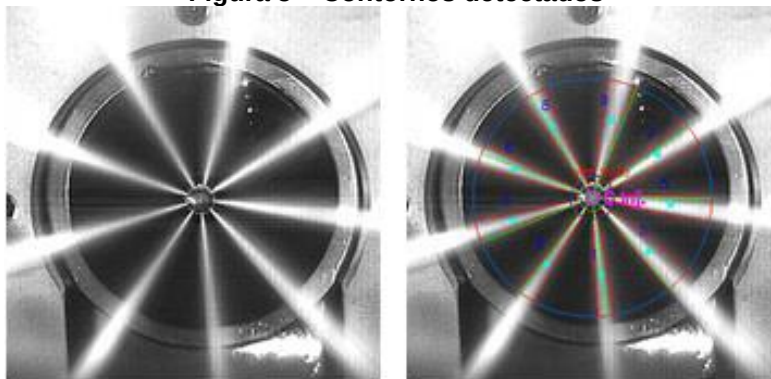
As imagens foram inicialmente convertidas para o espaço de cores monocromático (escala de cinza) e submetidas a um filtro de suavização (e.g., filtro Gaussiano) para atenuação de ruído de alta frequência, no contexto da detecção de contornos, o filtro Gaussiano emerge como uma escolha robusta para o tratamento de imagens. Ele oferece um equilíbrio ótimo entre a supressão de ruído e a preservação de bordas essenciais. Tal pré-processamento aprimora a definição das bordas, viabilizando uma detecção de contornos mais precisa e significativa. Uma etapa crucial precedente à análise dos sprays consistiu na localização precisa do centro geométrico do bico injetor na imagem. Uma Região de Interesse (ROI) foi

definida, com possibilidade de ajuste manual supervisionado, na vizinhança da posição esperada do bico. Dentro desta ROI, um algoritmo iterativo foi implementado para identificar o centro do bico, avaliando combinações de parâmetros de limiarização de intensidade de pixel, área e circularidade de contornos detectados através de operações morfológicas. O centro do bico foi determinado como o candidato que maximizava um score de confiança, estabelecido com base em critérios geométricos e de intensidade. Este ponto de referência foi fundamental para as análises subsequentes.

3.3.2 Segmentação dos Jatos de Spray e Detecção de Contornos

Os jatos individuais emanados de cada orifício do bico foram segmentados da imagem global. Esta segmentação foi primariamente baseada em limiarização de intensidade, separando as regiões do spray do fundo da imagem. Opcionalmente, uma máscara anular centrada no ponto de injeção pôde ser aplicada para refinar a segmentação, isolando a região de interesse e minimizando a interferência de artefatos ou reflexos periféricos, conforme apresentado na figura 5. Os contornos de cada jato de spray segmentado foram então precisamente detectados utilizando algoritmos de busca de contornos (e.g., algoritmo de Suzuki et al., implementado em `cv2.findContours`).

Figura 5 – Contornos detectados



Fonte: Os autores (2025)

3.3.3 Quantificação da área projetada do spray

A área projetada bidimensional de cada jato de spray foi quantificada a partir dos polígonos de contorno detectados. Esta métrica foi calculada utilizando a função `cv2.contourArea()` da biblioteca OpenCV. Esta função implementa um algoritmo robusto para o cálculo da área de um polígono arbitrário, numericamente equivalente à fórmula da área de Shoelace, por sua vez é uma consequência direta do Teorema de Green para um campo vetorial específico no plano. Se considerarmos os N vértices do contorno C como $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_{N-1}, y_{N-1})$ em coordenadas cartesianas, listados em ordem (horária ou anti-horária), a área A do polígono é dada por:

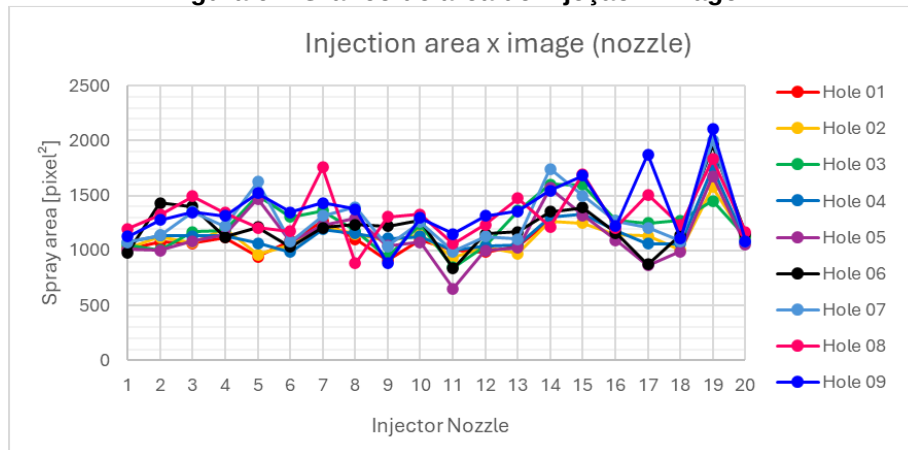
$$A = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=0}^{N-1} ((x_i y_{i+1} + 1) - (x_{i+1} y_i)) \right|$$

Onde (x_N, y_N) é tomado como (x_0, y_0) . A função `cv2.contourArea()` efetivamente computa esta soma para os pixels que definem a fronteira do contorno detectado. A unidade primária resultante deste cálculo é o pixel quadrado (px^2), refletindo a natureza discreta do domínio da imagem digital.

4. Apresentação dos Resultados

Os conjuntos de nove valores de área de spray, obtidos para cada um dos 20 bicos injetores, foram tabulados e analisados estatisticamente de forma descritiva conforme apresentado na figura 6.

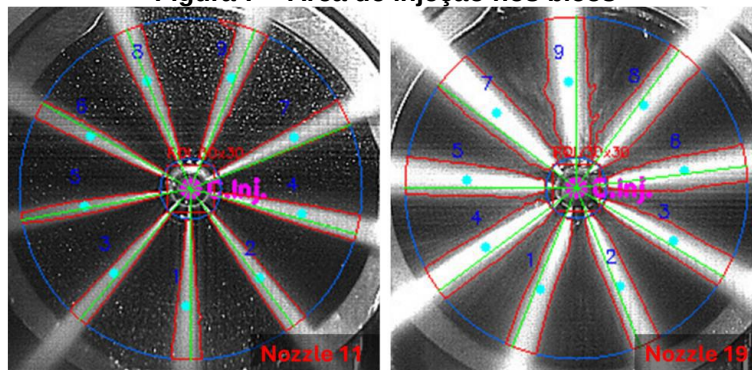
Figura 6 – Gráfico de área de injeção x imagem



Fonte: Os autores (2025)

Com base na distribuição das médias ou medianas das áreas dos sprays, foram selecionados dois bicos para uma investigação dimensional aprofundada, representando os extremos do comportamento observado, a figura 7 apresenta a imagem obtida dos extremos.

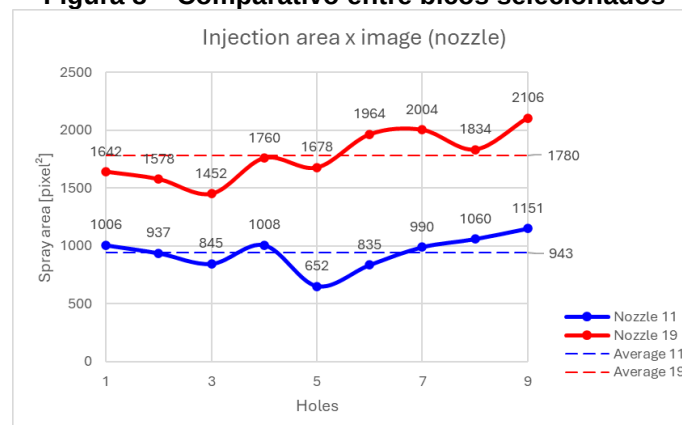
Figura 7 – Área de injeção nos bicos



Fonte: Os autores (2025)

O bico número 11 apresentou um conjunto de áreas de spray consistentemente menores, interpretado como indicativo de um regime de escoamento com características predominantemente laminares ou de menor perturbação na saída dos orifícios. O bico número 19 apresentou o conjunto de áreas de spray consistentemente maiores, interpretado como sugestivo de um regime de escoamento com maior turbulência ou maior dispersão do spray. A figura 8 apresenta um comparativo de áreas detectadas em cada um dos furos de injeção nos dois bicos selecionados como extremos.

Figura 8 – Comparativo entre bicos selecionados



Fonte: Os autores (2025)

4.1 Análise dimensional dos extremos

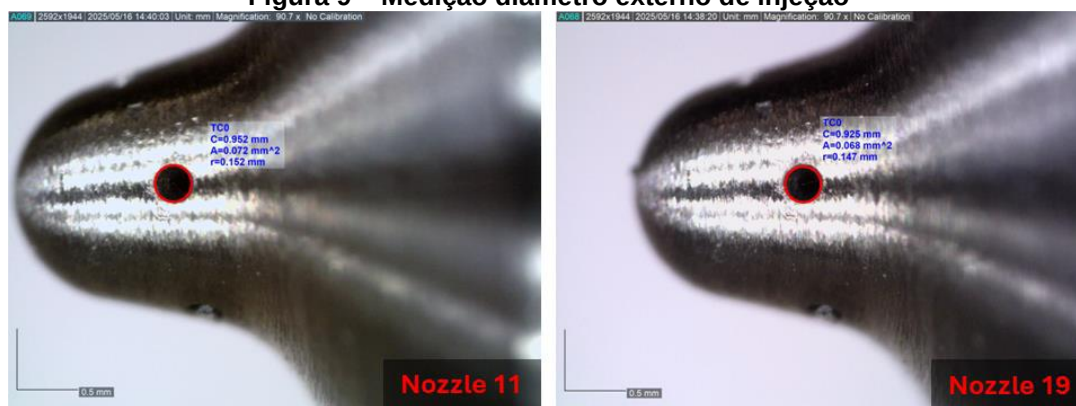
Uma das amostras que apresentou o conjunto de áreas de spray consistentemente menores, interpretado como indicativo de um regime de escoamento com características hidrodinâmicas mais estáveis e menor dispersão radial na saída dos orifícios, e a segunda, apresentou um regime de escoamento com maior instabilidade ou turbulência, resultando em maior dispersão do spray. Estes dois bicos selecionados foram então submetidos a um protocolo de caracterização geométrica detalhada de seus micros orifícios de injeção. Este protocolo compreendeu duas abordagens complementares.

4.2 Análise dimensional dos extremos

Os diâmetros de saída de cada um dos nove orifícios de injeção dos bicos selecionados foram mensurados. Estas medições foram realizadas através de uma medição ótica com um microscópio digital, modelo AM4113ZT, fabricante Dinolite, conforme figura 9.

A precisão destas medições juntamente com as medições do diâmetro de entrada foram fundamentais para a determinação de eventuais conicidades ou variações geométricas ao longo do eixo do orifício.

Figura 9 – Medição diâmetro externo de injeção



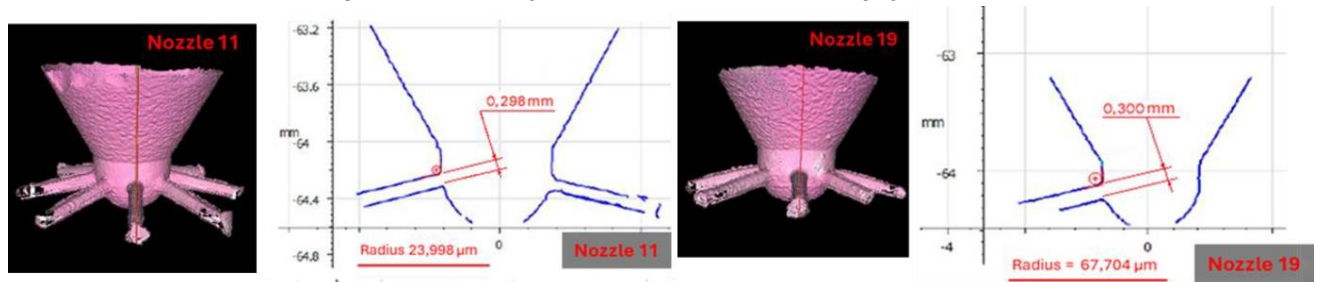
Fonte: Os autores (2025)

4.3 Medição indireta da geometria interna

Para avaliar as características internas dos orifícios, notadamente os raios de arredondamento na transição entre a sede da agulha e a entrada dos furos de injeção – geometrias complexas para medição direta não destrutiva – empregou-se uma técnica de moldagem de alta precisão. Um elastômero de polissiloxano de grau replicador, da marca RepliSet, do fabricante Struers, foi cuidadosamente injetado no interior de cada bico selecionado. Após o tempo de cura especificado para o polímero, o molde flexível, contendo uma réplica negativa da geometria interna da câmara do bico e dos micros orifícios, foi extraído com precisão.

Os moldes de elastômero assim obtidos foram então preparados para análise. As geometrias de interesse, especificamente os raios de arredondamento na entrada de cada um dos nove orifícios, foram inspecionadas e medidas indiretamente. Esta etapa foi sob um equipamento de varredura ótica de alta magnificação, equipamento Infinite Focus produzido pela Alicona, com as imagens digitais capturadas sendo analisadas pelo software e convertida em um modelo 3d de nuvem de pontos, sendo utilizada para a determinação dos raios e do diâmetro de entrada, conforme figura 10.

Figura 10 – Medição diâmetro externo de injeção



Fonte: Os autores (2025)

4.4 Análise Correlacional

Os dados dimensionais obtidos (diâmetros de entrada e saída, raios de arredondamento interno), juntamente com a espessura de parede (LSP), considerado constante para todos os bicos a fim de isolar a sua influência, foram utilizados para calcular parâmetros geométricos relevantes, como o fator K (indicador da conicidade ou difusão do orifício). A tabela 1 apresenta os valores obtidos através das medições realizadas.

Tabela 1 - Dados dimensionais dos corpos extremos

Nozzle	Diameter in [mm]	Diameter out [mm]	K-factor	Radius HE[µm]
Nozzle 19 – Average	0,3003	0,2948	0,5556	63,5578
Nozzle 19 – Standard deviation	0,0010	0,0008	0,1130	2,5772
Nozzle 11 – Average	0,2977	0,3037	-0,6000	25,7612
Nozzle 11 – Standard deviation	0,0010	0,0010	0,1414	1,3181

Fonte: Os autores (2025)

Estes parâmetros foram então correlacionados com as características morfometrias do spray (área projetada) previamente determinadas para os respectivos bicos. O objetivo desta análise correlacional foi estabelecer relações quantitativas e qualitativas entre as micro variações dimensionais, inerentes ao processo de fabricação, e o comportamento da atomização do fluido, visando identificar os parâmetros geométricos com maior influência na qualidade e eficiência da injeção, sendo observado as seguintes correlações.

Referente a Influência do Fator K (Conicidade), uma correlação direta entre o fator K e a área do spray. O bico 19, cujos orifícios apresentam predominantemente um fator K positivo (variando de 0,4 a 0,7), o que indica uma conicidade convergente, onde o diâmetro de entrada é maior que o de saída, resultou em maiores áreas de spray. Essa geometria tende a promover maior turbulência e uma maior dispersão radial, explicando as áreas de spray mais amplas e a maior atomização do fluido. Em contraste, o bico 11 exibe um fator K consistentemente negativo (variando de -0,4 a -0,8), o que caracteriza uma conicidade divergente, ou seja, com o diâmetro de entrada menor que o de saída. Essa configuração foi associada a menores áreas de spray, sugerindo um escoamento mais direcionado, com menor perturbação na saída dos orifícios e, possivelmente, características mais laminares, com menor atomização do fluido.

O raio de arredondamento na entrada dos orifícios (Radius HE) também demonstrou ser um parâmetro geométrico influente. O Bico 19 apresentou valores de Radius HE significativamente maiores (entre 60,142 µm e 67,704 µm) em comparação com o Bico 11 (entre 23,998 µm e 28,416 µm). Raios de arredondamento maiores na entrada do orifício podem facilitar a transição do fluxo e reduzir as perdas de carga, potencialmente influenciando a dinâmica do escoamento interno e contribuindo para a formação de um spray com maior dispersão e, conseqüentemente, maior área projetada, como observado no Bico 19. Por outro lado, os raios menores no Bico 11 podem levar a uma separação do fluxo mais pronunciada e a diferentes características de atomização, resultando nas menores áreas de spray observadas.

As variações nos diâmetros de entrada e saída, que conjuntamente definem o fator K, Bico 19, o diâmetro de entrada é consistentemente maior que o diâmetro de saída para todos os furos, resultando no fator K positivo. No Bico 11, a situação se inverte, com o diâmetro de entrada sendo menor que o de saída, levando ao fator K negativo. Essas diferenças dimensionais, embora micrométricas, são suficientes para alterar o regime de escoamento interno e, por conseguinte, a morfologia do spray.

5. Considerações Finais

O estudo concluiu de forma robusta que variações micrométricas nas geometrias dos orifícios de bicos injetores diesel, especialmente nos diâmetros de entrada e saída, no raio de arredondamento e na conicidade (fator K), exercem uma influência significativa sobre a área projetada do spray. A metodologia baseada em visão computacional demonstrou ser uma ferramenta eficaz para identificar e quantificar padrões de atomização associados a diferentes configurações geométricas, permitindo classificar os bicos em regimes de escoamento que tendem a ser mais laminares ou mais turbulentos. Ficou evidente que pequenas discrepâncias no processo de fabricação podem resultar em diferenças consideráveis na qualidade da pulverização, o que, por sua vez, impacta diretamente a eficiência da combustão e as emissões de poluentes. Os achados reforçam a criticidade de um controle dimensional rigoroso durante a produção de bicos injetores e destacam o potencial promissor do uso de técnicas ópticas e computacionais como ferramentas complementares e valiosas no controle de qualidade industrial. Desta forma, esta pesquisa contribui significativamente para o avanço do entendimento das relações entre a microgeometria e o desempenho funcional de bicos injetores diesel, sendo aplicável tanto no desenvolvimento de sistemas de injeção mais eficientes quanto no atendimento às exigências ambientais cada vez mais restritivas. Para expandir os conhecimentos, investigações futuras devem focar na correlação do spray com o desempenho e emissões reais em motores, considerando a contrapressão. Recomenda-se ampliar os estudos para mais geometrias de bicos e condições operacionais, incluindo diferentes combustíveis. O desenvolvimento de modelos de aprendizado de máquina para predição do spray e a análise de fenômenos como cavitação e desgaste são cruciais.

Referências

- ACHELIS, L.; BARBIERI, M.R.; FRITSCHING, U. **Spray characteristics of steam-assisted oil atomization in Y-jet nozzles**. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 181, 105028, 2024. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2024.105028.
- DESANTES, J.M.; PAYRI, R.; SALVADOR, F.J.; GIL, A. **Development and validation of a theoretical model for diesel spray penetration**. *Fuel*, v. 85, n. 7-8, p. 910-917, 2006. DOI: 10.1016/j.fuel.2005.10.023.
- DJAMARI, D.W.; IDRIS, M.; PARISTIAWAN, P.A.; ABBAS, M.M.; SAMUEL, O.D.; SOUDAGAR, M.E.M.; HERAWAN, S.G.; CHANDRAN, D.; YUSUF, A.A.; PANCHAL, H.; VEZA, I. Diesel Spray: **Development of Spray in Diesel Engine**. *Sustainability*, v. 14, n. 23, 15902, 2022. DOI: 10.3390/su142315902.
- HUZJAN, F.; JURIC, F.; LONČARIĆ, S.; VUJANOVIĆ, M. **Deep Learning-based Image Analysis Method for Estimation of Macroscopic Spray Parameters**. *Neural Computing and Applications*, v. 35, p. 9535-9548, 2023. DOI: 10.1007/s00521-022-08184-3.
- KARATHANASSIS, I.K.; HWANG, J.; KOUKOUVINIS, P.; PICKETT, L.; GAVAISES, M. **Combined visualisation of cavitation and vortical structures in a real-size optical diesel injector**. *Experiments in Fluids*, v. 62, n. 1, 7, 2021. DOI: 10.1007/s00348-020-03096-1.
- KLYUS, O.; SZCZEPANEK, M.; KIDACKI, G.; KRAUSE, P.; OLSZOWSKI, S.; CHYBOWSKI, L. **The Effect of Internal Combustion Engine Nozzle Needle Profile on Fuel Atomization Quality**. *Energies*, v. 17, n. 1, 266, 2024. DOI: 10.3390/en17010266.
- MOHAMED, M.A.E.A.; ABDEL HAMEED, H.E.S.; ELSHENAWY, E.A.; EL-SALMAWY, H.A.A.; SHALTOUT, R.E. **Numerical Simulation and Experimental Study for the Impact of In-Flow Nozzle on Spray Characteristics**. *ACS Omega*, v. 6, n. 49, p. 33498-33510, 2021. DOI: 10.1021/acsomega.1c04272.
- PRATAMA, R.H.; HUANG, W.; GAO, Y. **Investigation of diesel spray characteristics from injectors with asymmetric hole distribution**. *Fuel*, v. 385, 134068, 2025. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.134068.
- WANG, F.; HE, Z.; LIU, J.; WANG, Q. **Diesel nozzle geometries on spray characteristics with a spray model coupled with nozzle cavitating flow**. *International Journal of Automotive Technology*, v. 16, n. 4, p. 539-549, 2015.
- ZAINAB, S.; SYED, K.S. **Investigation of nozzle geometry and wall roughness effects on diesel injector flow**. *AIP Advances*, v. 13, n. 11, 115129, 2023. DOI: 10.1063/5.0172988.