

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

VINÍCIUS FERREIRA GIROTTO

ANÁLISE TÉCNICA PARA REMANUFATURA DE UM BICO INJETOR DIESEL

LONDRINA

2023

VINÍCIUS FERREIRA GIROTTO

ANÁLISE TÉCNICA PARA REMANUFATURA DE UM BICO INJETOR DIESEL

Technical analysis for remanufacturing a diesel injector nozzle

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientadora: Janaína Fracaro de Souza Gonçalves

LONDRINA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

VINÍCIUS FERREIRA GIROTTO

ANÁLISE TÉCNICA PARA REMANUFATURA DE UM BICO INJETOR DIESEL

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 06/junho/2023

Janaína Fracaro de Souza Gonçalves
Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rafael Sene de Lima
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Roger Nabeyama Michels
Doutorado em Agronomia
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LONDRINA

2023

Dedico este trabalho à minha família, por toda força e confiança depositada em mim durante todos esses anos de graduação.

AGRADECIMENTOS

Palavras não são suficientes para expressar meu agradecimento a todas as pessoas que fizeram parte desse momento, que me ajudaram e contribuíram para chegar aonde estou agora. Todo conhecimento passado, toda confiança depositada e toda ajuda recebida jamais será esquecida.

Agradeço primeiramente a Deus e a minha família, que permitiram eu traçar essa caminhada por tantos longos anos, agradeço por todo o apoio recebido e incentivo de continuar até mesmo nos momentos mais difíceis.

Agradeço imensamente pelos professores da UTFPR de Londrina, que me ajudaram a ser o profissional engenheiro do futuro. Agradeço por todos os conhecimentos passados e pela confiança depositada.

Agradeço aos amigos e todas as pessoas que se mantiveram ao meu lado mesmo em momentos de ausência.

Agradeço à Fundação Araucária por fomentar a pesquisa desenvolvida.

RESUMO

O processo de remanufatura permite reutilizar componentes que trabalharam durante uma vida útil, dessa forma é possível estender sua utilização por mais tempo, garantindo as mesmas especificações técnicas e a garantia de um componente novo. Diversos são os benefícios para esse processo, como por exemplo a redução da utilização de matéria prima, energia e emissão de gás carbônico. Muitos componentes no mercado permitem receber o processo de remanufatura, entretanto, alguns componentes críticos ainda precisam ser estudados para avaliar os níveis de desgaste que o componente sofreu durante sua vida útil. O presente trabalho possui o intuito de estudar o nível de desgaste de um dos componentes críticos do sistema de injeção diesel que já tenha sido utilizado em campo, o bico injetor. Conduziu-se análises técnicas a fim de avaliar se existe possibilidade para remanufatura ou reparo nesse componente. Resultados obtidos mostraram um alto nível de desgaste em certas regiões do bico injetor, porém, observou-se que existe condições para a realização de processos de reparo e realização da remanufatura em tal componente.

Palavras-chave: sistemas de injeção; reparo; desgaste; economia circular.

ABSTRACT

The remanufacturing process makes it possible to reuse components that have worked during a life cycle, in this way it possible to extend their use for a longer period of time, guaranteeing the same technical specifications and the guarantee of a new component. There are several benefits to this process, such as reducing the use of raw materials, energy and carbon dioxide emissions. Many components on the market allow a remanufacturing process, however, some critical components still need to be studied to assess the levels of wear that the component has suffered during its life cycle. The presente work aims to study the level of wear of one of the critical components of the diesel injection system that is already being used in the field, the injector nozzle. Technical analyzes were conducted in order to assess the possibility of remanufacturing or repairing this component. The results obtained showed a high level of wear in certain regions of the injector nozzle, however, it was observed that there are conditions for carrying out a repair and remanufacturing process of such component

Keywords: injection system; repair; wear; circular economy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tipos de sistemas de injeção.....	14
Figura 2 - Sistema UPS genérico	15
Figura 3 - Injetor diesel mecânico.....	17
Figura 4 - Bico injetor diesel	19
Figura 5 - Evolução no desempenho de motores diesel.....	24
Figura 6 - Estratégias da economia circular	28
Figura 7 - Processo de formação do <i>spray</i>	30
Figura 8 - Formação de cavitação em uma linha de corrente	31
Figura 9 - Formas de colapso de uma bolha de vapor.....	32
Figura 10 - Efeito da temperatura na fração de vapor.....	34
Figura 11 - Perfil de temperatura no furo de injeção.....	35
Figura 12 - Perfil de pressão no furo de injeção.....	36
Figura 13 - Perfil de velocidade no furo de injeção.....	37
Figura 14 - Distribuição da fração de vapor no furo de injeção	38
Figura 15 - Regiões de análise para o bico e a agulha	40
Figura 16 - Fluxograma dos procedimentos realizados	41
Figura 17 – Modo de fixação para desmontagem do injetor	42
Figura 18 - Representação do equipamento boroscópio e lupa de aumento	44
Figura 19 - Formas analisadas para a agulha e o corpo do bico injetor	45
Figura 20 - Equipamento especializado em medição de formas.....	46
Figura 21 - Equipamento especializado para medição de planeza	47
Figura 22 - Equipamento especializado para medição de rugosidade	47
Figura 23 - Corte transversal no corpo do bico.....	48
Figura 24 - Microscópio Eletrônico de Varredura.....	49
Figura 25 - Equipamento especializado para medição de dureza.....	50
Figura 26 - Corpo de prova para medição do gradiente de dureza.....	51
Figura 27 - Ponto de medição da dureza superficial	51
Figura 28 - Resultado da linha de limpeza	53
Figura 29 - Exame visual do assento da agulha no corpo do bico.	54
Figura 30 - Pontos de medição de formas da agulha.....	56
Figura 31 - Pontos de medição de formas do corpo do bico	57
Figura 32 - Resultado de medição da planeza da superfície de vedação	60
Figura 33 - Imagens obtidas pelo MEV	62
Figura 34 - Perfil de rugosidade da região do assento do corpo do bico	64
Figura 35 - Regiões de avaliação da profundidade da camada de dureza	66
Figura 36 - Pontos de medição para avaliar a camada de dureza.....	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Medições de formas na agulha.....	58
Gráfico 2 - Medições de formas no corpo do bico	59
Gráfico 3 - Resultados de rugosidade	65
Gráfico 4 - Profundidade da camada de dureza	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo de exposição na linha de limpeza.....	43
Tabela 2 - Resultado sala de formas	58
Tabela 3 - Medição da planeza da superfície de vedação.....	61
Tabela 4 - Resultados da medição de rugosidade	64
Tabela 5 - Resultados das medições para avaliar a camada de dureza	68
Tabela 6 - Resultado da dureza superficial e dureza do núcleo.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASG	Ambiental, Social, Governança
CRS	Common Rail System
ECU	Engine control unit
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MLC	Ciclo de vida múltiplo
UIS	Unit Injector System
UPS	Unit Pump System
WLC	Ciclo de vida residual

LISTA DE SÍMBOLOS

K	Kelvin
Mpa	Mega Pascal
mm	Milímetros
R _z	Rugosidade z
m/s	Metros por segundo
3D	Tridimensional
R _{max}	Rugosidade máxima

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Diferenças entre sistemas de injeção diesel	13
1.2	Funcionamento de um injetor em sistemas UPS.....	16
1.2.1	Regiões de um bico injetor	19
1.3	Justificativa.....	20
2	OBJETIVOS	23
2.1	Objetivos específicos.....	23
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1	Remanufatura	25
3.1.1	Economia Circular	27
3.2	Diferenças entre as estratégias da economia circular	28
3.3	Mecanismos de desgaste de um bico injetor.....	29
4	MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1	Regiões de desgaste analisadas no bico injetor	39
4.2	Fluxograma dos processos realizados	40
4.3	Desmontagem.....	41
4.4	Limpeza	42
4.5	Exame visual.....	44
4.6	Análise de formas.....	44
4.7	Análise de rugosidade	47
4.8	Análise MEV	49
4.9	Análise de dureza	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5.1	Resultados do exame visual	53
5.2	Resultados da análise de formas	55
5.2.1	Resultados do exame de planeza	60
5.3	Resultados da análise no MEV.....	61
5.4	Resultados da análise de rugosidade	63
5.5	Resultados da análise de dureza	65
6	CONCLUSÃO	71
	REFERÊNCIAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

O intuito do trabalho está direcionado ao estudo da reutilização de um componente específico e essencial em motores de combustão interna movidos a diesel, o bico injetor do sistema de injeção de combustível, o qual é geralmente descartado durante a manutenção do injetor e trocado por um componente novo. O objetivo aqui é estudar a viabilidade técnica de remanufatura e entender os mecanismos de desgaste do componente escolhido como estudo de caso, de modo a reaproveitar ao invés de substituir por um produto novo.

Fornecido pela empresa parceira deste trabalho, o bico injetor que servirá de objeto de estudo pertence a aplicação ferroviária utilizado em locomotivas a diesel que circulam pelo Brasil, portanto, os próximos parágrafos contemplarão uma introdução referente a motores diesel e funcionamento do sistema de injeção, seguido de uma apresentação dos principais componentes que compõe um injetor de uma locomotiva. Ao fim deste capítulo, será apresentado as justificativas que movem o estudo e no capítulo seguinte estarão os objetivos que serão buscados para a conclusão do trabalho.

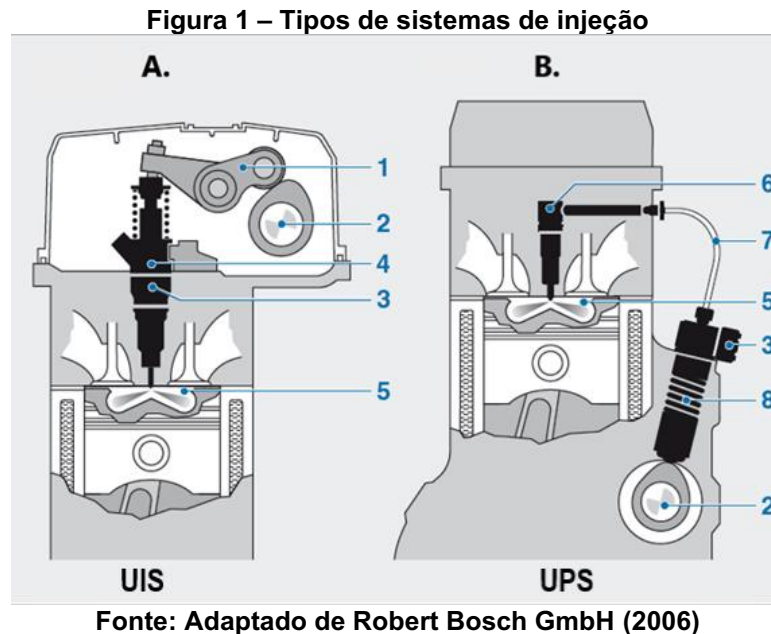
Apesar do objeto de estudo representar um único componente do sistema de injeção, entende-se a necessidade de apresentar previamente os tipos de sistemas e os princípios de funcionamento, a fim de introduzir conceitos e aprofundar no conhecimento técnico relacionado a área do estudo aqui desenvolvido.

Em motores diesel de aplicação geral (rodoviários, marítimos, ferroviários ou agrícolas), existem sistemas projetados especificamente para a injeção de combustível na câmara de combustão. Tais sistemas de injeção possuem diversas variações a depender de qual aplicação o motor está inserido, entretanto, é possível dividi-los em duas categorias gerais, sendo elas como *unit pump system* (UPS) e *unit injector system* (UIS).

1.1 Diferenças entre sistemas de injeção diesel

A Figura 1 apresenta ambos os sistemas UIS e UPS, o primeiro representado pela letra A à esquerda e o segundo pela letra B à direita. Em sistemas UIS, tanto a bomba quanto o injetor estão acoplados em um único produto, o *unit injector*, diferentemente do sistema UPS onde a bomba e o injetor são produtos separados e interligados por uma curta tubulação de alta pressão. Por conta disso, cada sistema

possui particularidades que os tornam indicados para aplicações específicas, como por exemplo, UPS são mais utilizados em motores de larga escala e UIS para motores menores de veículos comerciais.



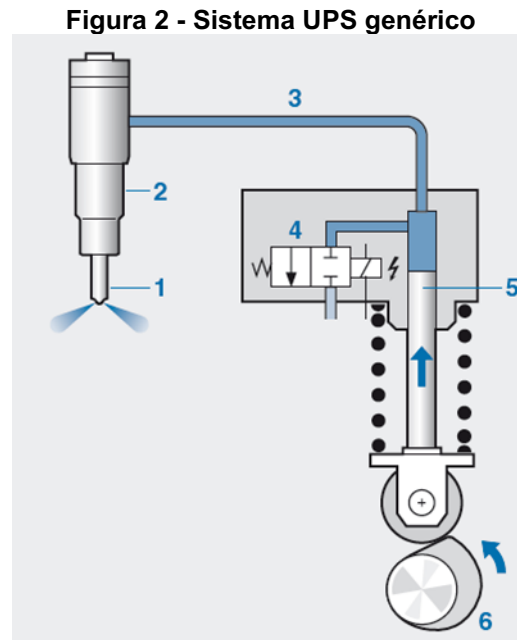
Na Figura 1, os componentes indicados pelos números representam respectivamente o balancim (1), eixo de comando (2), válvula solenoide de alta pressão (3), *unit injector* (4), câmara de combustão do motor (5), conjunto do injetor (6), linha de alta pressão (7) e bomba de alta pressão (8).

Observa-se pela Figura 1 que o sistema UIS é mais compacto, o que implica em alguns benefícios quando comparado ao sistema UPS. Por conta de não existir uma linha de alta pressão interligando a bomba ao injetor em sistemas UIS, a pressão atingida por esses sistemas se apresenta maior do que em sistemas UPS, com isso é possível reproduzir padrões de injeção mais controláveis e precisos.

Diferentemente, os componentes do sistema UPS são montados separadamente, o que fornece vantagens em termos de espaço na região do cabeçote do motor (o injetor é menor e o eixo de comando pode ser posicionado em outra região do motor) além do beneficiamento da manutenção em termos de custo e tempo (é possível a retirada da bomba para manutenção sem desmontar qualquer região do motor).

Apesar das diferenças entre os sistemas de injeção, o princípio de funcionamento é o mesmo. A Figura 2 apresenta o funcionamento de um sistema UPS

genérico e os componentes indicados são o bico injetor (1), o conjunto do injetor (2), a linha de alta pressão (3), a válvula solenoide (4), o pistão da bomba (5) e o eixo de comando (6).



Fonte: Robert Bosch GmbH (2006)

Durante o funcionamento do motor, o eixo de comando (6) se encontra engrenado ao eixo do virabrequim, o qual é impulsionado pelo movimento do pistão do motor no momento da combustão, com isso, a sincronização entre esses dois componentes permite que a bomba trabalhe exatamente no momento necessário para fornecer a injeção de combustível.

Durante esse momento, a unidade de controle do veículo (ECU) envia um sinal elétrico para a válvula solenoide (4), a qual se fecha e restringe o canal de retorno de combustível da bomba, com isso, juntamente com o movimento do pistão da bomba (5) promovido pelo eixo de comando, a pressão de combustível na linha de alta pressão sofre um aumento suficiente para realizar a injeção dentro da câmara de combustão do motor.

O princípio de funcionamento dos sistemas UIS acontece da mesma forma, a única diferença se encontra na montagem dos componentes, nestes sistemas os componentes são arranjados de forma mais compacta, não sendo necessário a utilização de uma linha de alta pressão como em sistemas UPS, dessa forma, a bomba e o injetor compõem um único produto.

Existe ainda uma terceira configuração de sistemas de injeção chamada de *Common Rail System* (CRS) que se assemelha aos sistemas UIS, ou seja, possui um injetor montado com uma válvula solenoide que controla o tempo e a quantidade certa de injeção, a diferença se encontra na disposição da bomba de alta pressão. Em sistemas CRS, não existe uma bomba acoplada ao injetor como em sistemas UIS, mas uma linha de alta pressão comum para todos os injetores alimentada por uma única bomba de alta pressão, garantindo assim a mesma pressão de combustível para todos os cilindros do motor.

O objeto de estudo do trabalho refere-se a bicos de injetores de sistemas UPS para aplicações em locomotivas (*large engines*), onde o princípio de funcionamento se assemelha a aplicações UPS normais, porém com dimensões maiores por conta da diferença em alguns parâmetros funcionais, como por exemplo a quantidade de combustível injetada no motor durante o funcionamento que se apresenta muito maior quando comparado com aplicações menores.

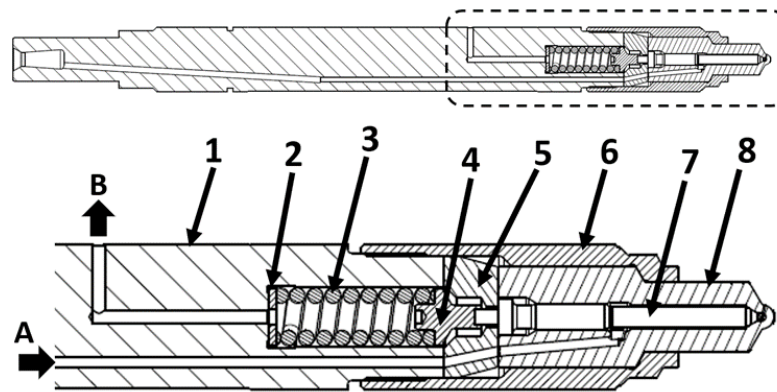
1.2 Funcionamento de um injetor em sistemas UPS

A Figura 3 representa um corte longitudinal realizado em um injetor de um sistema UPS com a ampliação da região tracejada para melhor visualização e identificação de cada componente. Basicamente, o injetor de estudo é composto por 8 componentes principais indicados pelos números na imagem abaixo.

Respectivamente dos números de 1 a 8 estão o corpo do injetor (1), a arruela de compensação (2), a mola de compressão (3), o eixo de pressão (4), o disco intermediário (5), a porca do bico (6), a agulha do bico (7) e por último o corpo do bico (8). As letras A e B representam a entrada de combustível e a saída de retorno, respectivamente.

Por convenção geral, o bico refere-se ao conjunto corpo do bico e agulha, logo utiliza-se a nomenclatura “corpo do bico” para representar apenas o bico sem a agulha. De forma análoga, utiliza-se a nomenclatura “injetor” para representar o conjunto com todos os 8 componentes montados.

Figura 3 - Injetor diesel mecânico



Fonte: A autoria própria (2023)

Durante o funcionamento do veículo, a unidade de bombeamento de alta pressão envia o combustível ao injetor através da linha de alta pressão no momento correto acionado pela ECU (*engine control unit*), unidade de comando que controla os tempos de injeção. O combustível com a pressão elevada de trabalho adentra ao injetor e se desloca até a região do bico pelo canal de entrada indicado com a letra “A” na Figura 3.

O disco intermediário (5) faz a ligação entre o canal do corpo do injetor (1) e o canal do corpo do bico (8), sendo a vedação nessas duas faces de contato um fator extremamente importante. Para isso, a porca do bico quando apertada, pressiona o corpo do bico contra o corpo do injetor exercendo uma força de compressão no disco intermediário. Essa característica de montagem garante que não haja vazamentos durante o fluxo de combustível a alta pressão.

Uma outra função importante do disco intermediário é a limitação do movimento da agulha, onde tal movimento é chamado tecnicamente de curso da agulha e acontece assim que o combustível em alta pressão adentra no corpo do bico e entra em contato com a agulha. Neste momento, a pressão exercida pelo combustível gera resultantes de forças que provocam o levantamento da agulha e conseqüentemente a abertura do bico, momento no qual acontece a injeção de combustível para dentro da câmara de combustão do motor.

O curso da agulha (distância que a agulha se move durante a injeção de combustível) é um parâmetro importante pois delimita a quantidade de combustível que é injetado em um determinado espaço de tempo. Sendo assim, o valor de curso é especificado para cada modelo de bico e precisa ser garantido durante a fabricação através de testes de medição e testes funcionais antes da liberação para montagem em um injetor.

Para que a agulha volte a sua posição inicial de fechamento após o período de injeção de combustível, uma mola de compressão tensionada exerce uma força no eixo de pressão que está diretamente acoplado à espiga da agulha (região da agulha inserida dentro do disco intermediário e oposta à sua ponta), que resulta em seu fechamento assim que a pressão de combustível é aliviada.

A abertura da agulha acontece porque a resultante de forças causada pela distribuição de pressão do combustível será sempre maior que a força exercida pela mola, porém, assim que a pressão é aliviada, a força da mola se torna maior e implica no fechamento da agulha. Tal fechamento é necessário pois na região de contato entre a ponta da agulha e o corpo do bico ocorre uma vedação que impede o gotejamento quando a injeção de combustível não deve ocorrer.

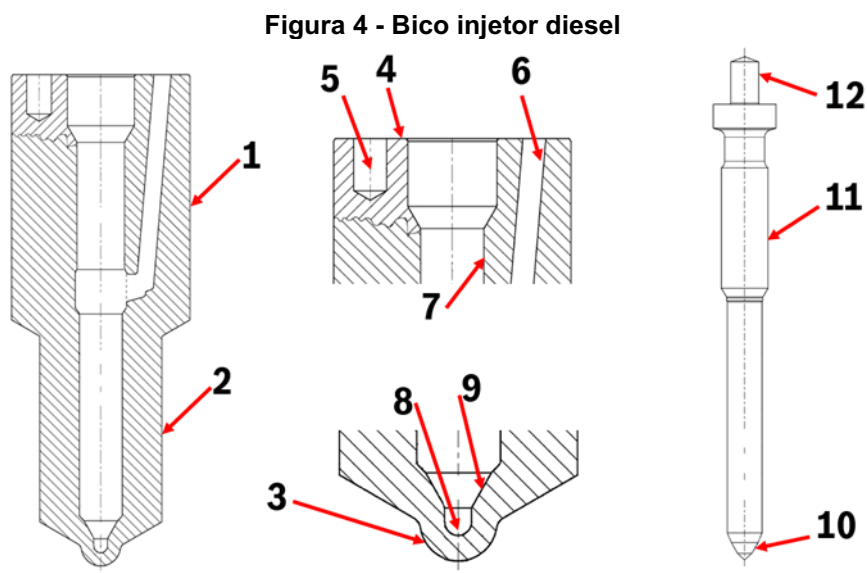
Um outro componente importante para o funcionamento correto do injetor é a arruela de compensação (2), a qual implica em um parâmetro funcional chamado de pressão de abertura. Como o próprio nome já diz, tal parâmetro corresponde a pressão mínima do combustível suficiente para causar o levantamento da agulha e conseqüentemente a abertura do injetor. Esse parâmetro também é especificado para cada modelo de injetor e precisa ser garantido durante a montagem antes de ser liberado.

A arruela de compensação (2) funciona como uma forma de regulagem da pressão de abertura dos injetores, que é realizada durante o processo de montagem dos componentes. Existem diversas classes diferentes de arruelas de compensação que podem ser utilizadas, cada classe é representada por uma espessura diferente que implica no valor da pressão de abertura do injetor, ou seja, quanto maior for a espessura utilizada dessa arruela, maior se torna a tensão causada pela mola de compressão, e conseqüentemente, maior se torna o valor de pressão de abertura.

Posicionado concentricamente ao furo da arruela de compensação existe a linha de retorno de combustível do corpo do injetor. Todo o excedente de combustível que não é injetado para dentro da câmara de combustão do motor é retornado ao tanque de combustível pela linha de baixa pressão. Esse combustível é escoado do bico para a linha de retorno através da folga existente entre a agulha e o corpo do bico, fator este necessário para evitar uma falha mecânica causada por elevação incontrolável da pressão do combustível durante a injeção caso não houvesse a linha de retorno.

1.2.1 Regiões de um bico injetor

Além dos componentes que compõem um injetor a diesel, é importante também o conhecimento das principais regiões de um bico injetor as quais estão indicadas pela Figura 4. Algumas dessas regiões serão bastante discutidas posteriormente por conta da sua criticidade no funcionamento do componente. De acordo com a figura, as regiões indicadas serão denominadas de base (1), haste (2), cúpula (3), superfície de vedação (4), furo de fixação (5), furo de combustível (6), guia do corpo (7), furo cego (8), assento da agulha (9), ponta da agulha (10), guia da agulha (11) e espiga da agulha (12).



Fonte: Autoria própria (2023)

Uma outra região importante que não está apresentada pela Figura 4 é o furo de injeção de combustível. Este é o caminho que direciona o combustível a alta pressão para dentro da câmara de combustão do cilindro do motor, e suas características são importantes pois influenciam o formato do *spray* e a qualidade da combustão, visto que a dispersão do combustível injetado é necessária para uma explosão homogênea e completa. Os furos de injeção se iniciam na região do furo cego e terminam na região da cúpula do bico, simetricamente posicionados ao logo de toda circularidade da cúpula, além disso, a quantidade de furos variam conforme o projeto e aplicação.

Com os principais conceitos e denominações propriamente introduzidos acima, os próximos parágrafos apresentarão as principais justificativas que movem o

estudo. No capítulo seguinte será apresentado os objetivos gerais e específicos que foram buscados ao longo da pesquisa. No terceiro capítulo será discutido diversos artigos que contemplam a problemática do tema, com foco nos mecanismos de desgaste de um bico injetor. Durante o quarto capítulo será apresentado toda a sistemática utilizada ao decorrer da pesquisa, assim como os materiais e métodos escolhidos para a condução do trabalho. Todos os resultados obtidos serão apresentados e discutidos no quinto capítulo, e a conclusão do trabalho estará devidamente expressa no sexto capítulo. Por último estarão as referências dos artigos utilizados para embasamento do referencial teórico.

1.3 Justificativa

A principal justificativa que move o trabalho se encontra no apelo sustentável do projeto, visto que a proposta existe para reutilizar componentes de motores a combustão interna que são descartados. Com isso, existe um aproveitamento maior do produto usado e uma diminuição no uso de matéria prima para fabricação de novos componentes, visto que, a demanda de reposição pode ser suprida, em partes, por componentes remanufaturados.

Além da diminuição do consumo de produtos primários como matéria prima, a prática de reutilização de componentes também causa grandes diminuições no consumo de energia e emissões de carbono quando comparado com a fabricação de um componente novo. O principal motivo se dá por conta do processo de remanufatura ser muito menor que o processo de fabricação, logo, o gasto energético é reduzido e toda a emissão de carbono para extração e transporte da matéria prima é minimizada.

Sendo assim, é possível colocar em prática o modo de economia circular do produto, onde este retorna ao mercado e poderá ser reutilizado por um determinado número de vezes e por um período maior, oposto ao modo de economia linear do produto, que após a sua produção e tempo de utilização determinado, ocorre o descarte e substituição por componentes novos. Segundo um estudo realizado pela Circle Economy, mais de 91% do que extraímos do planeta é desperdiçado por conta da economia linear vigente.

Além disso, conceitos com premissas de influenciar empresas a terem atitudes mais sustentáveis estão crescendo no mercado e sendo usados como forma de aumentar a competitividade, visto que consumidores estão cada vez mais

exigentes em práticas ambientais saudáveis que pressionam as empresas a tomarem o mesmo caminho.

O conceito ASG (Ambiental, Social e Governança) é um exemplo que existe inserido no mercado, onde representa um conjunto de boas práticas para organizações que procuram comprovar sua solidez e crescimento sustentável não apenas no ponto de vista ambiental, mas também representa sustentabilidade no âmbito social e governamental da empresa, explica Omega Energia (2022).

Um outro conceito sustentável que está sendo amplamente adotado pelas empresas é o carbono neutro e o crédito de carbono. Atualmente, toda atividade realizada que consome energia emite dióxido de carbono na atmosfera de forma direta ou indiretamente, causando grandes preocupações com o aumento do aquecimento global. Por conta disso, empresas estão se mobilizando para minimizar seus efeitos no planeta atingindo a neutralidade de carbono (Robert Bosch Ltda, 2023).

Para isso, práticas adotadas visam reduzir as emissões de carbono onde for possível, e balancear o que não pode ser reduzido por meios de compensação, a qual pode ser feita de diversas formas como por exemplo, compra de créditos de carbono, recuperação de florestas em áreas degradadas, utilização de energias renováveis, descarte correto de resíduos e reciclagem, desenvolvimento de produtos e processos mais eficientes no uso de produtos naturais, entre outros.

Sendo assim, a reutilização de componentes se torna um grande potencial para indústrias que visam se consolidar no mercado sustentável e um grande aliado para o planeta visando a preservação do meio ambiente e preocupação com as gerações futuras.

Além do apelo sustentável que está aliado à manutenção do meio ambiente, existem também um apelo econômico muito forte para as indústrias de produtos remanufaturados, visto que o custo de produção de um produto novo é potencialmente maior do que o reparo e reutilização de um produto retornado de campo, principalmente por conta dos custos de matéria prima e dos processos iniciais de manufatura, que uma vez realizados, não são contabilizados nos custos de remanufatura.

Arelado a isso, a política atual vigente, segundo informações da empresa parceira, impõe que um produto remanufaturado deve atender em pelo menos 50% da vida útil de um produto novo enquanto o preço é comercializado em aproximadamente 70% quando comparado ao de um produto novo. Com isso, quando

realizado de forma correta e com qualidade e garantia, uma empresa que comercializa produtos remanufaturados pode obter grandes lucros com poucos investimentos.

Por conta disso, o trabalho tem como intuito promover a reutilização de um novo componente no mercado de reposição de peças de motores a combustão interna, e para isso, será estudado o estado atual do componente utilizado em campo e a análise dos resultados indicarão o quão distante as especificações técnicas um componente utilizado está de um componente novo, e se existe margem para realização de um processo de reparo.

2 OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivo geral a análise em termos de desgaste e parâmetros técnicos dimensionais de um bico injetor diesel ao fim de sua vida útil para análise de possível viabilidade para remanufatura.

2.1 Objetivos específicos

Para a avaliação do estado atual de um bico injetor retornado de campo, as seguintes análises específicas serão avaliadas:

- Análise do potencial de limpeza na linha de produção da empresa.
- Análise de formas como linearidade, circularidade, concentricidade, planeza e suas tolerâncias em regiões de contato consideradas como críticas tanto para a agulha quanto para o corpo do bico;
 - Análise da dureza superficial e da profundidade da camada de dureza em regiões de contato como assento da agulha e superfície de vedação;
 - Análise com Microscópica Eletrônica de Varredura (MEV) da integridade da superfície na região do assento da agulha;
 - Análise da rugosidade e profundidade dos defeitos na região do assento e guia da agulha;
- Comparação com as especificações técnicas de um produto novo;
- Análise dos resultados e tomada de decisão a respeito dos próximos passos;
- Apresentar as diferenças entre as estratégias da economia circular.

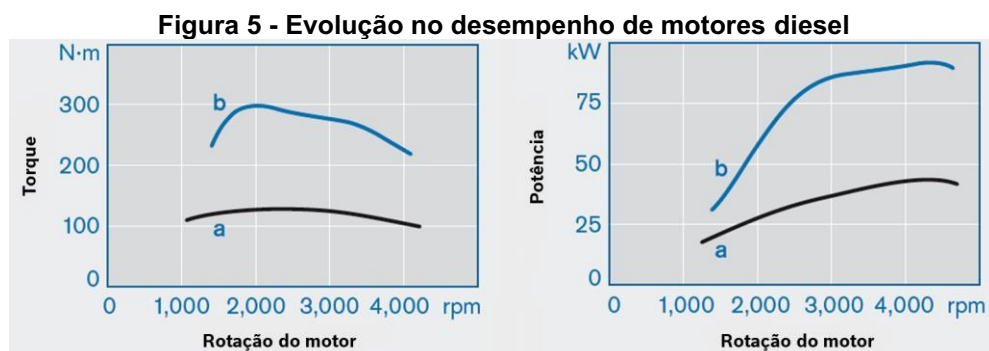
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Motores diesel são popularmente conhecidos por sua melhor eficiência quando comparados com outros tipos de motores a combustão interna, isso significa que esses motores aproveitam melhor a energia disponível do combustível que torna sua aplicação mais interessante em diferentes cenários.

Segundo Liu et al (2018), atualmente, os motores de ignição por centelha (que utilizam gasolina ou etanol) podem chegar a uma eficiência de 30% a 36% enquanto motores de ignição por compressão (que utilizam diesel) podem atingir de 40% a 47% de eficiência.

Segundo Suppes e Storvick (2016), a principal razão pela qual os motores a diesel são mais eficientes que motores a gasolina acontece por conta das maiores pressões dentro da câmara de combustão, o que implica em maiores temperaturas de funcionamento e conseqüentemente em um aproveitamento maior da energia térmica disponível no combustível. Segundo eles, a eficiência térmica de um motor é computada pela razão entre o trabalho entregue pelo motor e a energia disponível no combustível.

Observa-se também um aumento no desempenho desses motores desde sua criação por Rudolf Diesel em 1893, conseqüência de diversos estudos e avanços em tecnologias na fabricação de novos componentes. Para exemplificar este fato, a Figura 5 compara as curvas de torque e de potência extraídas de um motor a diesel de 2200 cilindradas com ano de fabricação distintos. A curva “a” indica um motor com ano de manufatura de 1968 enquanto a curva “b” representa um ano de manufatura de 1998. A discrepância entre os resultados é decorrente da pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias voltados a esta aplicação, entre elas se encontram os avanços nos sistemas de injeção de combustível.



Fonte: Traduzido de Robert Bosch GmbH (2006)

Além disso, durante os processos de manufatura de um componente novo, diversas tecnologias são utilizadas para agregação de valor nas peças, o que demandam energia, matéria prima e geram desperdícios como emissão de gases de efeito estufa, explica Sutherland et al. (2008).

O autor complementa ainda que dentro do setor industrial, a manufatura contribui com uma porção significativa na emissão de gases de efeito estufa global, pois, além de emitir diretamente os gases em seus processos internos, consome recursos e energias indiretamente em processos que sustentam suas operações. Um exemplo é a emissão indireta de gases de efeito estufa através do consumo de eletricidade.

Segundo Peng et al. (2022), os métodos de manufatura moderna permitem um aumento no padrão de vida ao redor do mundo, entretanto, resulta simultaneamente em um aumento nos descartes gerados. Como alternativa para gerenciamento dos descartes e redução dos impactos ambientais, existem opções como recondicionamento, reutilização direta, reparo, reciclagem e remanufatura.

A partir dos parágrafos a seguir, será discutido as principais características dos processos de remanufatura, assim como suas vantagens e diferenças entre os processos de recondicionamento e reparo.

3.1 Remanufatura

Segundo Zhuang et al. (2023), o processo de remanufatura é capaz de restaurar um produto usado para a mesma performance e com a mesma garantia de um produto novo equivalente, maximizando dessa forma o tempo de utilização do produto. Este processo vem sendo adotado mundialmente para componentes de automóveis, produtos mecânicos e produtos elétricos e eletrônicos que atingem o fim do ciclo de vida, como informa o autor.

Díaz et al. (2023) argumenta que para enfrentar as pressões econômicas e ambientais atualmente presentes, os modelos de negócios tradicionais como manufatura e produção de produtos de uso único devem evoluir para modelos mais sustentáveis. O autor acrescenta que a remanufatura vem se provando como uma solução lucrativa para empresas que buscam estratégias voltadas ao fim do ciclo de vida de produtos.

Segundo Peng et al. (2022), devido ao alto valor agregado nos componentes, produtos mecânicos remanufaturados dominam a indústria de remanufatura,

representando um total de 67% no mercado europeu para componentes automotivos e aeronáuticos.

Segundo Parker et al. (2015), no Brasil, a remanufatura também se encontra bastante presente, tendo como foco os setores aeroespaciais, componente de motores automotivos, equipamentos pesados e de aplicações *off-road*. Além disso, diversas empresas multinacionais atuam no mercado de remanufatura brasileiro, como é o caso da Caterpillar, Cummins, Komatsu e Odebrecht, explica o autor. Essas empresas oferecem principalmente soluções de motores diesel remanufaturados e serviços em equipamentos para motores automotivos e maquinário industrial.

Sendo assim, pode-se definir a remanufatura como um processo que busca estender a vida de produtos trazendo uma segunda vida à produtos usados, mantendo suas performances originais e com as mesmas garantias de um produto novo, explica Díaz et al. (2023). Para isso, uma série de operações são aplicadas em componentes que atingiram o fim de seu ciclo de vida, como por exemplo processos de desmontagem, limpeza, inspeção, armazenamento, reprocessamento, montagem e testes.

Zhuang et al. (2023) comenta que de acordo com dados empíricos da remanufatura de motores automotivos, produtos remanufaturados podem economizar até 60% de energia elétrica, 70% de materiais metálicos e 80% de emissão de poluentes quando comparado com a manufatura de novos produtos. Isso acontece principalmente pelo fato de que a carga ambiental utilizada para a fabricação do componente novo é compartilhada após seu estado remanufaturado, dessa forma a remanufatura demanda menos energia e matéria prima pois agrega valor aos recursos utilizados durante a manufatura.

Além disso, Zhuang et al. (2023) conduziu um estudo de caso para remanufatura de vela de ignição por centelha, onde o autor avalia os benefícios em termos de redução de energia e emissões de gases do efeito estufa no processo de remanufatura quando comparado à manufatura de um produto novo.

O autor explica que existem duas perspectivas que devem ser diferenciadas para essa avaliação, entre elas estão o cenário do ciclo de vida múltiplo (*multi-life cycle*, abreviado como MLC), que leva em consideração a carga ambiental utilizada tanto na manufatura como na remanufatura, e existe o cenário de ciclo de vida residual (*waste life cycle*, abreviado como WLC), que considera apenas a carga ambiental do processo de remanufatura, desconsiderando os recursos utilizado durante a

manufatura. O autor apresenta que ambas as perspectivas mostram uma redução no consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa, porém o ponto de vista MLC possui um resultado mais razoável pois contabiliza os recursos utilizados na manufatura inicial do componente.

Resultados apresentam que do ponto de vista MLC, a remanufatura de uma vela de ignição por centelha pode reduzir até 18,5% no consumo de energia e 18% na emissão de gases de efeito estufa quando comparado com a manufatura do produto novo. Do ponto de vista de WLC, desconsidera-se os recursos utilizados durante a manufatura inicial, a redução no consumo de energia se encontra em 49,5% e 43,8% na emissão de gases de efeito estufa.

3.1.1 Economia Circular

A fundação Ellen MacArthur define economia circular como uma economia que se apresenta restauradora e regenerativa por design, que visa manter os produtos, componentes e materiais em sua mais alta utilidade e valor durante todos os momentos do ciclo de vida.

Segundo Parker et al. (2015), economia circular é uma alternativa a economia linear tradicional, que visa extrair recursos para fabricar produtos que são descartados após o uso. Sua abordagem é manter os recursos em uso pelo maior tempo possível, extraindo seu máximo de valor durante o uso, recuperando-os e regenerando-os no final de cada ciclo de vida.

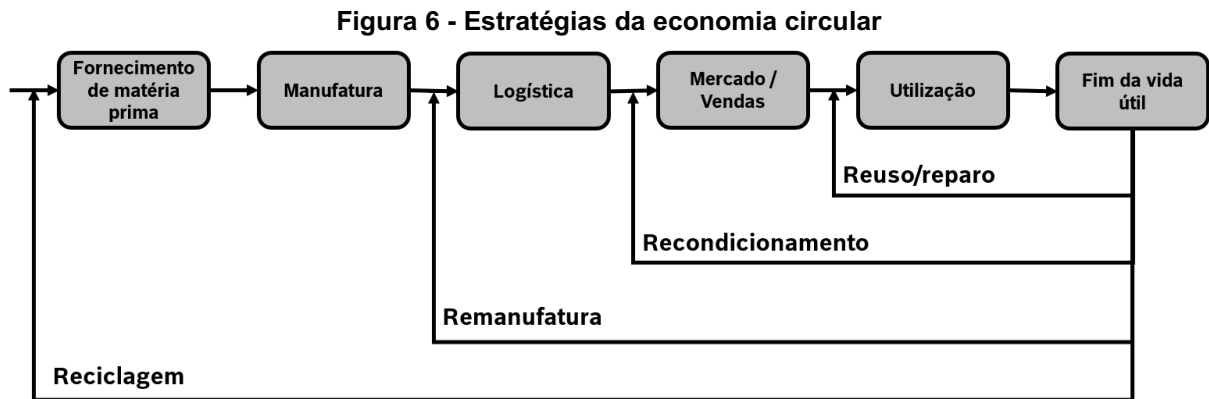
Segundo o autor, a remanufatura se encaixa bem dentro da economia circular pois normalmente se aplica a produtos manufaturados complexos que possuem recursos significativos de material, energia e mão-de-obra embutidos. Dessa forma, a remanufatura representa um ciclo da economia circular, pois os produtos retornam ao ambiente de fabricação para recuperar parte do valor agregado por meio de técnicas adequadas de remanufatura.

Além disso, a remanufatura tem a capacidade de manter os materiais avançados como matérias-primas críticas que possuem alto valor econômico e risco de abastecimento dentro da economia, estendendo a sua circulação. (Parker et al. 2015).

Entretanto, é importante distinguir entre as diferentes estratégias dentro da economia circular, como remanufatura, recondição, reparo e reciclagem, que serão apresentadas nos próximos parágrafos.

3.2 Diferenças entre as estratégias da economia circular

A Figura 6, adaptada de Peng et al. (2022), apresenta onde cada estratégia da economia circular se insere dentro do ciclo de vida de um produto.



Fonte: Adaptado de Peng et al. (2022)

Segundo Díaz et al. (2023), os processos de reparo e recondicionamento se diferem dos processos de remanufatura em termos de qualidade do produto e garantias.

O autor explica que a remanufatura busca estender a vida de produtos mantendo a mesma performance e garantias de um produto novo original, por outro lado, recondicionamento busca retornar o produto para padrões aceitáveis de funcionamento com menor performance e garantia. Diferentemente, um processo de reparo busca corrigir uma falha específica no produto, onde a garantia apenas cobrirá a especificação corrigida.

Além disso, a principal diferença também se encontra no responsável pelo processo, como explica o autor. Processos de recondicionamento e reparo são realizados por oficinas independentes, as quais não possuem acesso às especificações técnicas de fabricação do produto novo e por conta disso, os processos realizados são baseados em experiência e não em uma metodologia técnica.

Diferentemente para a remanufatura, os responsáveis pelo processo são os fabricantes originais do produto, por conta disso, as especificações técnicas de funcionamento e qualidade de um produto novo são mantidas em um produto remanufaturado, permitindo assim oferecer a mesma garantia.

Por fim, existem ainda os processos de reciclagem que se diferem por processar a matéria prima usada e retorná-la ao início da cadeia de suprimento para

ser utilizada novamente na manufatura de um novo produto. Nesse caso se perde o valor agregado na manufatura inicialmente realizada, produzindo assim um novo produto com matéria prima reciclada.

Sendo assim, para a realização da remanufatura de um novo componente como é o caso do trabalho aqui presente, deve-se entender as especificações técnicas de fabricação do produto, a fim de mantê-las presentes no produto remanufaturado após o processo.

Para isso, nos parágrafos a seguir será apresentado alguns modos de falha e mecanismos de desgaste do componente estudado com base na literatura.

3.3 Mecanismos de desgaste de um bico injetor

Em um bico injetor, observa-se duas regiões críticas que podem sofrer danos decorrentes de sua utilização, entre elas estão a região de contato entre a agulha e o corpo do bico (chamada de região do assento da agulha), e a região interna dos furos de injeção, apresentado pelos pontos 3 e 9 da Figura 4. Entretanto, a vida útil do produto é projetada para absorver esses danos de forma controlada e evitar falhas durante a operação.

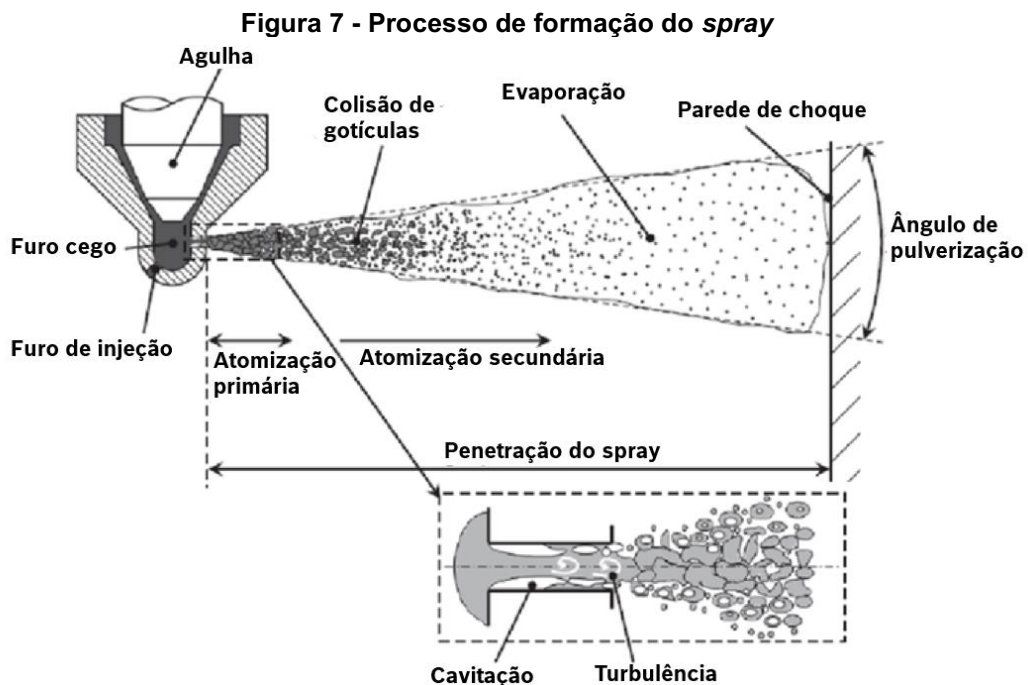
Nos parágrafos a seguir serão apresentados uma revisão do mecanismo de funcionamento que acontece dentro dos furos de injeção para um melhor entendimento da dinâmica dos fluidos presente nessa região. Com isso será possível compreender a causa do desgaste que leva a sua inutilização com o passar do tempo de uso.

Os furos de injeção de um bico injetor diesel representam uma das regiões mais críticas pois determinam a qualidade do jato de *spray* do combustível no momento da injeção para dentro da câmara de combustão do motor. Essa região é responsável pela atomização do fluido que influencia na mistura entre o ar e o combustível e aumenta a área de contato para uma rápida evaporação e combustão, afetando dessa forma diversos parâmetros de funcionamento na ignição da mistura como a liberação de calor, consumo de combustível, taxa de formação de poluentes e emissões segundo Bravo e Kweon (2013).

De forma resumida, o principal papel do furo de injeção é transformar o combustível inicialmente em fase líquida para uma fase gasosa (processo chamado de atomização), dessa forma aumentando a região de contato com o ar presente

dentro da câmara de combustão. Esse efeito é causado pela liberação do combustível a alta pressão pelos orifícios minúsculos dos furos de injeção.

Para que a injeção de combustível seja possível, a pressão dentro do bico injetor precisa ser muito maior que a pressão dentro da câmara de combustão, essa diferença de pressão resulta em um fluxo de combustível de alta velocidade que se desenvolve dentro dos furos de injeção. Além da alta velocidade, a diferença de pressão abrupta causa o aparecimento de pontos de cavitação no interior dos furos, aumentando assim a turbulência do fluxo e auxiliando em sua atomização, como mostra Bravo e Kweon (2013) com a Figura 7.



Fonte: Traduzido de Bravo e Kweon (2013)

Entretanto, a cavitação em excesso assim como a turbulência extrema podem causar efeitos prejudiciais no desenvolvimento da atomização do *spray* e na vida útil do componente. Os vórtices causados pelo colapso das bolhas de cavitação aumentam a turbulência e promovem a atomização primária, esse efeito em excesso pode ocasionar em uma redução na descarga do combustível e causar danos de erosão nas paredes do furo de injeção. (He et al, 2022).

Diversos autores estudam a formação e os efeitos da cavitação que estão presentes em uma enorme gama de aplicações como marítimas, automotivas e aéreas, assim como em turbinas a vapor, usinas hidrelétricas, motores de foguetes,

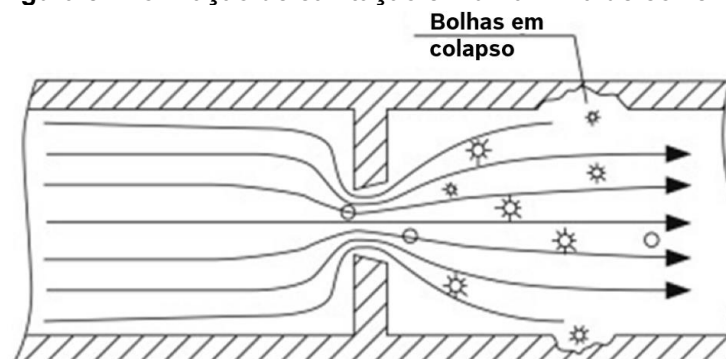
tubulações, bombas hidráulicas e válvulas de pressão, ocasionando danos significativos de perda de massa podendo ocasionar falhas mecânicas.

Segundo Cristofaro et al. (2020), o aumento da pressão de injeção em injetores diesel pode levar a uma maior eficiência no processo de combustão, aumentar a eficiência geral do motor e reduzir a emissão de poluentes, porém, pressões muito elevadas levam ao aumento na velocidade do jato de *spray* ocasionando um decaimento abrupto na pressão do fluxo de combustível e o aparecimento de bolhas de cavitação. Esse mecanismo acontece de forma cíclica resultando em um fenômeno agressivo de dano por fadiga na superfície dos bicos injetores.

Khoshnaw e Gubner (2021) apresenta uma explicação detalhada de como ocorre a formação do dano causado pela cavitação em uma linha de corrente de um fluido líquido. Basicamente existem dois modos de ocorrência de cavitação que podem causar danos a uma superfície sólida, sendo eles através de ondas de choque causadas pela implosão de bolhas de vapor, ou por micro jatos causados pela repartição das bolhas de vapor por influência do fluido em movimento.

Ambos os efeitos acontecem durante uma variação de pressão ao longo da linha de corrente do fluido em um curto período de tempo. Essa variação de pressão geralmente ocorre quando o fluido percorre uma região com diminuição na área do fluxo, ocasionando um aumento na velocidade e diminuição da pressão estática segundo a lei da conservação da energia, como mostra a Figura 8.

Figura 8 - Formação de cavitação em uma linha de corrente



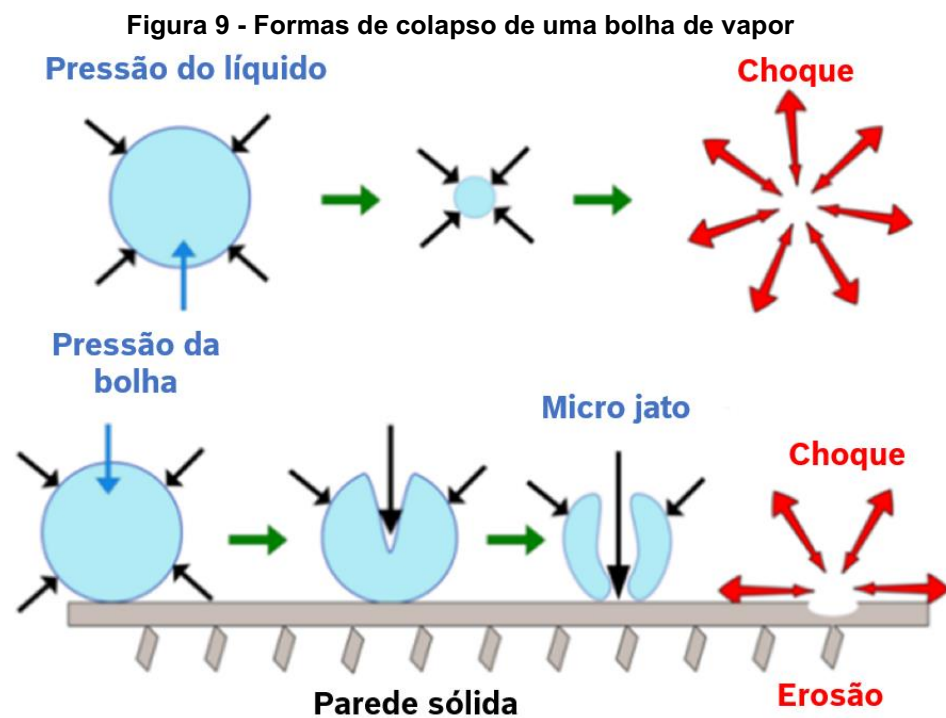
Fonte: Traduzido de Khoshnaw e Gubner (2021)

Como consequência, caso a restrição da área seja suficiente para diminuir a pressão do fluido para abaixo da pressão de saturação de vapor do líquido, irá ocorrer uma evaporação pontual do líquido e o aparecimento de bolhas de vapor nessas

regiões, além disso, com a diminuição da pressão, as bolhas de vapor tendem a crescer momentaneamente até que a velocidade volte a diminuir e a pressão aumentar.

Com o aumento posterior da pressão, as bolhas de vapor voltam a diminuir e caso esse aumento seja muito abrupto, ocorrerá uma implosão e liberação de uma onda de choque antes do vapor retornar a fase líquida. Essa onda de choque possui energia suficiente para causar danos a superfícies metálicas visto que se propaga em uma área muito pequena.

A Figura 9 representa as duas formas de ocorrência de ondas de choque causadas pela implosão de uma bolha de vapor durante o efeito da cavitação. Quando a implosão ocorre no meio da linha de corrente do fluxo, ela se propaga de forma simétrica por conta da distribuição de pressão ao longo da superfície da bolha. Entretanto, quando a bolha se encontra próxima a uma superfície sólida, a implosão ocorre de forma assimétrica e ocorre o aparecimento de micro jatos que reparam a bolha e liberam as ondas de choque, causando assim erosões na superfície.



Fonte: Traduzido de Sarkar et al. (2018)

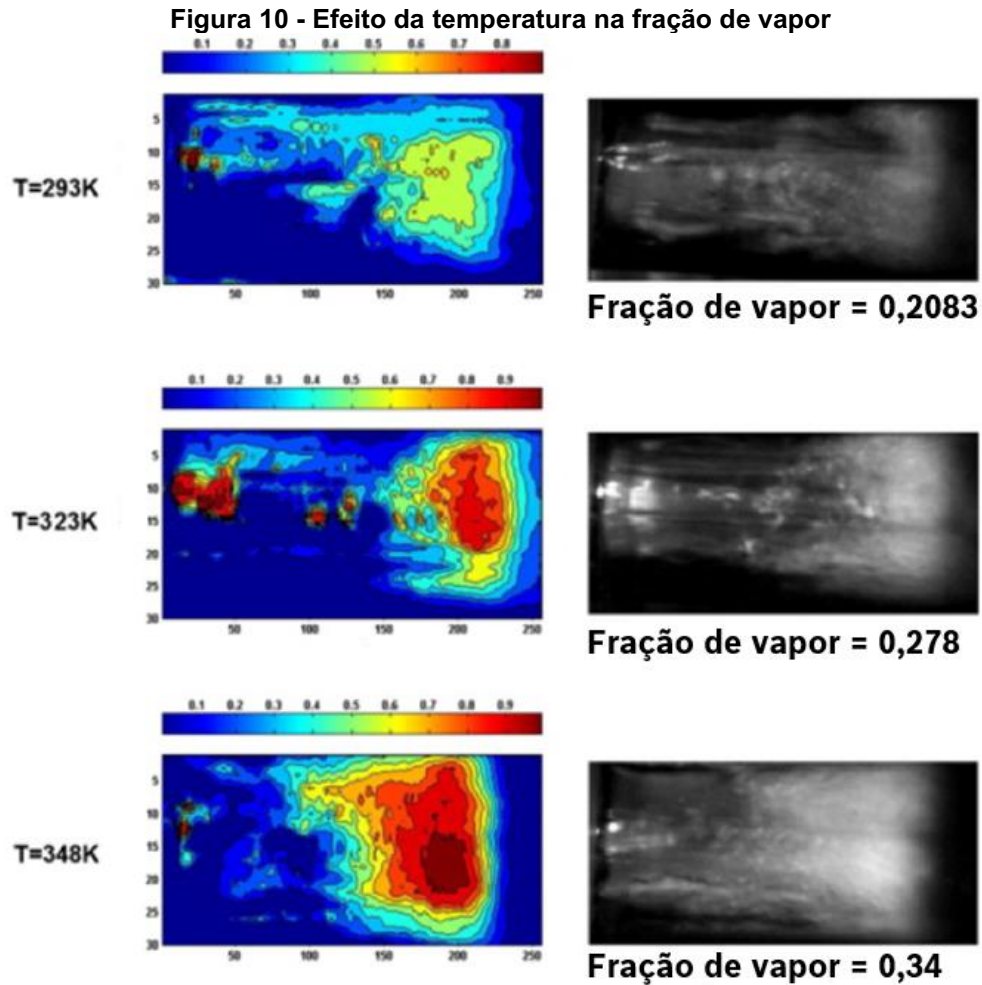
Como apresentado, conclui-se que o surgimento da cavitação está diretamente relacionado ao efeito da diferença de pressão ao longo de uma linha de corrente de um líquido que causa o surgimento de bolhas de vapor por conta de sua

evaporação quando a pressão de vapor do líquido é atingida, porém, a pressão do fluxo não é o único fator determinante para essa ocorrência, sendo influenciado também pela temperatura do fluxo como mostra Giorgi et al. (2013).

Em seu estudo experimental, Giorgi et al. (2013) analisou a ocorrência de cavitação de um fluxo de água por um orifício pequeno, simulando o canal do furo de injeção de um bico injetor, onde foi analisado tanto o efeito da pressão quanto o efeito da temperatura para o aparecimento das bolhas de cavitação. O comprimento e o volume de cavitação foram analisados visualmente utilizando uma análise espectral de imagem.

Foi possível concluir que os efeitos térmicos representam um papel importante além da pressão do fluxo para o aparecimento da cavitação. Além disso, observou-se que a cavitação se originou na entrada do orifício e obteve um aumento em seu desenvolvimento juntamente com o aumento do fluxo e diminuição da pressão dentro do orifício, sendo assim, o comportamento da cavitação teve influência tanto da diferença de pressão quanto da temperatura do fluxo.

Como um dos resultados obtidos no estudo, a Figura 10 apresenta o efeito de três níveis diferentes de temperatura na formação de cavitação para uma mesma condição de pressão do fluxo de água. Observa-se que a fração de vapor aumenta de 20% para 34% com o aumento da temperatura de 293K para 348K, ou seja, houve um aumento no aparecimento de bolhas de vapor. A principal razão explicada é por conta da variação na pressão de vapor do líquido, o aumento da temperatura provoca a diminuição da pressão de vaporização, o que facilita o processo de formação de vapor para uma dada pressão. Isso torna possível a vaporização das gotas em pressões menores.



Fonte: Traduzido de Giorgi et al. (2013)

Zhao et al. (2022) conduziu um estudo de simulação térmica para investigar características como aquecimento e resfriamento ao longo dos furos de injeção de um bico injetor diesel em uma aplicação marítima de common rail. Outros parâmetros puderam ser avaliados durante a simulação como a distribuição de temperatura e de pressão, assim como a distribuição do perfil de velocidade do combustível e distribuição da fração de vapor do fluido.

O objeto de estudo do autor corresponde a um bico com 12 furos de injeção, porém foi considerado somente 1 para os cálculos numéricos por conta do tempo de resposta e complexidade da simulação. Para o furo de injeção foi considerado um diâmetro de 0,63mm e um comprimento de 3,5mm, muito condizente com a realidade que se encontra em bicos injetores comuns no mercado.

Além disso, foi considerado também o efeito da agulha nos cálculos numérico, visto que a abertura do bico acontece pelo levantamento da agulha e a liberação do combustível por uma passagem entre a agulha e o corpo do bico. A altura de

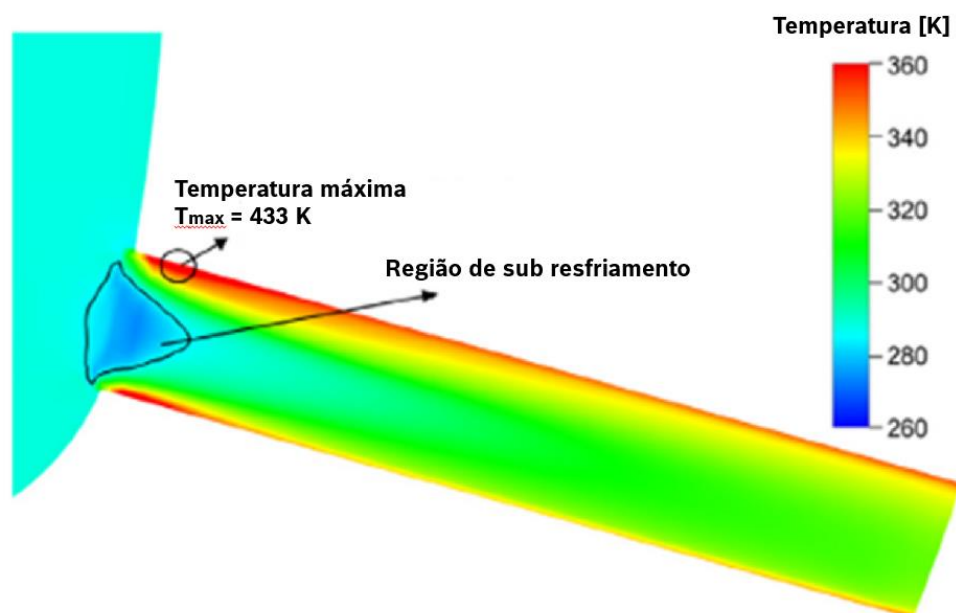
levantamento da agulha foi considerada como 0,7mm, também muito condizente com o parâmetro real de funcionamento.

Para os parâmetros de funcionamento, foi considerado uma pressão de entrada no furo de 165 Mpa (pressão na qual normalmente trabalha o injetor em altas rotações) e a pressão de saída do furo como 5 Mpa (pressão na qual geralmente se encontra a câmara de combustão do motor no momento da injeção). A temperatura do combustível no injetor foi considerada como 300K para simular um injetor trabalhando com temperatura ambiente.

O número de malhas se encontrou na estabilidade dos resultados em aproximadamente 1,2 milhões. Os resultados foram validados com um estudo experimental nas mesmas condições de simulação. O modelo matemático utilizado considerou o escoamento como não-isotérmico e fluxo de combustível compressível.

A Figura 11 apresenta o perfil de temperatura obtido pelo resultado da simulação na qual observa-se a característica não-isotérmica em diversas regiões do furo de injeção. Uma característica interessante que se observa é na região central da entrada do furo de injeção, onde a temperatura do fluido diminuiu para abaixo da temperatura inicial de entrada, ocorrendo um resfriamento nessa região do combustível. O termo utilizado para essa região foi de *subcooling*. A explicação se dá pela grande descarga na pressão de entrada.

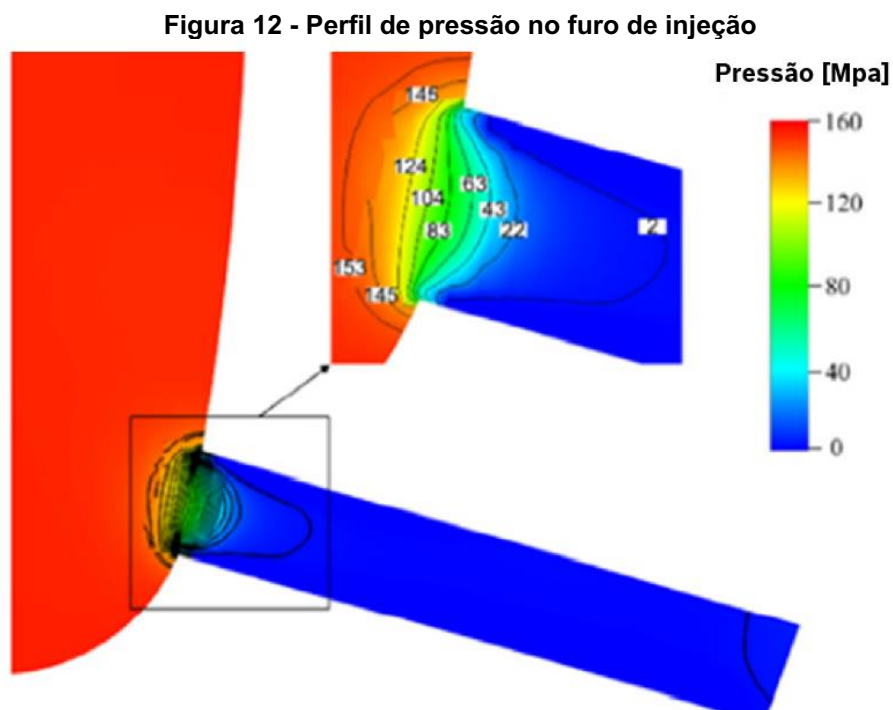
Figura 11 - Perfil de temperatura no furo de injeção



Fonte: Traduzido de Zhao et al. (2022)

A menor temperatura observada na região de *subcooling* foi de 15K abaixo da temperatura inicial de 300K. Com exceção dessa região, todo o restante do furo de injeção apresentou uma temperatura maior que a temperatura inicial, ou seja, houve aquecimento do fluido por conta do escoamento. A maior temperatura observada foi nas paredes do furo de injeção próximas à entrada do combustível, cujo valor máximo encontrado foi de 133K acima da temperatura inicial.

A Figura 12 apresenta o perfil de pressão observado ao longo do furo de injeção. Observa-se que a região de entrada do furo representa a maior queda de pressão relativa, diminuindo de uma diferença de 160 Mpa para 0 Mpa em um curto espaço, mesma região onde se observa o efeito de *subcooling*. Após esse decaimento abrupto, a pressão se mantém praticamente constante por todo o comprimento do furo de injeção.



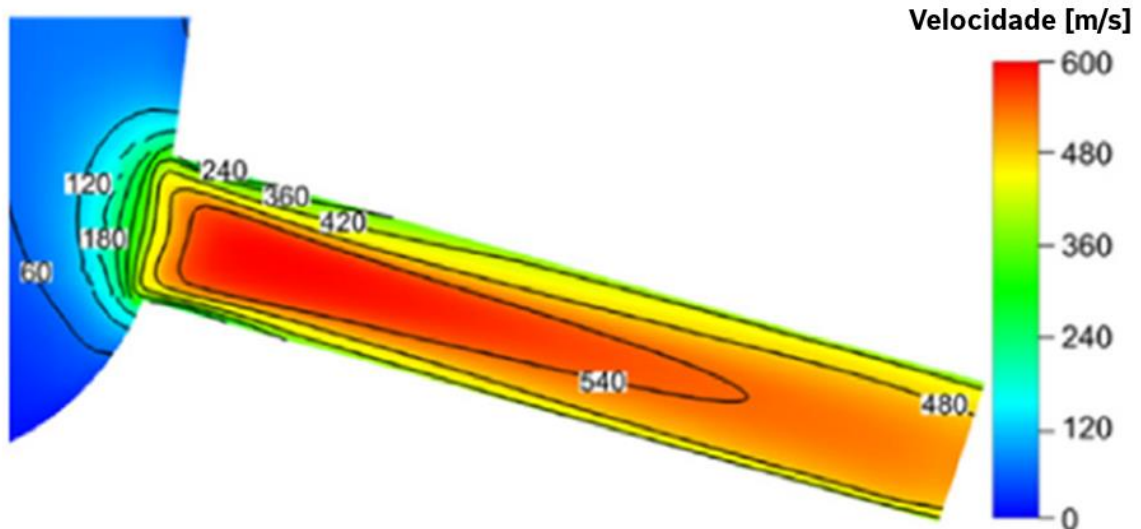
Fonte: Traduzido de Zhao et al. (2022)

A Figura 13 apresenta o perfil de velocidade do escoamento obtido pela simulação numérica. Observa-se que dentro da câmara de pressão do bico injetor a velocidade inicial é zero, e ocorre um aumento a medida que se aproxima do furo de injeção ocasionada pela diferença de pressão na saída do furo.

Observa-se também que a velocidade de escoamento no interior do furo de injeção é maior que a velocidade observada próximas às paredes do furo. Esse

fenômeno está de acordo com a lei do atrito interno de Newton visto que as forças cisalhantes das camadas do escoamento tendem a diminuir a velocidade das partículas conforme se aproximam da parede onde a velocidade tende a zero. A velocidade no núcleo do escoamento atingiu 540 m/s enquanto a velocidade próxima à parede permaneceu em 240 m/s.

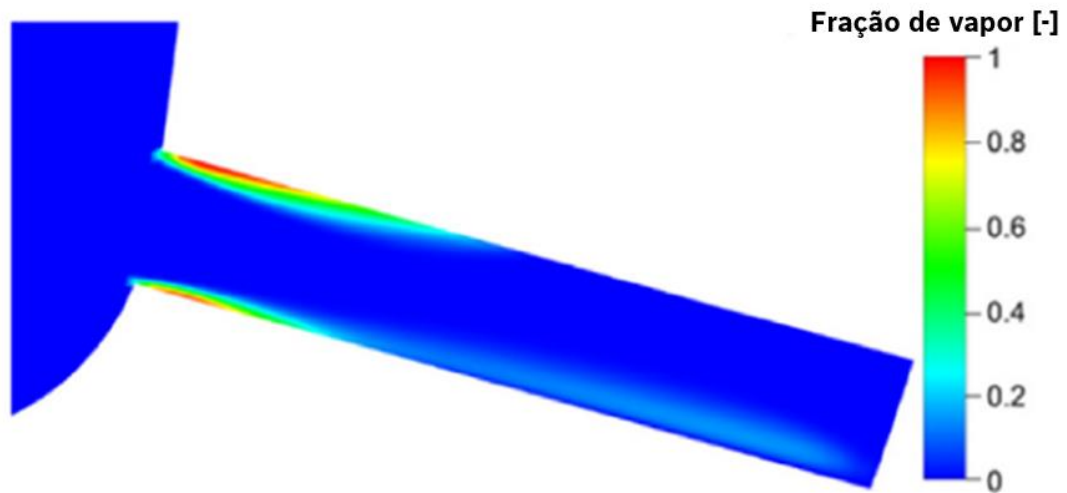
Figura 13 - Perfil de velocidade no furo de injeção



Fonte: Traduzido de Zhao et al. (2022)

Por fim, a Figura 14 apresenta o perfil da fração de vapor observada ao longo do furo de injeção durante o escoamento. Onde a fração de vapor aparece igual a 1 representa que o combustível dessa região se encontra 100% no estado de vapor, enquanto em regiões onde a fração de vapor aparece como zero representa que o combustível se encontra 100% em estado líquido, podendo ocorrer regiões onde existe uma mistura entre esses dois estados. Isso significa que houve regiões onde aconteceu a evaporação pontual do combustível representada pelo efeito da cavitação.

Figura 14 - Distribuição da fração de vapor no furo de injeção



Fonte: Traduzido de Zhao et al. (2022)

Um ponto interessante é que a região que apresenta a maior fração de vapor consiste na mesma região que se apresenta com a maior temperatura e a menor velocidade de escoamento. Essa relação acontece, pois, entende-se que esses fatores estão interligados conforme explica o autor.

À medida que o escoamento acontece pela diferença de pressão entre a entrada e saída do furo de injeção, a velocidade próxima às paredes tendem a diminuir. Essa diminuição causada pelas forças de atrito cisalhante do escoamento reduzem a energia cinética do fluxo próximo às paredes e ocorre o aumento de temperatura por conta da transferência de energia, como explica Zhao et al. (2022).

Além disso, a queda de pressão diminui a pressão de vapor do combustível, tornando-o mais suscetível a evaporação e ao aparecimento de bolhas de vapor como cavitação. O aparecimento de bolhas de vapor auxilia ainda mais na redução de velocidade do fluxo dessa região e na transferência da energia cinética para energia térmica, auxiliando no aumento de temperatura.

O aumento de temperatura ocasiona a evaporação de uma parcela ainda maior de combustível, e por conta desse efeito em cadeia, observa-se uma fração de vapor alta nessa região e sua relação com a temperatura máxima e a velocidade mínima encontrada.

Por fim, conclui-se que o aparecimento de cavitação está suscetível a acontecer próximo às paredes do furo de injeção, e, ao longo da vida útil do injetor, esse efeito pode ocasionar desgaste superficial conforme comentado ao longo da discussão do capítulo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Atualmente a empresa parceira realiza o processo de remanufatura em determinados componentes de injetores e bombas de injeção de combustível de motores a diesel, para isso ela conta com uma linha de produção voltada especialmente para essa tarefa onde existe disponível diversas bancadas para desmontagem dos produtos, tanques de limpeza e secagem, maquinário para realização de reparo, bancadas de montagem especializadas, bancadas com equipamentos para exames visuais e bancadas de medições dos parâmetros funcionais do produto para validar seu funcionamento antes de serem encaminhados ao cliente final.

Existe um volume de injetores e bombas que são enviados para remanufatura por clientes que atuam tanto no mercado brasileiro quanto no mercado externo. Dentro desse volume está inserido os injetores de locomotivas cujos bicos serão analisados ao decorrer do trabalho. Importante ressaltar que atualmente todos os bicos injetores usados são descartados e substituídos por componentes novos.

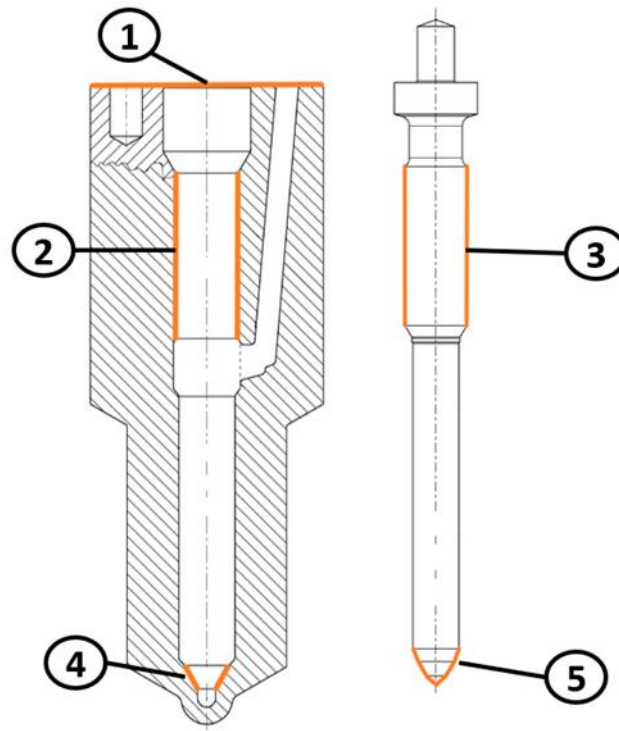
Como comentado durante a revisão bibliográfica, o bico injetor possui diversas regiões que sofrem desgastes durante sua vida útil, sendo uma delas como o interior dos furos de injeção. Essa região é de difícil acesso para análise física pois a dimensão dos furos é extremamente pequena, logo, equipamentos com essa capacidade são escassos no mercado e possuem um valor de investimento muito alto.

Sendo assim, esse capítulo do trabalho contemplará a análise física de outras regiões que também sofrem desgaste e são de fácil acesso, sendo possível de realizar com os equipamentos presentes na empresa.

4.1 Regiões de desgaste analisadas no bico injetor

A Figura 15 apresenta as regiões do bico injetor que serão analisadas seguindo a metodologia dos parágrafos seguintes, sendo elas como a superfície de vedação (1), a guia do corpo (2), a guia da agulha (3), o assento do corpo (4) e o assento da agulha (5).

Figura 15 - Regiões de análise para o bico e a agulha



Fonte: Autoria própria (2023)

O objetivo principal é analisar as regiões de contato entre os componentes para verificar se existe desgaste significativo que poderia comprometer seu funcionamento visto que a análise será realizada em um bico injetor retornado de campo o qual já atingiu o fim de sua vida útil.

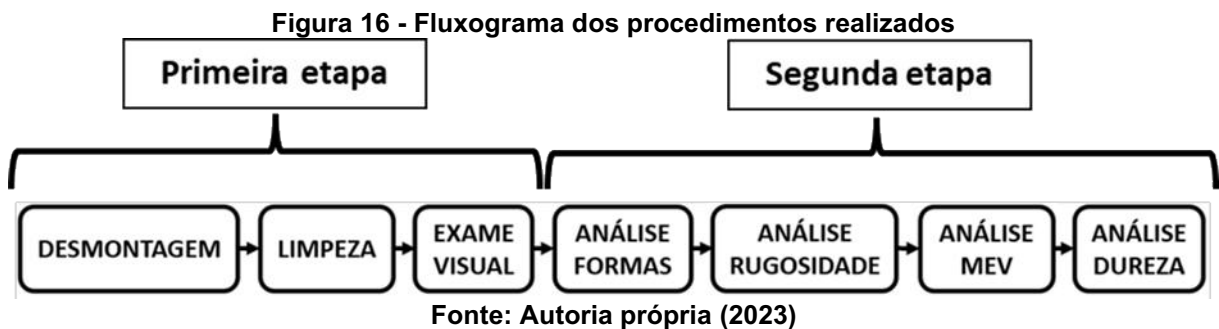
Com base nos resultados, será possível estimar a possibilidade de estender a vida útil do bico injetor para trabalhar por mais um ciclo de funcionamento, porém, o escopo do trabalho não estará voltado a mensurar o tempo de vida útil possível, mas sim analisar os níveis de desgaste de um bico injetor utilizado.

4.2 Fluxograma dos processos realizados

Para facilitar a visualização dos procedimentos que serão realizados, a Figura 16 mostra o fluxograma que será seguido ao longo do desenvolvimento deste capítulo assim como sua divisão por etapas.

A primeira etapa representa os processos iniciais para separação do bico injetor, sua limpeza e um exame visual genérico a fim de identificar possíveis defeitos macros no componente como trincas ou rachaduras. Caso o componente analisado tenha algum defeito macro, este deve ser substituído para não influenciar os resultados da análise da segunda etapa.

A segunda etapa representa uma análise técnica mais detalhada a fim de mensurar o nível de desgaste do componente nas regiões que foram descritas conforme Figura 15. A partir dos resultados dessa etapa, será possível a comparação com as especificações técnicas de um bico injetor novo para observar se houve desgastes consideráveis durante sua vida útil. Além disso, será possível propor opções de reparo caso as especificações estejam acima do especificado para um produto novo.



4.3 Desmontagem

Como primeira parte do processo, é necessário a separação do bico injetor dos outros componentes do injetor, sendo necessário a realização de uma desmontagem simples realizada na bancada de desmontagem da empresa. Para isso, utiliza-se uma fixação desenvolvida especialmente para esse tipo de injetor a fim de evitar possíveis falhas que comprometam a segurança do operador.

Além do suporte de fixação do injetor, utiliza-se também uma chave correspondente ao tamanho correto da porca do bico e um cabo extensor da chave para facilitar a quebra do torque. Após esse procedimento, basta desrosquear a porca e retirar os componentes que se encontram inseridos no interior do injetor. Alguns desses componentes estão liberados para a remanufatura completa, porém a análise do trabalho será direcionada apenas ao bico injetor.

A Figura 17 apresenta o modo de fixação e a chave utilizada no início do processo de desmontagem do injetor na bancada de desmontagem da empresa. Para isso a fixação deve ser robusta pois o torque atingido durante sua montagem é muito alto, além disso, após sua vida útil de funcionamento, resquícios de sujeira e carbonização implicam para dificultar ainda mais a desmontagem da porca do bico.

Outro ponto importante dessa etapa é manter sempre o conjunto corpo do bico junto com sua respectiva agulha, isso porque o modo de desgaste entre esses

dois componentes está interligado visto que trabalham juntos, sendo assim, o objetivo é analisar as regiões onde a agulha e o corpo do bico estão em contato.

Além disso, após a desmontagem do bico injetor, a agulha se encontra solta sob o risco de dano por queda, o que pode interferir nas análises de desgaste. Esse risco deve ser evitado realizando a desmontagem com cautela.

Figura 17 – Modo de fixação para desmontagem do injetor



Fonte: Autorial própria (2023)

4.4 Limpeza

Após a desmontagem é necessário um processo de remoção das impurezas provenientes da utilização em campo. Para isso existe uma linha de limpeza com diversos tanques independentes contendo produtos químicos específicos destinados a facilitar a remoção de sujeiras, impurezas ou óleo contaminado. Para os bicos injetores, a camada de carbonização externa proveniente da queima do combustível também pode ser removida por este processo.

Durante o procedimento de limpeza, o bico injetor é direcionado para os tanques conforme sequência definida, sendo o primeiro e segundo tanque com função de desengraxante para o amolecimento da sujeira mais superficial como graxa e óleo. Na sequência ocorre um enxague em água limpa no terceiro tanque para remover os resíduos deixados pelo produto de desengraxe.

O quarto tanque possui um forte produto químico que realiza uma decapagem alcalina nos produtos, essa etapa é capaz de remover toda a camada de sujeira mais grossa como carbonização e sinais de oxidação presentes. Na sequência ocorre novamente um enxague em água limpa no quinto tanque para remover resíduos de sujeira liberada e do produto químico da decapagem.

O sexto tanque possui um produto químico diferente com a função de neutralização do químico usado para decapagem alcalina. Essa etapa serve principalmente para proteger a peça caso exista resquícios do produto de decapagem alcalina em alguma região em contato com a peça, o que pode ocasionar em uma corrosão profunda e perda de material se o tempo de exposição for muito longo.

O tempo utilizado durante a limpeza não é suficiente para causar danos aos componentes, apenas ocorre a remoção superficial de impurezas. Após o tanque de neutralização ocorre novamente um enxague em água limpa no sétimo tanque para remoção do produto químico.

O oitavo tanque possui um desengraxante protetivo que promove uma camada de proteção superficial no material da peça e protege por alguns dias contra efeitos de oxidação. Essa etapa é importante pois após a decapagem alcalina o material fica mais sensível a esse efeito, logo, é possível realizar os processos seguintes sem riscos de danificação por oxidação.

Por fim existe o último tanque que realiza a secagem dos componentes com sopro de ar quente. Após todo esse processo de limpeza o componente se encontra pronto para a realização do exame visual facilitando assim a descoberta de possíveis defeitos. A Tabela 1 apresenta o tempo em segundos onde o bico injetor permaneceu submerso em cada um dos tanques da linha de limpeza.

Tabela 1 - Tempo de exposição na linha de limpeza

Tanques	Processo	Tempo de exposição (segundos)
1	Pré Desengraxe	420
2	Desengraxe	420
3	Enxágue	120
4	Decapagem Alcalina	660
5	Enxágue	60
6	Neutralização	600
7	Enxágue	120
8	Desengraxante Protetivo	90
9	Secagem	960

Fonte: Autoria própria (2023)

4.5 Exame visual

Após a etapa de limpeza finalizada e o bico injetor totalmente seco, é possível a realização de um exame visual externo para identificar possíveis defeitos superficiais como trincas, deformações, corrosões, batidas ou outras imperfeições locais. Para isso utiliza-se uma bancada destinada ao exame visual de componentes e equipada com luzes, lente de aumento e um boroscópio identificado na Figura 18.

Figura 18 - Representação do equipamento boroscópio e lupa de aumento



Fonte: Autoria própria (2023)

O equipamento denominado como boroscópio possui uma câmera acoplada à uma haste longa e fina cuja imagem é transmitida à um monitor ao lado, com isso é possível acessar regiões estreitas do componente e visualizar o estado das superfícies dos canais internos para identificar imperfeições locais. A lente de aumento também possui luzes acopladas para facilitar a visualização e a capacidade de aumentar a imagem em 10 vezes, sendo utilizada para a visualização das superfícies externas no bico injetor.

Com o exame visual finalizado e o bico injetor selecionado, é possível prosseguir para as análises físicas da segunda etapa do trabalho apresentado nos parágrafos seguintes. A limpeza anterior é importante para essa etapa pois permite a coleta de resultados mais confiáveis sem a presença de sujeiras ou partículas externas.

4.6 Análise de formas

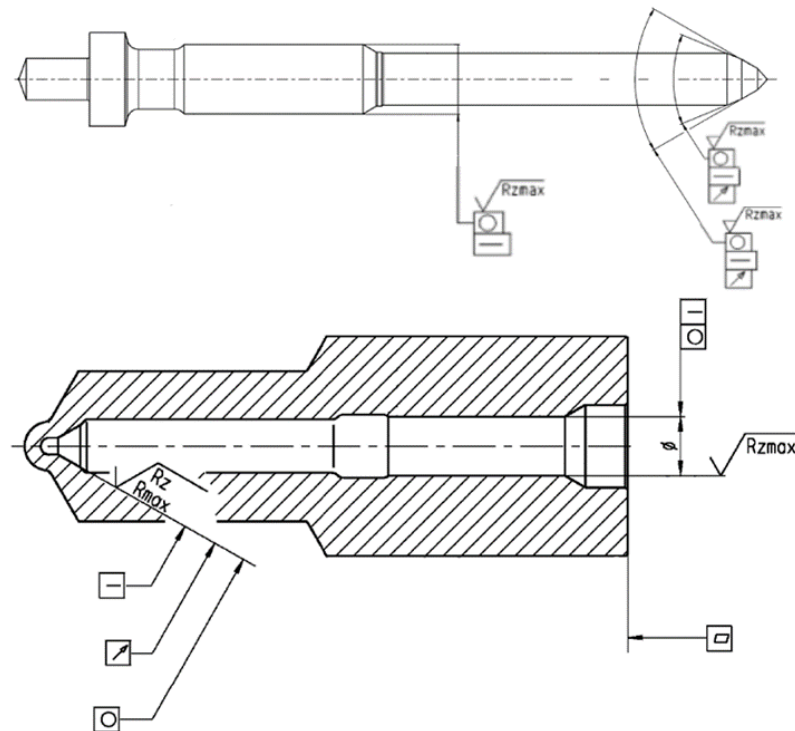
Como primeiro passo para a segunda etapa, entende-se a necessidade de medir alguns parâmetros dimensionais relacionados à forma do bico injetor para

entender o primeiro nível de desgaste em comparação à um bico injetor novo. O intuito dessa etapa é verificar se durante sua vida útil, o bico injetor teve perdas de tolerâncias decorrentes do desgaste no contato entre o corpo do bico e sua agulha.

As regiões analisadas foram apresentadas de forma esquemática pela Figura 15 anteriormente, sendo elas como a superfície de vedação do corpo do bico, a guia da agulha, a guia do corpo do bico, o assento da agulha e o assento do corpo do bico. Com o apoio técnico da empresa definiu-se quais as tolerâncias dessas regiões são críticas para o funcionamento e devem ser analisadas e medidas.

A Figura 19 apresenta as tolerâncias medidas segundo prescrição do desenho técnico do componente. Entre elas encontram-se a circularidade representada pelo círculo, a retitude representado pela linha, a concentricidade com a guia representado pela seta, a planeza representada pelo paralelogramo e a rugosidade representada pela indicação de R_z e R_{max} .

Figura 19 - Formas analisadas para a agulha e o corpo do bico injetor



Fonte: Autoria própria (2023)

De forma geral, as tolerâncias analisadas são responsáveis por garantir diversos parâmetros importantes de funcionamento do componente, como por exemplo o correto movimento de subida e descida da agulha e a capacidade de

vedação tanto no assento quanto na superfície de vedação, as quais devem ser capazes de aguentar altas pressões durante o funcionamento.

Para a medição desses parâmetros, utilizou-se um equipamento de metrologia de formas especializado para essa função presente na empresa. Basicamente, o equipamento possui uma haste longa e fina chamada de sonda que se movimenta precisamente em vários graus de liberdade podendo acessar áreas estreitas para realizar medições.

A medição acontece quando a sonda encontra a superfície do componente e registra essa posição em um plano cartesiano. A partir de diversos pontos medidos, o equipamento é capaz de fornecer informações como circularidade e linearidade das superfícies, conseqüentemente, é possível extrair informações como paralelismo, concentricidade e retitude. A Figura 20 apresenta um exemplo do equipamento de medição utilizado.

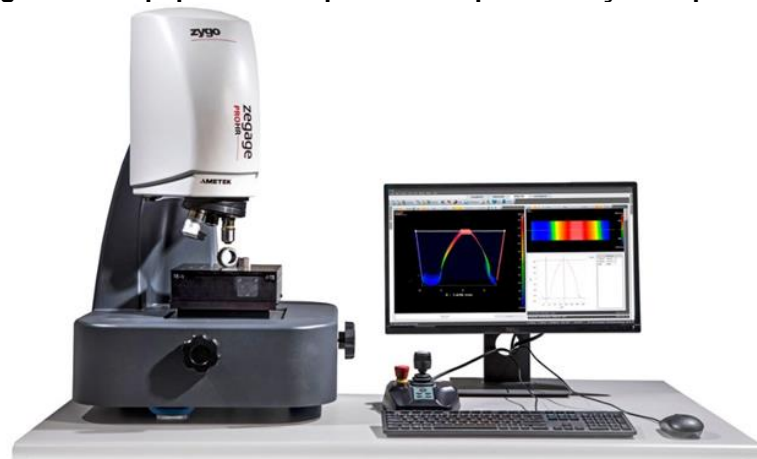
Figura 20 - Equipamento especializado em medição de formas



Fonte: Autoria própria (2023)

Para a medição da planeza da superfície de vedação, foi utilizado um equipamento especializado nessa função que utiliza um sistema de medição óptico, ou seja, por meio da emissão de raios de luz, o equipamento é capaz de escanear a superfície e criar o perfil topográfico tridimensional da região com altíssima precisão. Além do perfil 3D, é fornecido também um valor medido correspondente a planeza da região, que quanto mais próximo de zero mais plano é a superfície. A Figura 21 apresenta um exemplo do equipamento de medição utilizado.

Figura 21 - Equipamento especializado para medição de planeza



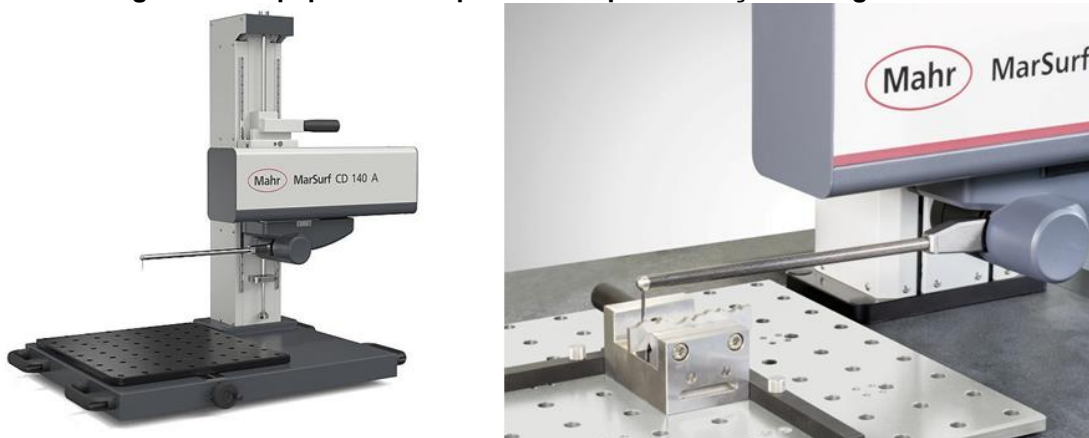
Fonte: Autoria própria (2023)

4.7 Análise de rugosidade

Para a medição de rugosidade indicada pela nomenclatura de R_z e R_{max} foi utilizado um equipamento específico para essa função denominado de rugosímetro. O funcionamento consiste em uma sonda móvel com uma agulha sensível na ponta que percorre a superfície de forma linear e coleta informações a respeito do perfil de altura.

Dado a precisão do equipamento, este é capaz de identificar diferenças na ordem de milésimos de milímetros e traçar um gráfico bidimensional representando os picos e vales da superfície. O valor medido pode ser através de uma rugosidade média da região ou uma rugosidade máxima que representa a diferença entre o maior pico e o menor vale medido. A Figura 22 apresenta um exemplo do equipamento utilizado.

Figura 22 - Equipamento especializado para medição de rugosidade



Fonte: Autoria própria (2023)

Importante ressaltar que para a medição de rugosidade do assento no corpo do bico é necessário um corte transversal no componente, caso contrário o instrumento de medição não consegue atingir a região desejada. Além disso, outras medições como a análise da superfície do assento pelo microscópio eletrônico e a análise da camada de dureza somente são possíveis após esse corte transversal. Esse procedimento é apenas necessário para o corpo do bico, visto que para as medições na agulha não há essa dificuldade de acesso.

Sendo assim, como é necessário um procedimento destrutivo para continuação das análises, os exames anteriores necessitam ser priorizados e finalizados antes de prosseguir para as próximas etapas. Após as análises realizadas descritas acima, encaminhou-se o corpo do bico para o setor de ferramentaria da empresa onde foi solicitado o corte transversal das amostras, realizado com um disco de corte, exatamente ao meio e ao longo de todo o comprimento como apresentado pela Figura 23.

Figura 23 - Corte transversal no corpo do bico



Fonte: Autoria própria (2023)

Um outro ponto importante necessário para a análise da camada de dureza é o cuidado durante o corte transversal, visto que se realizado de forma imprudente, pode ocorrer um aquecimento indesejado na região do corte e interferir os valores de dureza por modificar a microestrutura do material. Para que isto não ocorra, foi informado a finalidade do corte que aconteceu de forma lenta e controlada, com fluido refrigerante na região do corte para evitar o aquecimento indesejado.

Após o corte transversal e a medição de rugosidade do assento do corpo do bico, o conjunto foi encaminhado ao laboratório de análise de materiais da empresa

para realização procedimentos de coleta de imagem no microscópio e medição da camada de dureza.

4.8 Análise MEV

A região analisada pelo microscópio corresponde ao assento no corpo do bico e o assento na ponta da agulha, ou seja, região de contato entre os dois componentes sendo a mais afetada pelo desgaste. O intuito desse procedimento é observar visualmente qual o estado dessa região após um ciclo de vida do componente, possibilitando entender o modo de desgaste e sua extensão, além de permitir a comparação visual dos efeitos entre o corpo do bico e a agulha.

Para isso, utilizou-se um equipamento presente na empresa denominado de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), o qual reproduz imagens através da emissão de feixes de elétrons na superfície analisada. A imagem produzida possui um caráter virtual pois é formada pela codificação da energia emitida pelos elétrons no momento de sua colisão com a superfície. Por conta disso, o equipamento é capaz de fornecer imagens de alta ampliação e alta resolução. A Figura 24 apresenta um exemplo do equipamento utilizado.

Figura 24 - Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte: Autoria própria (2023)

4.9 Análise de dureza

Para a medição da camada de dureza, utilizou-se um equipamento presente na empresa denominado microdurômetro, o qual possui um durômetro acoplado a um microscópio óptico convencional. Basicamente, o durômetro representa um

equipamento que provoca um entalhe no material utilizando um instrumento com ponta de diamante e uma força pré-determinada.

De acordo com o tamanho do entalhe que é medido pelo microscópio, é possível determinar a dureza naquele ponto em específico de forma que, quanto maior o entalhe causado pela ponta de diamante, menor é a dureza naquele ponto do material, ou seja, menos resistente o material está contra a perfuração pelo diamante. A Figura 25 apresenta um exemplo do equipamento utilizado.

Figura 25 - Equipamento especializado para medição de dureza



Fonte: Autoria própria (2023)

Além disso, esse equipamento conta com um controle de posicionamento preciso da amostra que será medida a dureza, ou seja, é capaz de movimentar o corpo de prova em unidades de centésimos de milímetros permitindo o controle exato da posição que será feito o entalhe para coletar o resultado de dureza naquele ponto.

Sendo assim, é possível coletar a dureza em diversos pontos espaçados igualmente entre si para identificar o gradiente de decaimento de dureza, visto que por conta do tratamento térmico utilizado nesses componentes, a superfície externa possui o maior valor de dureza ocorrendo uma diminuição gradativa ao se aproximar do núcleo que possui a menor dureza.

Para uma maior precisão dos valores de dureza, é necessário a preparação de um corpo de prova especial que deve receber um polimento com pasta de diamante na superfície de medição, evitando assim interferências de sujeiras, imperfeições ou corpos externos nos resultados.

Para a preparação do corpo de prova, foi necessário a realização de um segundo corte além do corte transversal que havia sido realizado anteriormente para diminuir o tamanho do bico e selecionar apenas as regiões que seriam utilizadas na medição de dureza, com isso, foi possível produzir apenas um corpo de prova com ambas as regiões de medição para otimizar o processo. A Figura 26 apresenta o corpo de prova que foi produzido no laboratório de metalografia da empresa.

Figura 26 - Corpo de prova para medição do gradiente de dureza



Fonte: Autoria própria (2023)

Além da medição do gradiente de dureza com o corpo de prova apresentado pela Figura 26, foi realizado a medição da dureza superficial na região da superfície de vedação do corpo do bico. Para isso, utilizou-se a outra metade do corpo do bico após o corte transversal. Nesse caso não foi necessário a fabricação de um corpo de prova especial visto que a medição foi apenas pontual na superfície externa realizado na indicação do “x” representado na Figura 27.

Figura 27 - Ponto de medição da dureza superficial



Fonte: Autoria própria (2023)

Por fim, a partir dos resultados coletados, realizou-se a comparação com as especificações técnicas de um produto novo para entender se mesmo após um ciclo de vida, o bico injetor ainda está dentro de suas especificações técnicas originais ou se possui margem para realização de reparos e possibilitar a extensão para mais um ciclo de vida de funcionamento, o que será discutido e avaliado no parágrafo seguinte.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme comentado, este capítulo apresentará os resultados obtidos a partir dos métodos realizados de acordo com o fluxograma apresentado pela Figura 16, além disso, será discutido os motivos que levaram a realização de cada etapa do processo e suas peculiaridades de acordo com os conhecimentos técnicos obtidos durante a realização do trabalho.

Para a realização dos processos descritos, foi selecionado um injetor aleatório dentro do lote de injetores que chegaram para a remanufatura na empresa, cujo bico foi utilizado para as análises. Não é possível identificar o tempo que esse injetor trabalhou ou a quantidade de quilômetros que a locomotiva percorreu, por conta disso a seleção foi realizada de forma aleatória.

Além disso, entende-se como próximos passos de um trabalho futuro, aumentar a quantidade de bicos analisados para confirmar se os resultados se repetem, visto que foi analisado apenas um bico injetor como primeiro passo para verificar se existe ou não uma viabilidade técnica de remanufatura.

5.1 Resultados do exame visual

Após o processo de desmontagem do injetor, separação do bico e limpeza, foi possível obter um resultado visual da eficiência da linha de limpeza utilizada. A Figura 28 apresenta o antes e depois do processo de limpeza utilizado conforme a Tabela 1.



Fonte: Autoria própria (2023)

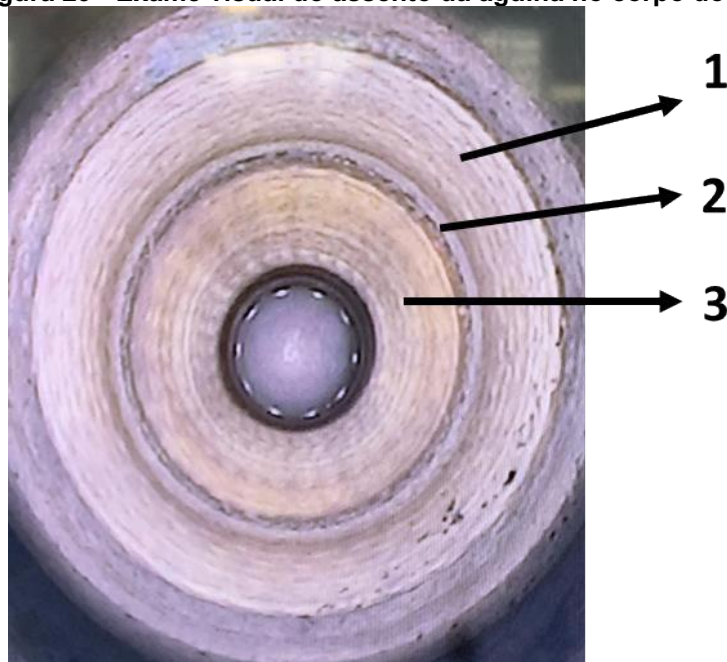
Observa-se que os tempos utilizados para a linha de limpeza, principalmente para o tanque de decapagem alcalina, foram suficientes para realizar a remoção completa da camada carbonizada presente na região superior do bico, entretanto, a cor opaca que permaneceu representa o efeito da decapagem.

Por ser um processo químico forte, superficialmente a peça perde o brilho principalmente das regiões retificadas, porém não representa nenhum problema para o dimensional da peça como informado pelo responsável pelos processos químicos da empresa, isto porque o tempo de exposição é baixo.

Observa-se também para o estado inicial que apenas a região superior do bico (denominada de haste) se encontra carbonizada, enquanto a região inferior (denominada de base) se encontra com a aparência retificada como um bico novo. Isso ocorre por conta do método de montagem do bico no injetor, a qual utiliza uma porca que cobre e protege toda a região da base, enquanto a região da haste fica exposta aos efeitos da combustão no interior do cilindro do motor.

Além do exame visual externo, onde não foi identificado nenhum sinal de danificação, trinca, deformação, oxidação ou qualquer outro sinal crítico de defeito, analisou-se também a região interna do bico referente ao assento da agulha com o auxílio do equipamento boroscópio. No resultado obtido apresentado pela Figura 29 está a demarcação dos pontos que serão discutidos no próximo parágrafo.

Figura 29 - Exame visual do assento da agulha no corpo do bico.



Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se que a região 2 representa uma descontinuação do padrão observado na região 1 e 3, que é característico de um efeito de desgaste causado pelo contato da agulha como era esperado, entretanto, visualmente não é possível de mensurar qual a dimensão desse desgaste e por conta disso as análises posteriores foram realizadas.

De forma geral, não se observa nenhum outro ponto do assento que possa estar relacionado a um efeito de desgaste, os padrões se mantêm ao longo de toda a circunferência, o que indica que a região está uniforme.

A análise dessa região é importante pois representa uma superfície controlada que recebe operações de retífica para garantir a precisão dimensional. O contato da agulha nessa região promove um certo grau de vedação que impede o gotejamento de combustível para dentro da câmara de combustão do motor quando o bico não está injetando combustível, além disso, a vedação também protege o interior do bico contra os resíduos da combustão.

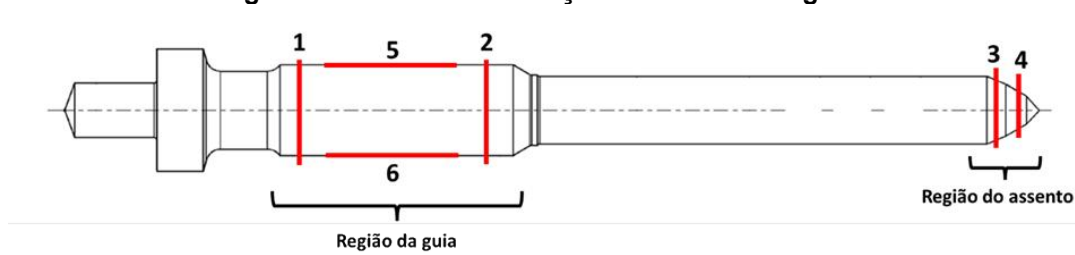
Como não foi encontrado nenhum sinal de danificação extrema no bico, como trincas ou deformações, apenas sinais de desgaste por fadiga decorrentes das cargas cíclicas de contato entre a agulha e o corpo do bico, assumiu-se que este seria uma boa amostra para prosseguir com o restante das análises conforme segunda etapa do fluxograma da Figura 16.

5.2 Resultados da análise de formas

Como primeiro passo do desenvolvimento da segunda etapa, foi realizado a medição das tolerâncias de formas tanto para a agulha quanto para o corpo do bico segundo prescrição técnica de desenho conforme apresenta a Figura 19. Para um melhor entendimento, será discutido nos parágrafos a seguir o significado de cada tolerância medida e os pontos que foram realizados cada medição.

Para as medições da agulha, a Figura 30 apresenta os pontos onde foram coletados os valores das tolerâncias de formas.

Figura 30 - Pontos de medição de formas da agulha



Fonte: Autoria própria (2023)

Nos pontos 1, 2, 3 e 4, foi realizado uma medição em círculo ao longo do diâmetro (circularidade) e nos pontos 5 e 6 foi realizado uma medição em linha reta ao longo da superfície (retitude). Basicamente a circularidade avalia o quão próximo de um círculo perfeito o diâmetro se encontra, e de forma análoga, a retitude avalia o quão próximo a superfície está de uma reta perfeita.

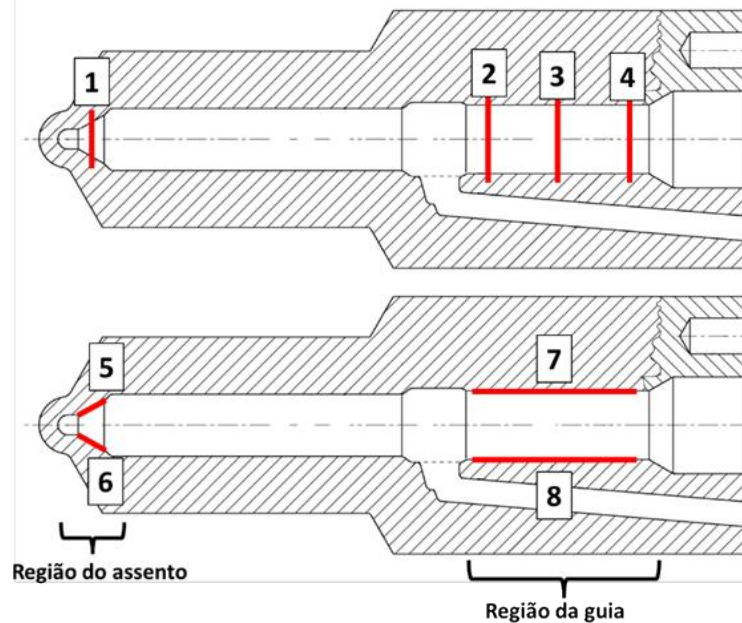
Além disso, também foi avaliado o alinhamento da circularidade dos pontos 3 e 4 em relação à guia, esse parâmetro é chamado de concentricidade e é importante pois avalia o quão deslocado o centro dos círculos da região do assento estão do centro do círculo da região da guia.

Caso a concentricidade, circularidade e retitude dessas regiões estejam fora da tolerância, pode ocorrer uma perda de vedação na região do assento ou um deslocamento errado da agulha, promovendo assim falhas durante o funcionamento do produto e interferindo nos parâmetros de injeção de combustível.

Importante ressaltar que essas medições não estão relacionadas ao tamanho do diâmetro por exemplo, mas sim a sua forma, visto que no universo real de fabricação de componentes, nenhum diâmetro se encontrará com a forma perfeita de um círculo por mais preciso que o equipamento de fabricação seja, logo, a tolerância de fabricação indicará qual o desvio permitido para garantir o funcionamento mesmo que a forma não esteja como perfeita.

Para as medições do corpo do bico, a Figura 31 apresenta os pontos onde foram coletados os valores das tolerâncias de formas.

Figura 31 - Pontos de medição de formas do corpo do bico



Fonte: Autoria própria (2023)

De forma análoga às medições da agulha, nos pontos 1, 2, 3 e 4 foi realizado a medição de circularidade do diâmetro, enquanto nos pontos 5, 6, 7 e 8 foi realizado a medição de retitude da superfície.

Observa-se que na região da guia do corpo foi medido a circularidade em 3 pontos enquanto na guia da agulha foi medido apenas 2 pontos, isso porque a guia do corpo é maior que a guia da agulha, logo a medição de um ponto a mais garante uma maior precisão na análise da forma.

Outra diferença está na região do assento, que para a agulha foi medido a circularidade em 2 pontos enquanto para o corpo em apenas 1 ponto, isso porque a ponta da agulha é formada por 2 ângulos diferentes cuja intersecção entre eles representa a aresta de vedação, enquanto o assento do corpo é formado por 1 ângulo apenas.

Além disso, também foi avaliado a concentricidade da circularidade do assento em relação à guia do corpo. Esse parâmetro também é controlado pois para uma boa vedação, ambas as concentricidades tanto para a agulha quanto para o corpo necessitam estar dentro das tolerâncias especificadas. Isso garante que durante a movimentação da agulha, sua aresta de vedação da ponta esteja sempre alinhada com a circularidade do assento do corpo.

A Tabela 2 a seguir apresenta os resultados obtidos pelas medições de circularidade, retitude e concentricidade para a agulha e o corpo do bico nos pontos

indicados pelas Figuras 30 e 31. Para proteger os direitos autorais da empresa, os valores encontrados estão representados como uma fração da tolerância máxima especificada para cada forma avaliada.

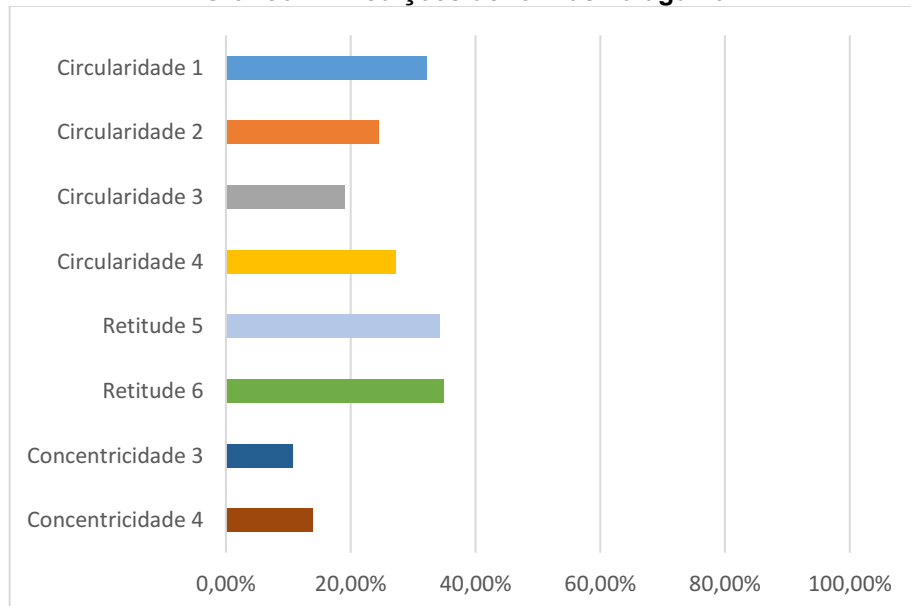
Tabela 2 - Resultado sala de formas

Medições da agulha		Medições do corpo	
Forma avaliada	Fração da tolerância	Forma avaliada	Fração da tolerância
Circularidade 1	32,14%	Circularidade 1	467,50%
Circularidade 2	24,44%	Circularidade 2	26,74%
Circularidade 3	18,96%	Circularidade 3	9,79%
Circularidade 4	27,13%	Circularidade 4	16,98%
Retitude 5	34,23%	Retitude 5	85,48%
Retitude 6	34,87%	Retitude 6	49,23%
Concentricidade 3	10,61%	Retitude 7	68,85%
Concentricidade 4	13,81%	Retitude 8	101,13%
		Concentricidade 1	69,13%

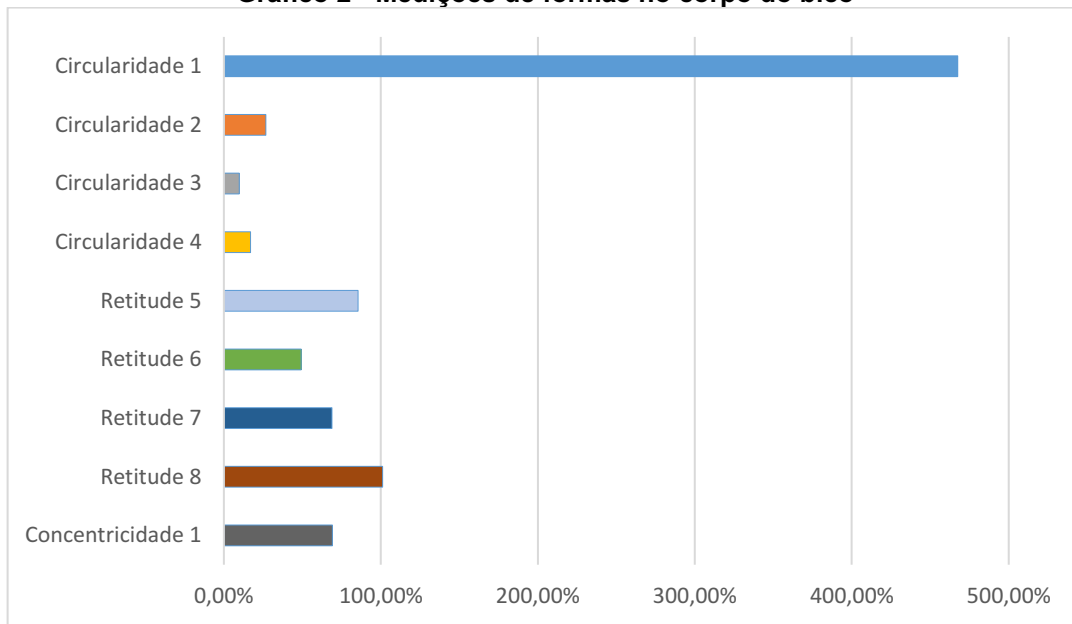
Fonte: Autoria própria (2023)

Para facilitar a visualização dos resultados, os valores mostrados na Tabela 2 foram dispostos em um gráfico de barras. O Gráfico 1 apresenta os resultados das medições de formas para a agulha, enquanto o Gráfico 2 apresenta os resultados de formas para o corpo do bico.

Gráfico 1 - Medições de formas na agulha



Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 2 - Medições de formas no corpo do bico

Fonte: Autoria própria (2023)

A partir dos resultados obtidos observa-se que para a agulha, todas as medidas se mantiveram dentro da tolerância máxima de fabricação para todas as formas avaliadas, além disso, observa-se também que nenhuma medida ultrapassou a marca de 40% da tolerância máxima, o que pode indicar que não houve desgaste significativo das formas avaliadas durante sua vida útil de trabalho.

Uma explicação para esses resultados se dá por conta do material e do tratamento térmico utilizado na fabricação da agulha, que é diferente do utilizado para o corpo do bico. O material da agulha por si só representa um material mais duro e resistente quando comparado ao corpo do bico, além disso, esse componente recebe um tratamento térmico especial que fornece uma camada superficial externa extremamente resistente ao desgaste.

Diferentemente dos resultados obtidos para o corpo do bico, observa-se que algumas medidas se encontram acima da tolerância máxima especificada de fabricação como a circularidade 1 e a retitude 8. Além disso, outras formas avaliadas estão próximas à tolerância máxima de fabricação como é o caso da retitude 5 e a concentricidade 1.

Dentre todos os resultados obtidos, o mais impactante está na circularidade 1 medida na região do assento no corpo do bico, onde o valor mensurado está 4,6 vezes maior do que a tolerância máxima permitida na fabricação do componente.

Entende-se que o principal motivo se dá por conta do contato da agulha nessa região, que por possuir uma dureza maior, ocasiona o desgaste no material do corpo

que possui uma dureza menor. Além disso, a retitude 8 que está acima da tolerância máxima de fabricação também foi medida na região do assento do corpo do bico que teve contato com a agulha.

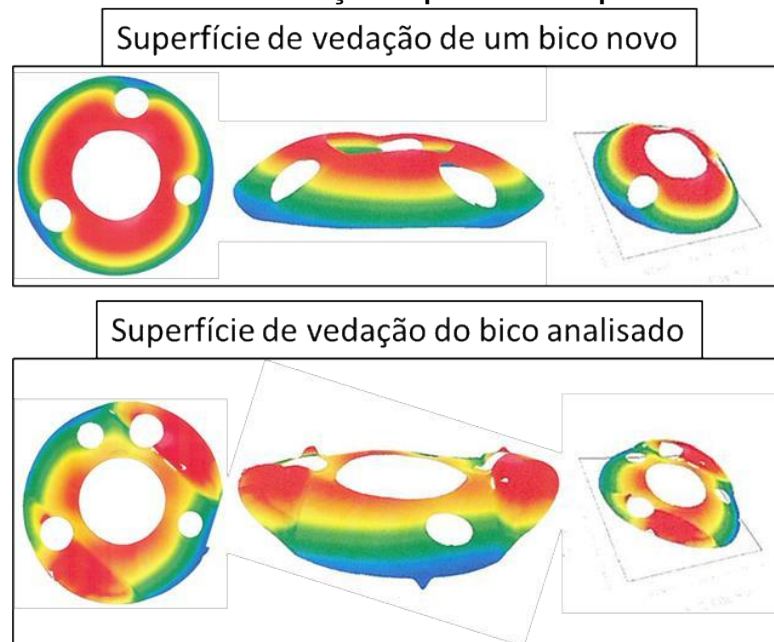
Para um entendimento mais aprofundado do que ocorreu nessa região do assento do corpo do bico, é necessário a realização do corte transversal conforme informado anteriormente, porém, antes da realização desse procedimento, foi realizado a medição da planeza da superfície de vedação do corpo do bico que deve ser priorizada antes do corte transversal.

5.2.1 Resultados do exame de planeza

A planeza dessa região indicada pelo número 1 da Figura 15 é controlada pois garante a vedação do contato entre o bico e o disco intermediário indicado pelo número 5 da Figura 3. Durante a operação do injetor, a pressão máxima pode chegar a 1500 bar, logo, a vedação entre os componentes precisa ser suficiente para evitar vazamentos e perdas no volume de combustível injetado.

Por prescrição técnica de fabricação, a superfície de vedação necessita possuir um perfil convexo e uma planeza indicada pela tolerância máxima permitida. A Figura 32 apresenta a medição do perfil de planeza de um bico injetor novo em comparação ao bico injetor utilizado nas análises.

Figura 32 - Resultado de medição da planeza da superfície de vedação



Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se que o perfil da superfície de vedação do bico analisado se encontra deformado em relação ao bico novo, isso ocorre por conta da pressão de aperto fornecida pela porca do bico, que pressiona o corpo do bico contra o disco intermediário para promover a vedação necessária. A tabela 3 apresenta o resultado obtido para a planeza da superfície de vedação do corpo do bico analisado em fração da tolerância máxima permitida para a fabricação.

Tabela 3 - Medição da planeza da superfície de vedação.

Componente	Fração da tolerância
Bico novo	68,15%
Bico analisado	124,10%

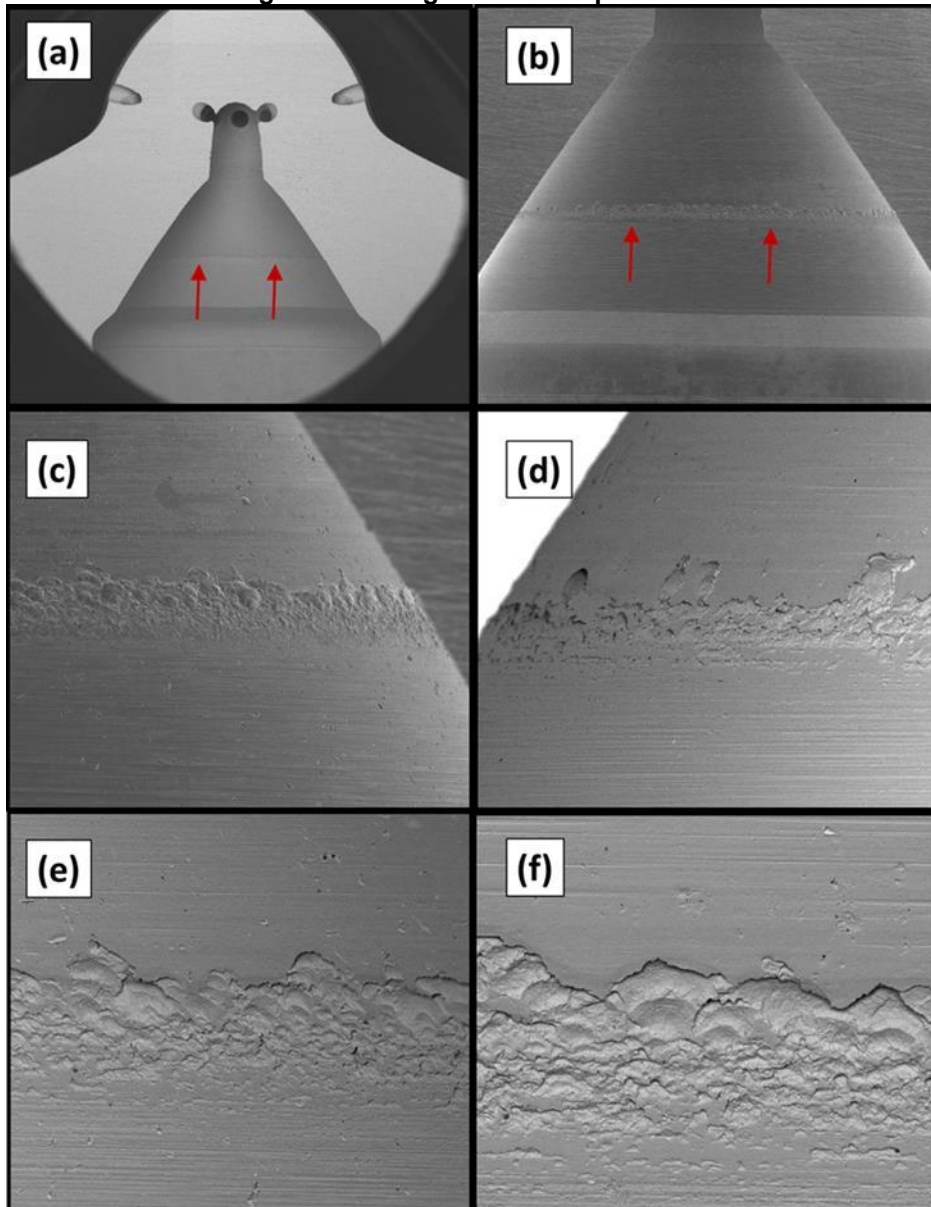
Fonte: Aatoria própria (2023)

Como a superfície possui um padrão convexo, a planeza de um bico novo não se encontra muito próxima ao zero, porém, o valor encontrado para a planeza do bico analisado está acima da tolerância especificada de fabricação, o que indica que esta região deve ser reparada para garantir sua função de vedação conforme capacidade de um componente novo.

5.3 Resultados da análise no MEV

Para prosseguir com as análises descritas, foi realizado o corte transversal no corpo do bico para facilitar o acesso e as medições na região do assento que não são possíveis de realizar com o corpo em seu estado original. Após o corte transversal, a amostra foi encaminhada ao laboratório metalográfico da empresa para visualizar o estado da região do assento através do microscópio eletrônico de varredura (MEV). A Figura 33 apresenta as imagens obtidas nessa análise.

Figura 33 - Imagens obtidas pelo MEV



Fonte: Autoria própria (2023)

As imagens coletadas apresentam diversos níveis de ampliação, a imagem (a) representa 26 vezes de ampliação, a imagem (b) representa 50 vezes, a imagem (c) representa 200 vezes, a imagem (d) representa 400 vezes, a imagem (e) também representa 400 vezes, porém foi coletada na região ao lado da imagem (d), por fim a imagem (f) representa 600 vezes de ampliação.

A partir das imagens extraída pelo MEV, é possível confirmar que existe um desgaste por fadiga significativo na região do assento do corpo do bico causada pelo contato da agulha. Esse resultado condiz com o que foi observado pelo exame visual do assento na Figura 29 e explica também o resultado extremo obtido na circularidade

dessa região, visto que a forma de círculo está totalmente deformada por conta do desgaste.

Como a vedação da agulha ocorre somente pela aresta de vedação formada pela intersecção de dois ângulos, isso explica o motivo de apenas uma pequena área do assento do corpo do bico estar danificada. O contato da agulha com o corpo do bico não ocorre em toda a superfície do assento, mas sim apenas na aresta de vedação. Observa-se também que a região superior e inferior ao desgaste se apresenta intacta com as marcas de usinagem, sinal de que não houve desgaste em toda a superfície do assento, apenas na região de contato com a agulha.

Por conta desse desgaste, entende-se que o potencial de vedação pode estar comprometido, o que pode influenciar no desempenho do sistema de injeção como um todo. Para a reutilização desse componente, seria ideal o reparo dessa região para garantir sua função de vedação conforme um produto novo.

O reparo pode ser realizado por meio de usinagem por retificação cilíndrica nessa região, possibilitando a restauração de toda a face do assento, entretanto, é necessário entender a profundidade desse desgaste para descobrir a quantidade de material que deve ser removido para eliminação total do defeito. Para isso, foi realizado um exame de rugosidade.

5.4 Resultados da análise de rugosidade

O exame de rugosidade permite extrair o perfil exato da superfície e a profundidade do defeito. Como a medição é feita linearmente, o resultado obtido representa um gráfico de altura em função do deslocamento, ou seja, a medida que o corpo de prova do rugosímetro vai percorrendo a região de análise, dados da distribuição de altura da superfície são coletados. A Figura 34 apresenta o gráfico gerado pelo equipamento, os valores reais foram omitidos e serão apresentados como fração da tolerância máxima de fabricação.

Figura 34 - Perfil de rugosidade da região do assento do corpo do bico



Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se que o defeito foi observado no exame de rugosidade, houve uma queda abrupta na altura do corpo de prova ao adentrar a região danificada, além disso, observa-se que essa região apresenta uma descontinuação do padrão observado no restante da medição da superfície.

Além do gráfico do perfil da superfície, o equipamento também fornece os valores de rugosidade encontrados. Entre eles, o parâmetro mais importante que deve ser analisado é a rugosidade máxima (denominada de R_{max}), que representa a diferença de altura entre o maior pico e o menor vale encontrado ao longo da medição. Além disso, esse parâmetro indica a profundidade do desgaste e conseqüentemente a quantidade de material que deve ser removida para eliminação completa do defeito.

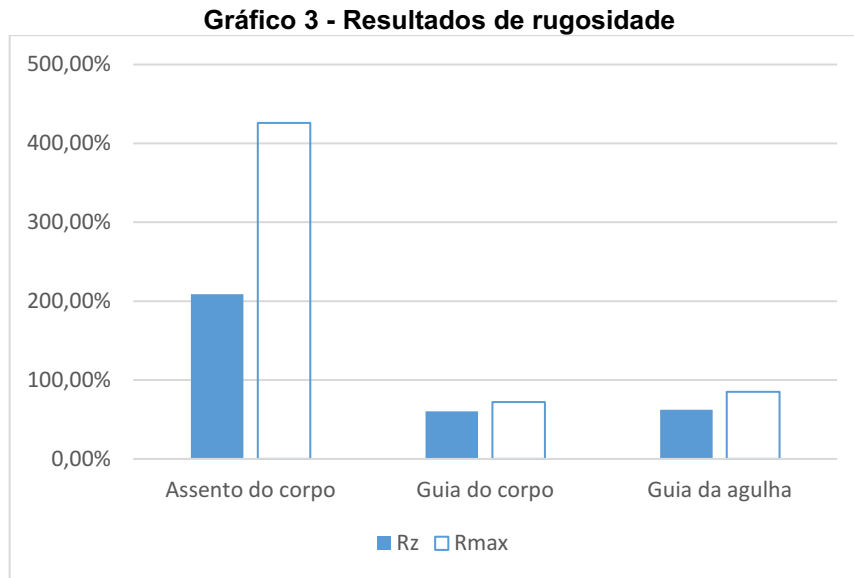
Por prescrição de fabricação, esse parâmetro deve ser controlado e não pode ultrapassar uma certa tolerância para indicar que a superfície seja uniforme. Além da região do assento, a região da guia também possui esse controle de rugosidade. A Tabela 4 apresenta os valores de R_z e R_{max} obtidos para a região do assento do corpo do bico e para a região da guia do corpo do bico e da agulha em fração da tolerância máxima permitida.

Tabela 4 – Resultados da medição de rugosidade	
Rugosidade avaliada	Fração da tolerância
R_z do assento do corpo	208,67%
R_{max} do assento do corpo	426,00%
R_z da guia do corpo	60,50%
R_{max} da guia do corpo	72,25%
R_z da guia da agulha	62,22%
R_{max} da guia da agulha	85,00%

Fonte: Autoria própria (2023)

Para facilitar a visualização dos resultados, os valores apresentados pela Tabela 4 foram dispostos em um gráfico de barras apresentado pelo Gráfico 3. Os

resultados estão divididos por região analisada e está apresentado os valores de R_z e R_{max} para cada região.



Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se a partir dos resultados que para a região da guia, os valores encontrados estão dentro da tolerância máxima permitida, o que pode indicar que essa região não sofreu desgaste significativo durante sua vida útil de trabalho. Uma explicação para isso se dá por conta que a região da guia recebe um movimento de deslizamento entre a agulha e o corpo do bico, o que auxilia a superfície a manter seus valores de rugosidade e permanecer uniforme.

Diferentemente para a região do assento, esta sofre um movimento de impacto da agulha para cada ciclo de injeção, o que explica a danificação encontrada e a profundidade do desgaste. Sendo assim, conclui-se que para o reparo completo dessa região, é necessário a remoção de material em quantidade igual ou superior à profundidade do desgaste encontrada, mas para isso, deve-se entender a profundidade da camada de dureza.

5.5 Resultados da análise de dureza

Conforme mencionado anteriormente, esses componentes sofrem um processo de tratamento térmico que endurece apenas a superfície externa do material, o qual possui um gradiente de decaimento de dureza conforme se afasta da superfície externa e se aproxima à região do núcleo onde se encontra a menor dureza.

Isso significa que ao remover material da superfície, a dureza superficial diminui, e conseqüentemente, a superfície se torna menos resistente ao desgaste.

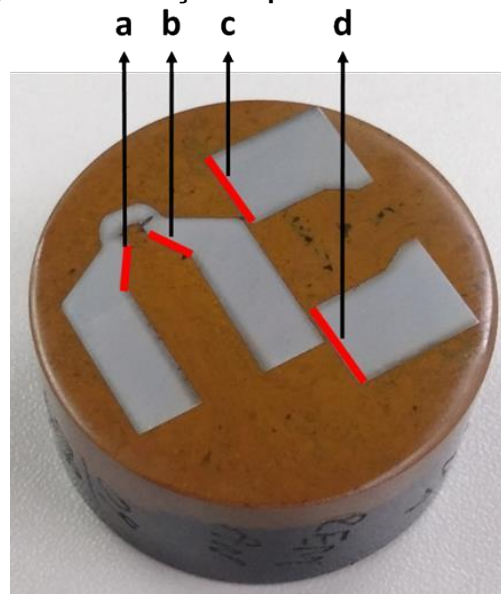
Caso a dureza superficial fique abaixo da tolerância especificada, irá ocorrer um desgaste acelerado no componente, reduzindo sua vida útil, impactando os parâmetros de injeção e emissão de poluentes, além da possibilidade de ocorrer uma falha por fadiga decorrente da propagação de trincas internas durante seu funcionamento.

Para entender se é possível a remoção de material de acordo com a profundidade do desgaste encontrado sem comprometer a tolerância de dureza superficial, é necessário a avaliação da profundidade da camada de dureza.

Geralmente os componentes são fabricados com uma sobrecarga no tratamento térmico, ou seja, para não deixar a dureza superficial muito próxima à tolerância mínima e correr o risco de alguma amostra sair fora da tolerância, os componentes são fabricados com uma dureza superficial acima do especificado, o que significa que existe uma certa faixa de material que pode ser removido sem comprometer a especificação da tolerância de dureza superficial.

A partir dos resultados obtidos, observa-se que duas regiões do corpo do bico necessitam de reparo, entre elas a região do assento e a superfície de vedação, logo, a camada de dureza foi avaliada para essas duas regiões conforme indicado na Figura 35 a partir do corpo de prova produzido.

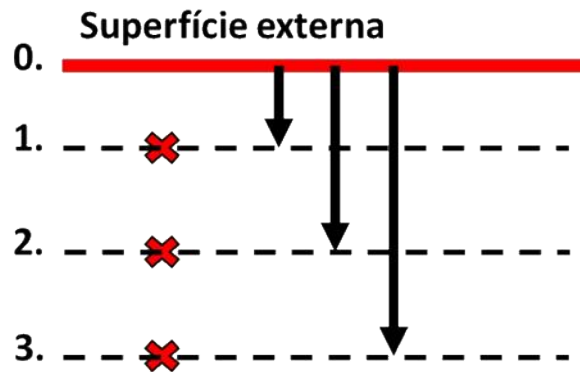
Figura 35 - Regiões de avaliação da profundidade da camada de dureza



Fonte: Autoria própria (2023)

Os pontos indicados pelas letras “a” e “b” representam a região do assento, enquanto os pontos indicados pelas letras “c” e “d” representam a superfície de vedação, respectivamente. Para essas 4 regiões foi avaliado a profundidade da camada a partir da medição de dureza em 3 pontos conforme apresenta Figura 36.

Figura 36 - Pontos de medição para avaliar a camada de dureza



Fonte: Autoria própria (2023)

A reta indicada pelo ponto 0 na Figura 36 representa as mesmas retas em vermelho da Figura 35, ou seja, esse procedimento foi realizado para cada região “a”, “b”, “c” e “d”. O “x” em vermelho na Figura 36 indica o ponto onde a dureza foi coletada, de forma que o ponto 1 se encontra a 0,1mm da superfície externa, o ponto 2 se encontra a 0,2mm e o ponto 3 se encontra a 0,3mm, perpendicularmente.

A partir dos valores de dureza coletados nesses pontos, é possível entender qual a taxa de decaimento de dureza o material possui, e com isso, a partir de uma interpolação simples, descobrir em qual distância da superfície externa se encontra a dureza mínima especificada conforme tolerância de fabricação.

Resumidamente, caso a dureza encontrada no ponto 1 seja maior do que a tolerância de fabricação, entende-se que ao retirar 0,1mm de material dessa região, a dureza superficial ainda estará acima da tolerância, logo, não haverá comprometimento da superfície com o desgaste acelerado conforme comentado. A partir desse resultado será possível avaliar se a eliminação do desgaste por meio de retífica na região do assento pode ser realizada sem interferência nos parâmetros de tolerância da dureza superficial.

A Tabela 5 apresenta os valores de dureza coletados em cada ponto para todas as regiões “a”, “b”, “c” e “d” em forma de fração da tolerância de dureza superficial especificada para a fabricação.

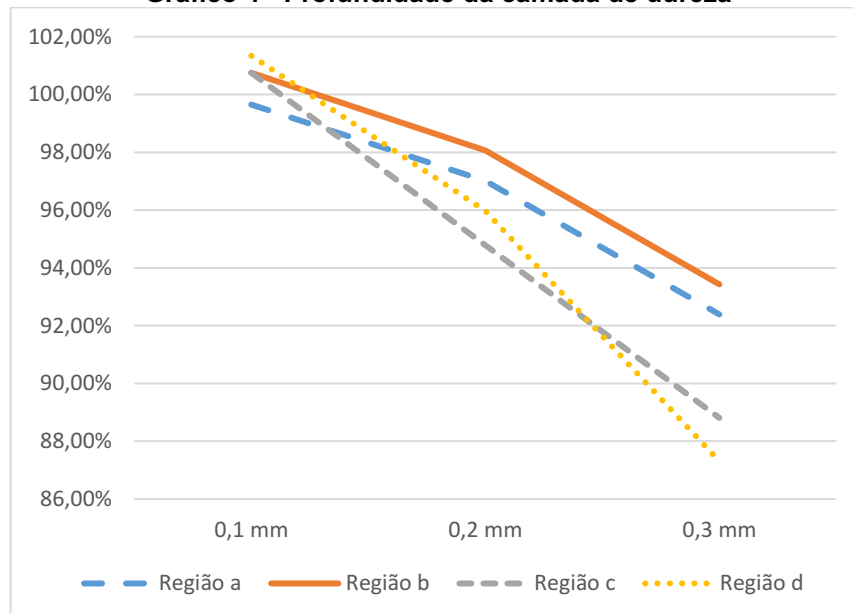
Tabela 5 - Resultados das medições para avaliar a camada de dureza

Superfície avaliada	Ponto 1 (0,1mm)	Ponto 2 (0,2mm)	Ponto 3 (0,3mm)
Região "a"	99,55%	97,01%	92,39%
Região "b"	100,75%	98,06%	93,43%
Região "c"	100,75%	94,78%	88,81%
Região "d"	101,34%	95,97%	87,31%

Fonte: Autoria própria (2023)

Para facilitar a visualização dos resultados da profundidade da camada de dureza, os valores apresentados pela Tabela 5 foram dispostos em um gráfico de linha apresentado pelo Gráfico 4. É possível de observar o decaimento que acontece a medida que o ponto de coleta da dureza se afasta da superfície externa na peça.

Além disso, é possível observar também que o decaimento para as regiões "a" e "b" acontece a uma taxa mais lenta do que o decaimento apresentado nas regiões "c" e "d". Entretanto, observa-se que todas as regiões estão muito próximas a especificação de tolerância superficial na camada de 0,1 mm. Ou seja, pela tendência do gráfico, é possível concluir que a dureza superficial está acima do especificado e o bico se encontra sobre dimensionado.

Gráfico 4 - Profundidade da camada de dureza

Fonte: Autoria própria (2023)

Além disso, para confirmar o valor da dureza superficial, foi realizado a medição conforme apresenta a Figura 27, visto que não é possível medir esse valor na região do assento por se tratar de uma superfície curva, que por dificultar o

polimento da região, os valores podem se apresentar alterados. Foi coletado também a dureza da região do núcleo do material apenas para comparação, visto que não existe nenhuma prescrição técnica que controla a dureza nessa região.

A Tabela 6 apresenta o valor de dureza superficial coletado em dois pontos aleatórios na região da superfície de vedação indicada pela Figura 27, e o valor da dureza do núcleo do material coletado a uma distância suficientemente longe da superfície externa. Os valores estão apresentados como fração da tolerância de dureza superficial especificada para a fabricação.

Tabela 6 - Resultado da dureza superficial e dureza do núcleo

Região coletada	Fração da tolerância
Superficial 1	103,43%
Superficial 2	105,07%
Núcleo	64,48%

Fonte: Autoria própria (2023)

A partir dos resultados de dureza, observa-se que a dureza superficial da amostra está realmente acima da tolerância especificada, logo, é possível a remoção de material sem comprometer a tolerância de dureza superficial especificada de fabricação. Além disso, observa-se que a dureza do núcleo do material se encontra aproximadamente 65% em relação à dureza da superfície externa, ou em outras palavras, 35% menor.

Os resultados da camada de dureza indicam que na distância de 0,1mm da superfície externa, aproximadamente, se encontra o valor da tolerância de dureza superficial, ou seja, isso representa que o limite de material que poderia ser removido sem afetar a tolerância de dureza está na ordem de 1 décimo de milímetro.

Esse resultado juntamente com o resultado de R_{max} obtido no exame de rugosidade indicarão se será possível a realização do reparo nessa amostra de bico injetor. Caso o valor de R_{max} seja superior à 0,1mm, então conclui-se que não é possível eliminar o defeito na região do assento sem afetar a tolerância de dureza superficial.

De forma análoga, a região da superfície de vedação também possui um limite de 0,1mm de material para ser removido na realização do reparo do perfil convexo indicado pela Figura 32, sem afetar a tolerância de dureza superficial especificada.

Entretanto, entende-se que um bico injetor com uma dureza superficial abaixo da tolerância pode ainda ser funcional, porém, estudos mais aprofundados devem ser realizados para entender o real efeito disso no desgaste ao longo da vida útil.

Como próximos passos de um trabalho futuro, aconselha-se a aumentar o tamanho da amostra de bicos avaliados para observar a repetição dos resultados. Além disso, testes adicionais de função como fluxo hidráulico e potencial de vedação também devem ser realizados para um entendimento mais aprofundado do estado funcional do bico injetor.

Para avaliação de uma nova vida útil, deve ser realizado estudos adicionais como teste de durabilidade, que consiste em reproduzir em bancada o funcionamento do bico injetor reparado durante um período de tempo determinado, a fim de observar a propagação do desgaste ao longo do tempo.

Com os resultados observados a partir do teste de durabilidade, torna-se possível a realização de uma simulação numérica computacional para verificar qual o limite de tempo de funcionamento um bico injetor reparado consegue suportar. Além disso, é possível também a comparação com os mesmos resultados de um bico injetor novo para entender qual a velocidade da propagação do desgaste em uma superfície com menor dureza superficial.

Por fim, entende-se que os resultados obtidos foram positivos e serviram para aprendizado, sendo este o intuito real da pesquisa.

6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, é possível concluir que o bico injetor analisado possui um potencial de remanufatura, além disso, as regiões desgastadas pela utilização durante sua vida útil se mostraram aparentes, sendo possível de identificar quais regiões o desgaste se mostrou mais intenso e quais regiões se mostraram intactas.

De forma geral, a região do assento onde sofre o contato com a agulha estava mais danificada, contendo alguns parâmetros fora da tolerância de fabricação. A região da superfície de vedação também se mostrou deformada e fora da especificação técnica de planeza. Ambas as regiões danificadas são críticas para o funcionamento correto do bico injetor e entende-se que as mesmas devem ser reparadas para garantir uma confiabilidade durante sua operação.

Entretanto, a região da guia se mostrou intacta ao desgaste com os parâmetros analisados dentro das tolerâncias de formas e rugosidade. Esse resultado é positivo para o viés de remanufatura visto que o reparo dessa região seria complexo principalmente por conta da folga existente entre o corpo do bico e a agulha. Como essa folga é precisamente controlada, qualquer reparo nessa região ocasionaria na perda do conjunto, sendo necessário a fabricação de um novo corpo ou uma nova agulha que atendesse a nova especificação de folga.

Sendo assim, conclui-se que o corpo do bico sofre o maior nível de desgaste durante sua utilização, o qual deve ser avaliado métodos para reparo e validações de uma nova vida útil. Além disso, conforme comentado, teste adicionais devem ser realizados para um entendimento mais aprofundado da funcionalidade e resistência de um bico injetor remanufaturado.

Como próximo trabalho futuro, entende-se a necessidade de aumentar o tamanho da amostra analisada para verificar se os resultados se mantêm, além disso, realizar a verificação da eficiência de um reparo por retificação cilíndrica na região do assento no corpo do bico. Para isso, torna-se necessário também a realização de testes funcionais no bico injetor reparado como avaliação da pressão de abertura e o fluxo hidráulico, a fim de verificar se é possível manter as características funcionais após um processo de reparo. Em seguida, torna-se interessante a realização de um teste de durabilidade conforme comentado para verificar a propagação do desgaste

por fadiga em uma superfície reparada e com uma dureza superficial menor do que a utilizada para um bico injetor novo.

De forma geral, o trabalho desenvolveu-se de forma produtiva, houve interação entre diferentes áreas da empresa que permitiram o acúmulo de conhecimento e agregação de valor durante seu desenvolvimento. Por se tratar de um tema pouco estudado, foi possível criar uma metodologia explicativa e eficiente para análise de alguns parâmetros de desgaste importantes para a avaliação de remanufatura do bico injetor, permitindo assim sua reprodução e continuação para trabalhos futuros relacionados ao tema.

REFERÊNCIAS

- BOSCH, R. Diesel Fuel-Injection Systems Unit Injector System and Unit Pump System. 2007.
- BRAVO, L.; KWEON, C. A review on liquid spray models for deisel engine computational analysis. 2014.
- CIRCLE ECONOMY. What is the circular economy. Disponível em: <http://www.circle-economy.com/circular-economy/what-is-the-circular-economy>. Acesso em: 21 mai. 2023.
- CRISTOFARO, M.; *et al.* A numerical study on the effect of cavitation erosion in a diesel injector. **Applied Mathematical Modelling**, v.78, p. 200-216, 2020.
- DE GIORGI, M. G.; *et al.* Evaluating cavitation regimes in an internal orifice at different temperatures using frequency analysis and visualization. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 39, p. 160-172, 2013.
- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. What is circular economy. Disponível em: <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>. Acesso em: 21 mai. 2023.
- HE, Z.; *et al.* Assessment of turbulence and cavitation models in prediction of vortex induced cavitating flow in fuel injector nozzles. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 157, p. 104251, 2022.
- DÍAZ, J. P.; *et al.* Remanufacturing in Developing Countries-A Case Study in Automotive Sector in Ecuador. **Procedia CIRP**, v 116, p. 534-539, 2023.
- KHOSHNAW, F.; GUBNER, R. **Corrosion Atlas cas Studies: 2021 Edition**. Elsevier, 2021.
- LIU, H.; *et al.* Investigation on the potential of high efficiency for internal combustion engines. **Energies**, v. 11, n. 3, p. 513, 2018.
- OMEGA ENERGIA. O que é ESG. Disponível em: <http://www.omegaenergia.com.br/news/o-que-e-esg-environmental-social-governance>. Acesso em: 30 jan. 2023.
- PARKER, D. *et al.* Remanufacturing market study. 2015.
- PENG, S.; *et al.* Environmental benefits of remanufacturing mechanical products: a harmonized meta-analysis of comparative life cycle assessment studies. **Journal of Environmental Management**, v. 306, p.114479, 2022.
- ROBERT BOSCH LTDA. A Bosch é carbono neutro. Disponível em: <http://www.bosch.com.br/noticias-e-historias/sustentabilidade/carbono-neutro>. Acesso em: 21 mai. 2023.
- SAKAR, P.; *et al.* Numerical investigation of the dynamics of pressure loading on a solid boundary from a collapsing cavitation bubble. Em: **10th International Symposium on Cavitation-CAV2018**. 2018.

SUPPES, G. J.; STORVICK, T. S. **Sustainable Power Technologies and Infrastructure: Energy Sustainability and Prosperity in a Time of Climate Change**. Academic Press, 2015.

SUTHERLAND, J. W.; *et al.* A comparison of manufacturing and remanufacturing energy intensities with application to diesel engine production. **CIRP annals**, v. 57, n. 1, p. 5-8, 2008.

ZHAO, J.; *et al.* Numerical research on characteristics of fuel heating and subcooling in the nozzle hole of common rail injector. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 200, p.123508, 2023.