



Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

SAMUEL NUNES GOMES

**ESTUDO DA FABRICAÇÃO DE PLACA INDUZIDA ACIONADA POR BOBINA
ELETROMAGNÉTICA**

Belo Horizonte

ABRIL de 2024

Samuel Nunes Gomes

**ESTUDO DA FABRICAÇÃO DE PLACA INDUZIDA ACIONADO POR BOBINA
ELETROMAGNÉTICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Neves

A FICHA CARTOGRAFICA DEVE SER COLADA NA PARTE TRASEIRA DA
FOLHA DE ROSTO

Biblioteca:

FOLHA DE APROVAÇÃO: SOLICITAR NA COORDENAÇÃO DO PROGRAMA

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida e do conhecimento, por ter me dado coragem de ingressar no curso de mestrado, por ter provido as circunstâncias e as pessoas necessárias para que este sonho fosse possível. Todos os pensamentos inteligíveis provêm daquele que me criou, grande é o Senhor e as obras que Ele faz.

Ao Prof. Dr. Leonardo Neves que contribuiu de forma significativa na realização deste estudo, com orientações precisas e necessárias, mostrando o caminho a ser percorrido. Aos membros da banca, pelas contribuições para o aprimoramento desse estudo.

Aos meus amados pais, Henriqueta Nunes e Amos Pereira, por todo amor, carinho, dedicação e por serem exemplos de sacrifício e determinação. Por tudo que fizeram e fazem por mim e pelas minhas irmãs Débora e Rebeqa, não existem palavras para descrever todo amor e gratidão a vocês. A minha amada esposa Daniele da Cunha Nunes, pelo amor, amizade, compreensão, carinho e parceria. Por me incentivar a ser melhor todos os dias, por me dar forças e acreditar em mim.

Aos professores e funcionários do CEFET-MG, especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais pela maturidade do curso, especialmente nos tempos de pandemia. A todos que, de alguma forma, contribuíram para a formação da pessoa que me tornei e para a realização deste trabalho. Muito obrigado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Se quer viver uma vida feliz, amarre-se em uma meta, não às pessoas nem às coisas.”

Albert Einstein

RESUMO

No presente estudo, foi realizado o desenvolvimento uma placa induzida por meio do processo de sinterização visando a substituição da placa original nas bombas unitárias. Para avaliar a confiabilidade da placa sinterizada foi conduzido análises comparativas com diversas propriedades da placa original e da placa disponível no mercado paralelo. Essas análises incluíram testes de análise química, dureza superficial, resistência à corrosão e abrasão, bem como o teste funcional de volume de óleo em bancada e consumo de corrente elétrica. Os resultados revelaram notáveis semelhanças entre a placa produzida pelo processo de sinterização e a placa original. Em contraste, a placa disponível no mercado paralelo apresentou resultados discrepantes, sugerindo que seu uso pode comprometer a performance da bomba unitária e reduzir sua durabilidade. Este estudo destacou a viabilidade e a eficácia da placa sinterizada como uma alternativa confiável para substituir a placa original.

Palavras-chave: Análises comparativas, Placa induzida, Sinterização.

ABSTRACT

In this study, a sintered plate was developed to replace the original plate in unit pumps. To assess the reliability of the sintered plate, comparative analyses were carried out on various properties of the original plate and the plate available on the parallel market. Chemical analysis, surface hardness, corrosion and abrasion resistance tests were carried out, as well as functional tests on oil volume and current consumption. The results revealed remarkable similarities between the plate produced by the sintering process and the original plate. In contrast, the plate available on the parallel market showed discrepant results, suggesting that its use may compromise the performance of the unit pump and reduce its durability. This study highlighted the viability and effectiveness of the sintered plate as a reliable alternative to replace the original plate.

Keywords: Comparative analysis, Induced plate, Sintering.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Macro partes do motor diesel.....	16
Figura 2 - Motor em corte.....	18
Figura 3 - Tempos de funcionamento do motor.....	19
Figura 4 - Coordenação dos êmbolos.....	19
Figura 5 - Sistemas do motor diesel.....	20
Figura 6 - Sistema de alimentação de combustível.....	21
Figura 7 - Conjunto bomba unitária, tubo e bico injetor.....	22
Figura 8 - Bico injetor mecânico.....	23
Figura 9 - Curso de admissão.....	23
Figura 10 - Curso prévio.....	24
Figura 11 - Curso de alimentação.....	24
Figura 12 - Curso residual.....	25
Figura 13 - Bomba unitária – esquema.....	26
Figura 14 - Bomba unitária - detalhe.....	26
Figura 15 - Placa de atracamento e demais itens.....	27
Figura 16 - Placa de atracamento e válvula de controle.....	27
Figura 17 - Montagem da placa na bobina eletromagnética.....	28
Figura 18 - Montagem da placa na carcaça.....	28
Figura 19 - Placa induzida.....	29
Figura 20 - Esquema de corrosão eletroquímica.....	33
Figura 21 - Solenoide.....	34
Figura 22 - Bancada de teste.....	35
Figura 23 - Dispositivo cambox.....	36
Figura 24 - Aproveitamento da matéria prima - sinterização.....	37
Figura 25 - Processo de fabricação – Metalurgia do pó.....	38
Figura 26 - Relação entre fabricação e preço – pós para sinterização.....	41
Figura 27 - Formato dos pós para sinterização.....	42
Figura 28 - Compactado a verde.....	43
Figura 29 - Formação de pescoço na sinterização.....	44
Figura 30 - Usinagem de peça sinterizada.....	49
Figura 31 - Rebolo para retífica.....	50

Figura 32 - Equipamento para ensaio de abrasão.....	53
Figura 33 - Gotejamento na esfera rotativa.....	53
Figura 34 - Calota ampliada 25 vezes.....	54
Figura 35 - Equipamento para técnica eletroquímica de polarização.....	55
Figura 36 - Amostra no processo de corrosão.....	56
Figura 37 - Amostras embutidas.....	56
Figura 38 - Curva de <i>Tafel</i>	57
Figura 39 - Fonte de corrente elétrica.....	58
Figura 40 - Bancada de teste.....	59
Figura 41 - Bomba unitária instalada em bancada.....	60
Figura 42 - Proveta graduada.....	61
Figura 43 - Resultado do teste de volume de óleo em ml.....	64
Figura 44 - Placa induzida após teste de abrasão.....	66

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Temperatura e tempo para alguns materiais.....	45
Tabela 2 - Fatores de sinterização.....	46
Tabela 3 - Coeficiente de difusão para alguns materiais.....	47
Tabela 4 - Parâmetros do ensaio de micro abrasão.....	54
Tabela 5 - Parâmetros do ensaio de corrosão para as placas.....	57
Tabela 6 - Análises químicas das placas induzidas.....	62
Tabela 7 - Indução corrente elétrica.....	63
Tabela 8 - Durezas superficiais – Unidade de medida HB.....	65
Tabela 9 - Abrasão – Perda de massa após ensaio.....	66
Tabela 10 - Abrasão – Diâmetro das calotas.....	67
Tabela 11 - Taxa de corrosão.....	68

LISTA DE ABREVIações

CBN – Nitrito Cúbico de Boro

ECU - *Engine Control Unit* (Unidade de Comando do Motor);

OCP - *Open Circuit Potential* (Potencial de Circuito Aberto);

PDP - *Potentiodynamic Polarization* (Polarização Potenciodinâmica);

UPS - *Unit Pump System* (Sistema de Bomba Unitária).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVO GERAL.....	16
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	Macro partes do motor de combustão interna diesel.....	17
3.2	Funcionalidade do motor de combustão interna diesel	18
3.3	Tempos de funcionamento e coordenação dos êmbolos	19
3.4	Sistemas do motor.....	21
3.5	Sistema de alimentação de combustível	21
3.6	Bomba unitária e bico injetor	22
3.7	Funcionamento da bomba unitária	24
3.8	Bomba unitária – Detalhe dos componentes.....	26
3.9	Placa de atracamento.....	29
3.10	Ensaio de composição química e dureza mecânica superficial	30
3.11	Material da placa de atracamento	31
3.12	Caracterização abrasiva.....	32
3.13	Caracterização corrosiva usando a técnica eletroquímica de polarização ...	33
3.14	Consumo de corrente elétrica	35
3.15	Teste funcional em bancada de prova	36
3.16	Metalurgia do pó	37
3.17	Caracterização dos pós.....	40
3.18	Processo de Sinterização.....	44
3.19	Usinagem	49
3.20	Usinagem da placa fabricada por sinterização.....	51
4	MATERIAIS E MÉTODOS	52
4.1	Método de sinterização	52
4.2	Ensaio de análise química e ensaio de dureza	52
4.3	Ensaio de abrasão.....	53
4.4	Ensaio de corrosão.....	56
4.5	Teste de atracamento.....	59
4.6	Teste funcional em bancada de prova.....	60

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
6	CONCLUSÕES.....	71
7	RELEVANCIA DOS RESULTADOS	73
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	74
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	75

1 INTRODUÇÃO

As bombas unitárias a óleo diesel desempenham um papel crucial em uma variedade de sistemas de motores, desde veículos de transporte de pessoas e bens até sistemas energéticos. Seu funcionamento depende da queima precisa de combustível fóssil, o óleo diesel, que é injetado com precisão através da bomba unitária, passando pelos bicos injetores e chegando na câmara de combustão do motor. A eficiência desse processo é influenciada pela placa induzida magnética da bomba unitária, que, quando acionada, permite a passagem do combustível. Este estudo se concentra na fabricação e análise comparativa das características da placa induzida para garantir um funcionamento eficiente.

Para fabricar estas placas de aço silício com a espessura correta e composição química semelhante à placa original, foi empregado o método de sinterização, também conhecido como metalurgia do pó. Essa técnica é uma alternativa valiosa no processamento de materiais semiacabados e encontra aplicação na fabricação de diversos produtos, como ferramentas, filtros e chapas. Um estudo realizado e publicado por Jesus Filho et al. (2005) sobre materiais sinterizados na fabricação de insertos para motores a combustão interna, mostrou melhorias significativas na composição química, resultando em um material mais leve e resistente, aprovado pela montadora. Boehs (2000) também destacou os benefícios do aço T15 sinterizado em ferramentas de torneamento, evidenciando um aumento na velocidade e profundidade de corte. A placa induzida, fabricada em aço silício, das bombas unitárias sofre desgaste durante a operação, tornando sua substituição um desafio para os operadores responsáveis pela manutenção. Não foram encontrados estudos científicos realizados que abordassem a produção de placas induzidas pelo método de sinterização.

O estudo então, visou comparar o desempenho da placa recém-fabricada com as placas disponíveis no mercado paralelo, além da placa original utilizada nas bombas unitárias. Para isso foram realizados ensaios de composição química, abrasão, corrosão e dureza mecânica, além de análises prévias de controle, incluindo consumo de corrente elétrica para atrair a placa induzida e testes funcionais em bancada, que avaliam o volume de óleo injetado pela bomba unitária. Após os ensaios, foi observado que a placa fabricada apresentou resultados superiores em comparação com a placa de mercado e desempenho

ligeiramente inferior à placa original em termos gerais. Apesar das diferenças, a placa fabricada foi considerada apta para aplicação nas bombas unitárias, representando uma alternativa viável e eficiente.

2 OBJETIVO GERAL

O objetivo desta pesquisa foi estudar a viabilidade da fabricação da placa induzida aplicada na bomba unitária diesel. Esta placa é fabricada em aço silício e recebe esforço mecânico quando acionada pela bobina eletromagnética. Durante o estudo da fabricação é imprescindível observar a composição química, dureza mecânica, resistência ao desgaste e resistência a corrosão a fim de garantir desempenho e durabilidade adequados.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- Fabricar placas induzidas de aço silício pelo método de sinterização, realizando testes comparativos com a placa original e de mercado;
- Analisar o material de cada placa através de ensaios químico, dureza mecânica superficial, desgaste abrasivo e taxa de corrosão;
- Realizar teste funcional de dosagem de óleo em bancada, com uma bomba unitária padrão, onde será coletado o resultado da bomba aplicando uma placa de cada vez.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

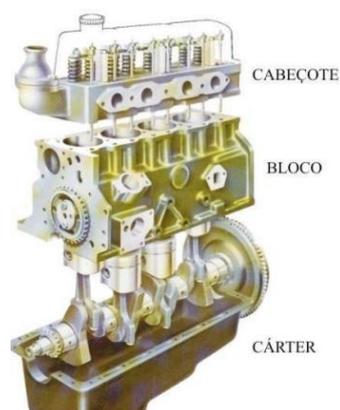
Os motores de combustão interna têm como finalidade converter energia térmica, gerada pela combustão, em energia mecânica utilizável. Após a compressão do oxigênio e a pulverização do óleo diesel pelo bico injetor, ocorre a queima dos gases na câmara de combustão, liberando uma força contra a cabeça do cilindro. Este é então impulsionado na direção do virabrequim. A biela, como elemento de ligação entre o pistão e o virabrequim, transmite a força resultante da expansão dos gases para o colo do virabrequim, induzindo sua rotação. No que diz respeito à bomba unitária de combustível, Brunetti (2010) enfatiza que os componentes, como a câmara de pressão, descarga de combustível, válvula de controle de vazão e eletroímã de acionamento, desempenham um papel crucial ao aumentar a pressão e controlar o volume de injeção do diesel. Este processo é essencial para otimizar o desempenho e eficiência do motor de combustão interna.

A placa induzida fica localizada no interior da bomba unitária, sendo magnetizada pelo eletroímã, interferindo diretamente no volume de injeção de combustível (BARBOSA RODRÍGUEZ, 2017). Desta forma é prudente entender de forma mais detalhada o funcionamento do motor, do sistema de alimentação de combustível, da bomba unitária e da placa induzida.

3.1 Macro partes do motor de combustão interna diesel

O motor de combustão interna diesel é constituído de três partes principais, sendo eles cabeçote, bloco e cárter. A Figura 1 mostra a divisão em partes do motor.

Figura 1 – Macro partes do motor diesel



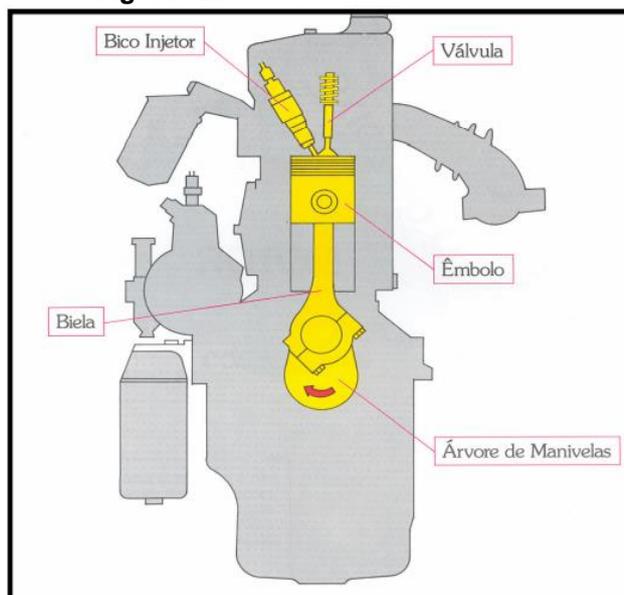
Fonte: Varella e Santos, 2010.

Varella e Santos (2010) explicam que a estrutura superior do motor abriga o cabeçote. Em motores de maior porte, como os utilizados em ônibus rodoviários e caminhões, os cabeçotes são comumente confeccionados em ferro fundido, enquanto em aplicações que demandam leveza, opta-se pelo alumínio. Atualmente, a maioria dos cabeçotes está equipada com válvulas, as quais desempenham um papel crucial no controle do fluxo de ar e na expulsão dos gases do cilindro. Durante o processo, os gases de admissão atravessam a válvula, elevando sua temperatura para valores entre 250°C e 300°C. Já a válvula de descarga opera em condições mais extremas, suportando temperaturas entre 700°C e 750°C. Taylor (1988) ressalta que a capacidade de escoamento da válvula de descarga pode ser inferior à da válvula de admissão, sugerindo um diâmetro para a válvula de descarga entre 83% e 87% do diâmetro da válvula de admissão.

O bloco, localizado entre o cabeçote e o cárter, constitui a parte central do motor. Em motores de maior porte, é comum que o bloco seja confeccionado em ferro fundido. Caso seja necessário reforçar a resistência do bloco, pode-se recorrer à utilização de ligas metálicas em sua fabricação. Por fim na parte inferior do motor está situado o cárter, que funciona essencialmente como o reservatório de óleo lubrificante, abrigando também a bomba de óleo.

3.2 Funcionalidade do motor de combustão interna diesel

Após abordar o cabeçote, bloco e cárter (macro partes) do motor diesel, é essencial compreender seu funcionamento integrado. O motor de combustão interna é uma máquina projetada para converter energia térmica em energia mecânica. Esse processo ocorre por meio da queima do combustível, neste caso diesel, dentro da câmara de combustão, impulsionando suas partes móveis. A placa induzida, localizada na bomba unitária, desempenha um papel crucial na regulação da dosagem de combustível no cilindro do motor. A Figura 02 oferece uma representação esquemática do motor de combustão interna em corte, onde o combustível é pulverizado na câmara de combustão pelo bico injetor. Para iniciar o funcionamento do motor, é necessário fornecer uma partida inicial, geralmente realizada pelo motor de partida, que está conectado ao sistema elétrico do veículo (MERCEDES BENZ, 2009).

Figura 02. Motor em corte

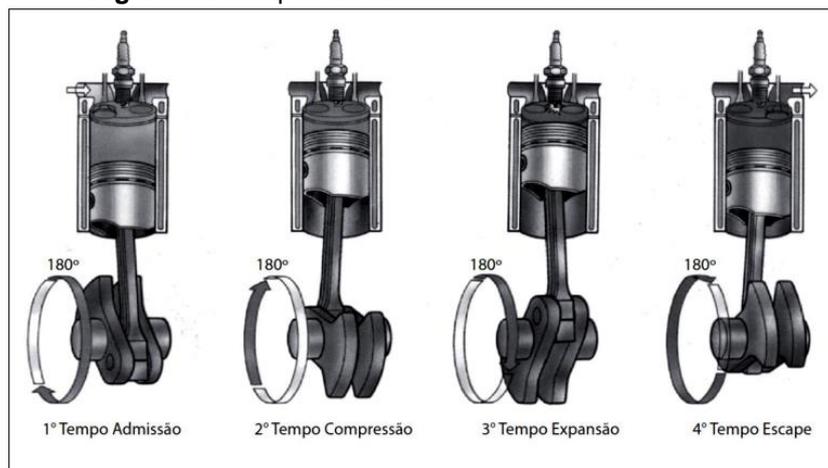
Fonte: Mercedes Bens, 2009.

É importante ressaltar que o processo de transformação de calor em trabalho é fundamental para o desempenho eficiente do motor diesel. O sistema de alimentação de combustível, composto principalmente pela bomba unitária e pelo bico injetor, a câmara de combustão do motor e a dosagem precisa de combustível desempenham papéis interdependentes, garantindo a operação em conformidade. Essa interação complexa destaca a importância de compreender não apenas as macro partes, mas também a sinergia entre os componentes internos para um melhor entendimento do funcionamento integralizado do motor diesel.

3.3 Tempos de funcionamento e coordenação dos êmbolos

Na Figura 03, são destacados os quatro estágios de funcionamento do motor, cada um desempenhando um papel crucial na conversão da energia térmica em energia mecânica.

O pistão do motor atravessa todas estas fases distintas, seguindo uma sequência de admissão, compressão, combustão e escape. É essencial compreender que esses estágios ocorrem de maneira ordenada e interligada, formando um ciclo contínuo que impulsiona o desempenho eficiente do motor.

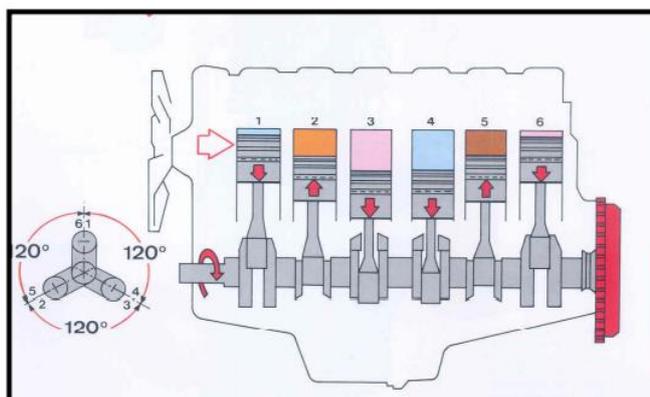
Figura 03. Tempos de funcionamento do motor

Fonte: Brunetti, 2012.

Na Figura 04 é visto a perfeita coordenação em rotação contínua da árvore de manivelas. Neste exemplo é possível observar a ordem de explosão (combustão) do motor diesel de seis cilindros, sendo elas 1 5 3 6 2 4 e o tipo de trabalho que o respectivo cilindro executa no determinado tempo. A placa induzida tem grande importância na dosagem de combustível e consequentemente no tempo de combustão, que é onde irá ocorrer efetivamente a forma de trabalho do motor, transformando energia térmica em energia mecânica.

Figura 04. Coordenação dos êmbolos

1	ADMISSÃO	COMPRESSÃO	TRABALHO	ESCAPAMENTO	
5	APAMENTO	ADMISSÃO	COMPRESSÃO	TRABALHO	ESC
3	LHO	ESCAPAMENTO	ADMISSÃO	COMPRESSÃO	TRABA
6	TRABALHO	ESCAPAMENTO	ADMISSÃO	COMPRESSÃO	
2	PRESSÃO	TRABALHO	ESCAPAMENTO	ADMISSÃO	COM
4	SÃO	COMPRESSÃO	TRABALHO	ESCAPAMENTO	ADMIS

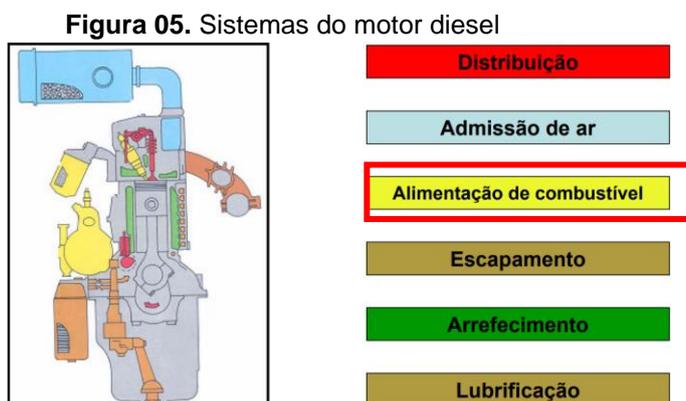


Fonte: Mercedes Benz, 2009.

3.4 Sistemas do motor

Assim como o corpo humano é constituído de vários sistemas, como sistema digestivo, sistema excretor, sistema nervoso, entre outros, o motor diesel também possui vários sistemas que precisam operar em conjunto para um funcionamento correto para o qual foi concebido. (MERCEDDES BENZ, 2009).

Os vários sistemas em que motor diesel é dividido podem ser visualizados na figura 05. O estudo presente focou no sistema de alimentação de combustível, que retira o combustível do tanque e leva até o injetor para pulverizar dentro da câmara de combustão do motor. Neste sistema fica localizada a bomba unitária e dentro da bomba unitária a placa induzida.

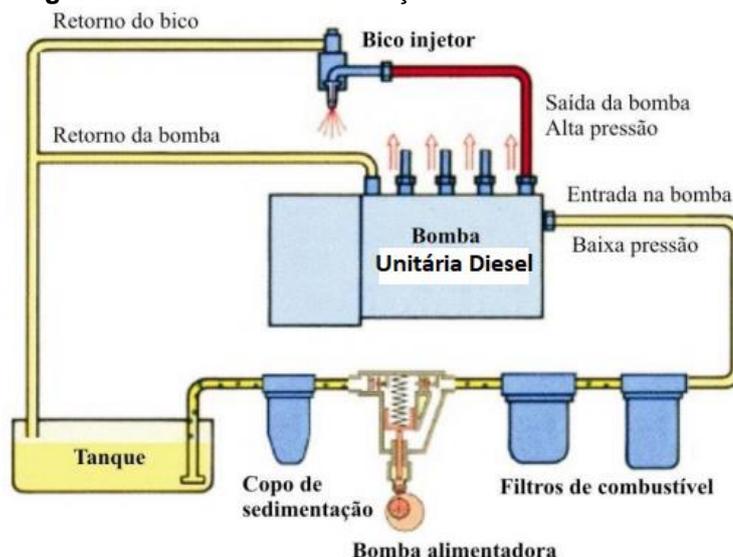


Fonte: Mercedes Benz, 2009.

3.5 Sistema de alimentação de combustível

O sistema de alimentação de combustível foi projetado para extrair óleo diesel do tanque por meio de uma bomba, filtrá-lo e, em seguida, enviá-lo à bomba unitária. Esta última, por sua vez, transfere o combustível em alta pressão para cada injetor presente dos cilindros do motor. Cada injetor desempenha o papel crucial de pulverizar finamente o diesel na câmara do cilindro, fornecendo a quantidade precisa de combustível no momento exato para a ignição e o funcionamento eficiente do motor (RACHE, 2004).

A Figura 06 ilustra o sistema de alimentação de combustível, destacando a unidade que integra esse sistema. Vale ressaltar que a placa de atracamento está localizada no interior da unidade injetora, desempenhando um papel fundamental no processo de injeção de combustível.

Figura 06. Sistema de alimentação de combustível

Fonte: Varella e Santos, 2010.

3.6 Bomba unitária e bico injetor

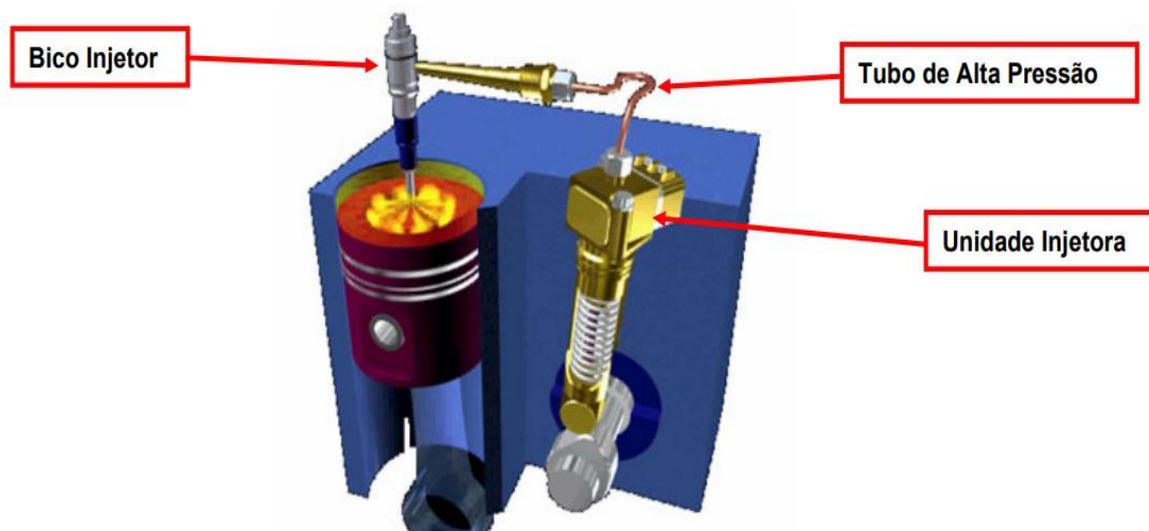
A bomba unitária está localizada entre o filtro de combustível e os bicos injetores, sendo a parte principal do sistema de alimentação diesel. O mecanismo de acionamento é realizado por um came ligado à árvore de cames do motor. Esse arranjo transforma o movimento circular em um movimento linear, transmitindo energia diretamente a um pistão intensificador. Este pistão atua como uma bomba de alta pressão, elevando a pressão do fluido (BARBOSA RODRÍGUEZ, 2017).

Bennett (2009) informa também este é um sistema onde a pressão do combustível é gerada no momento da injeção, não possuindo um acumulador comum. Este sistema de geração de pressão precisa estar em contato direto como o motor, através do eixo com cames, para que a geração de pressão aconteça no momento correto.

Motores que possuem bomba unitária, possuem também gerenciamento eletrônico do controle do volume de injeção de combustível, visando alcançar níveis menores de emissões de poluentes, atendendo as leis nacionais e internacionais de preservação ambiental. Possui mecânica simplificada, onde é alinhado os benefícios da tecnologia de controle de injeção diesel, com a redução de custos. Na figura 07 é visto o conjunto bomba unitária e injetor. É conhecido como sistema BOMBA – TUBO – BICO, consistindo em uma unidade injetora por cilindro, a qual é interligada ao bico injetor através de uma pequena tubulação de alta pressão.

Os componentes presentes na unidade injetora são, injetor, câmaras de pressão e descarga de combustível, válvula de controle de vazão, placa de atracamento e eletroímã de acionamento, sendo responsáveis por aumentar a pressão e controle do volume de combustível, que é conduzido ao bico injetor e injetado, de forma pulverizada, no interior da câmara de combustão (MERCEDES BENZ, 2009).

Figura 07. Conjunto bomba unitária, tubo e bico injetor

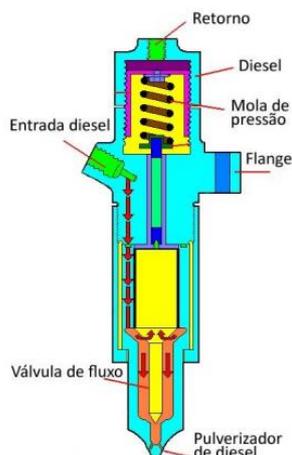


Fonte: Mercedes Benz, 2009.

Os bicos injetores ficam localizados no cabeçote do motor tendo como função principal pulverizar o combustível sob pressão na massa de ar quente no interior da câmara de combustão. Na figura 08 está o bico injetor mecânico descrito com suas partes. O funcionamento ocorre quando a unidade injetora gera pressão no tubo de alta pressão de combustível.

Quando é atingido a pressão calibrada, ergue-se a agulha de assentamento ficando livre os micro furos de injeção do bico injetor.

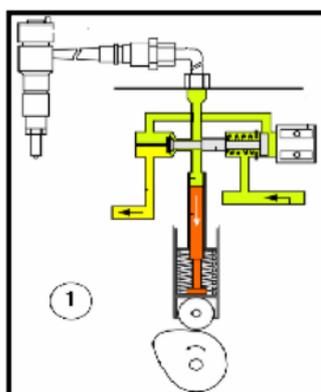
Uma forte mola de contrapressão (pressão de fechamento), é regulada através de calços metálicos. Após a pressão de bombeamento cair abaixo do valor calibrado, a mola força a agulha a retornar à posição inicial, finalizando a injeção de combustível.

Figura 08. Bico injetor mecânico

Fonte: Varella e Santos, 2010.

3.7 Funcionamento da bomba unitária

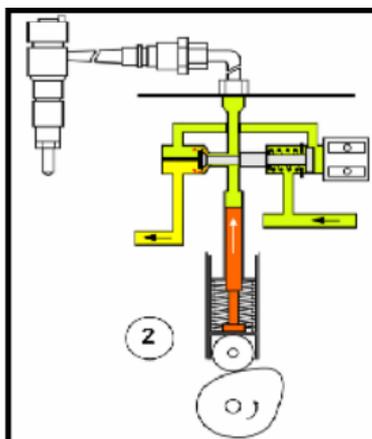
Brunetti (2010) informa que a (ECU) unidade de comando eletrônica aciona o eletroímã presente na unidade injetora. Todos os comandos vindos dos sensores do veículo, como posição do pedal do acelerador, temperatura, pressão do óleo lubrificante, pressão do líquido de arrefecimento, posição do virabrequim, sensor de fase do motor e outros, são recebidos por essa unidade de comando. Por meio de seus mapas de calibração, determina a corrente elétrica ideal para magnetizar o eletroímã, promovendo o início e a durabilidade da injeção de combustível de forma sincronizada com o pistão do motor. A estrutura do processo de injeção se dá em quatro fases. A figura 09, ilustra a primeira fase sendo o curso de admissão, onde o elemento da unidade injetora desloca-se para baixo, permitindo a entrada de combustível.

Figura 09. Curso de admissão

Fonte: Mercedes Benz, 2009.

Na figura 10 é visto a segunda fase sendo o curso prévio, onde o elemento injetor desloca-se para cima e parte do combustível é descarregada no canal de retorno.

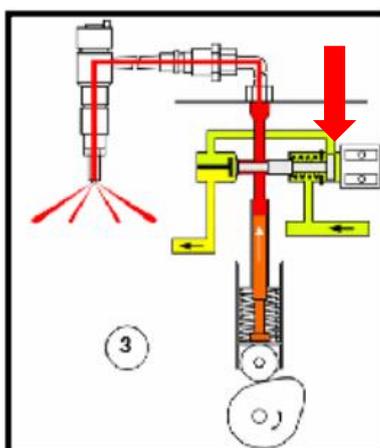
Figura 10. Curso prévio



Fonte: Mercedes Benz, 2009.

O curso de alimentação pode ser verificado na figura 11, sendo esta a terceira fase. O eletroímã recebe o pulso de tensão elétrica enviado pelo sistema de gerenciamento eletrônico atraindo a placa de atracamento (indicada pela seta vermelha) e a válvula de controle de vazão, provocando a injeção do combustível.

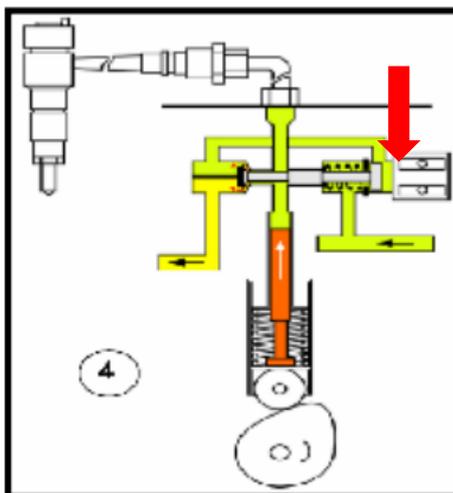
Figura 11. Curso de alimentação



Fonte: Mercedes Benz, 2009.

Na figura 12 é visto o curso residual, no qual o combustível excedente não injetado retorna ao tanque de combustível através da tubulação de retorno. Enquanto o eletroímã estiver energizado, haverá fluxo de combustível ao injetor.

Figura 12. Curso residual



Fonte: Mercedes Benz, 2009.

O fim da injeção diesel ocorre quando o sistema de gerenciamento eletrônico deixa de enviar pulso elétrico ao eletroímã de acionamento. A placa de atracamento juntamente com a válvula de controle retorna à posição de repouso, despressurizando a câmara de alta pressão no interior da unidade injetora. Sendo detectado falha no sistema de injeção, as unidades de controle do sistema de gerenciamento eletrônico utilizam valores de recuperação, permitindo desta forma o deslocamento do veículo até empresa especializadas neste tipo de manutenção. (Mercedes Benz, 2009)

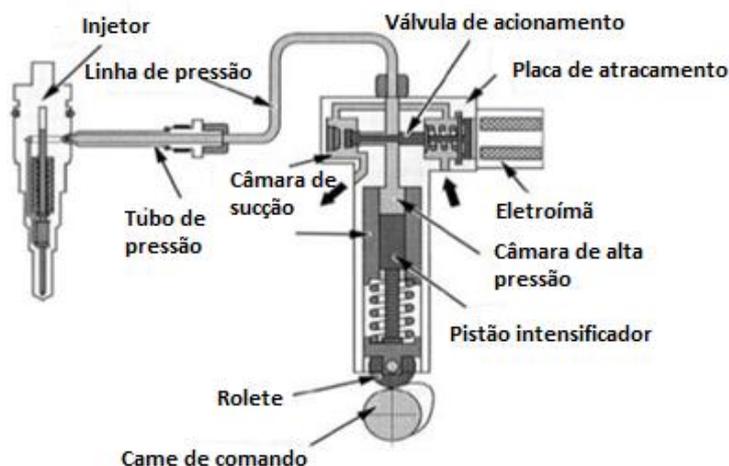
3.8 Bomba unitária – Detalhe dos componentes

A unidade injetora também chamada de bomba unitária (UPS – Unit Pump System) é montada no bloco do motor, onde se localiza o eixo de comando com ressaltos (rampas) de injeção. Na posição central do cabeçote do motor, é fixado o conjunto porta-injetor, que possui o bico injetor. (BRUNETTI, 2010)

A figura 13 mostra em detalhe os componentes da bomba unitária, sendo possível visualizar a placa de atracamento e a válvula de controle ou acionamento.

Este sistema trabalha de maneira sincronizada, enviando a quantidade ideal de combustível determinado pela unidade de comando eletrônico.

Figura 13. Bomba unitária - esquema



Fonte: Tecno diesel, 2018.

A figura 14 mostra a bomba unitária em corte nomeada com alguns itens. Destaca-se o eletroímã onde é recebido o pulso elétrico da unidade de controle eletrônico. Abaixo do eletroímã se encontra a placa de atracamento, que é atraída quando é gerado campo magnético.

Figura 14. Bomba unitária - detalhe



Fonte: Blog técnico automotriz, 2013.

Na figura 15 estão os componentes em que a placa de atracamento trabalha junto. A bobina eletromagnética na cor preta, o flange espaçador fabricado em aço AISI 304 (não magnético), a placa de atracamento e a válvula de controle. Brunetti

(2010) informa que este sistema, apesar de ser acionado por eixo de ressalto, já concede a possibilidade de se calibrar, com mais liberdade, o ponto de início de injeção, o que promove benefícios na busca do melhor ponto para a redução das emissões de gases e material particulado.

Figura 15. Placa de atracamento e demais itens



Fonte: Próprio autor, 2023.

A válvula de controle é aparafusada na placa de atracamento, fazendo pressão localizada na parte inferior. O parafuso assenta-se no chanfro da placa, conforme visualizado na figura 16.

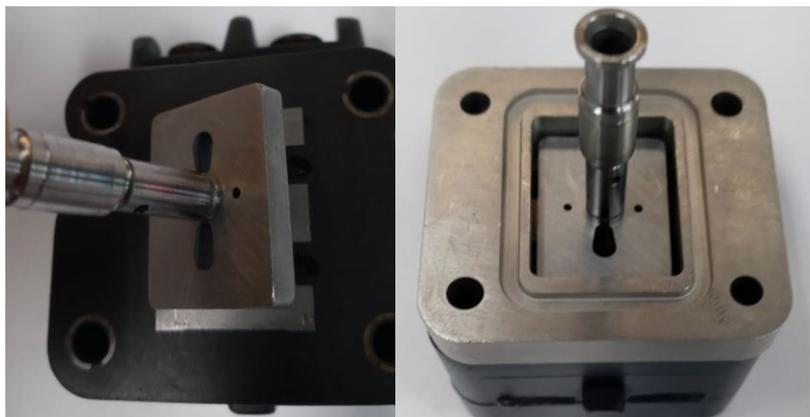
Figura 16. Placa de atracamento e válvula de controle



Fonte: Próprio autor, 2023.

Na figura 17 pode-se ver como a placa de atracamento é montada nos componentes que operam diretamente com ela. Quando o eletroímã é acionado por corrente elétrica ele atai a placa de atracamento juntamente com a válvula de controle de vazão de combustível.

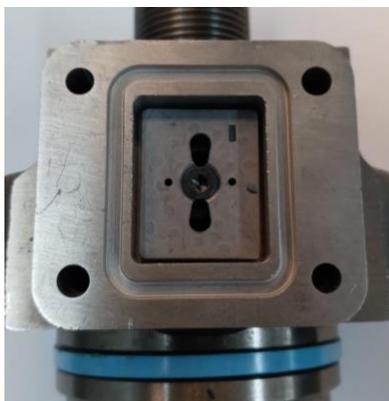
Figura 17. Montagem da placa na bobina eletromagnética



Fonte: Próprio autor, 2023.

Na figura 18 é visualizado a placa de atracamento montada na carcaça, com o flange não magnético em volta. O eletroímã ou bobina magnética é montado em cima do flange, portanto quando a unidade injetora está totalmente montada não é possível visualizar a placa de atracamento.

Figura 18. Montagem da placa na carcaça



Fonte: Próprio autor, 2023.

3.9 Placa de atracamento

A placa de atracamento situa-se entre a válvula de controle e o eletroímã. É essencial para o funcionamento correto da unidade injetora e do sistema de injeção de combustível como um todo. O tempo em que ela é atracada é medido em microssegundos (μs), como o motor trabalha em sincronismo, um desvio ou alteração neste tempo significa alteração no volume de injeção diesel, alterando a potência e causando fumaça pelo escapamento.

O formato geral da placa é visualizado na figura 19. Em motores com aplicações de bomba unitária o formato é praticamente o mesmo, podendo ocorrer leves alterações na espessura, comprimento e furações.

Figura 19 – Placa induzida



Fonte: Próprio autor, 2023.

3.10 Ensaio de composição química e dureza mecânica superficial

Os ensaios químicos podem ser utilizados para encontrar causas de falhas, como corrosão por exemplo, contaminantes na estrutura de componentes e identificar propriedades químicas do material analisado. Sendo o conjunto de técnicas de laboratório utilizadas na identificação das espécies químicas envolvidas em uma reação, como também a quantidade dessas espécies. As análises químicas podem ser realizadas de três diferentes formas: quantitativamente, qualitativamente ou ambas (FROTA e VASCONCELOS, 2019).

Segundo Frota e Vasconcelos (2019) a análise química analítica quantitativa determina as quantidades das espécies presentes na amostra, ou seja, determina a quantidade em valor. A análise química analítica qualitativa determina quais elementos estão presentes, mas não determina o valor. Juliano (2019) destaca que o ensaio químico quantitativo é a análise mais criteriosa, além de saber do que se trata o material, ainda é preciso conhecer a quantidade do componente em questão dentro da amostra.

O teste mecânico de dureza superficial é realizado verificar a resistência mecânica das placas de estudo em relação a placa original. Segundo Callister (2016), a propriedade mecânica de dureza é a resistência de um material a uma deformação plástica localizada, podendo ser uma pequena impressão ou um risco. A profundidade ou tamanho da impressão são medidos, quanto mais macio for o material, maior e mais profunda será a impressão e menor será o índice de dureza.

As medidas de dureza são relativas e deve-se tomar cuidado ao comparar valores obtidos por técnicas diferentes. São ensaios realizados com maior frequência do que qualquer outro tipo de ensaio, sendo simples e barato e classificados como não destrutivos.

Existem alguns tipos de ensaios para medir a dureza superficial, os três mais conhecidos e utilizados são, dureza Rockwell, dureza Brinell e dureza Vickers. No ensaio de dureza Brinell um penetrador esférico e duro é forçado contra a superfície do metal a ser testado. Durante o ensaio normatizado pela ABNT NBR ISO 6506-1:2019 a carga padrão é mantida entre 10 e 30 segundos. Os materiais mais duros exigem a aplicação de cargas maiores. O diâmetro da impressão no material é medido com microscópio especial de baixo aumento, essa medição é convertida no número HB apropriado com auxílio de um gráfico. É necessária uma impressão bem definida para medição, isso obriga que se tenha uma impressão lisa e plana (CALLISTER, 2016).

3.11 Material da placa de atracamento

A placa possui 0,015%p de carbono e 1,65%p de silício, sendo classificado como um aço elétrico ou aço silício. De Toledo (2007) informa que os aços elétricos são utilizados como núcleo de equipamentos para geração, utilização e distribuição de energia elétrica. São aços que dispõem de uma qualidade única, tem a capacidade de amplificar o campo magnético externamente aplicado. São aços de baixo carbono residual, sendo o silício o principal elemento de liga. Geralmente são fabricados com teores de silício entre 1% e 3,5%. Outros elementos que podem estar presentes nesse aço são o manganês, com teor próximo a 0,5% em peso e os elementos residuais como fósforo, cromo, níquel e titânio com teores inferior 0,1% em peso.

Um dos fatores que contribuem para a qualidade magnético do aço elétrico é o baixo valor de perdas por correntes parasitas. Essas perdas podem ser diminuídas com a diminuição da espessura da chapa e/ou aumentando a resistividade elétrica do material, podendo ser obtido aumentando o teor de porcentagem de silício na liga. A adição de silício, por aumentar a resistividade elétrica, permite também um sensível redução nas perdas parasíticas, portanto aumentando-se o teor de silício significa uma melhoria nas propriedades magnéticas das chapas produzidas, no

entanto quando a porcentagem do teor de silício excede 4% em peso, a trabalhabilidade do material diminui drasticamente (De Toledo, 2007). Segundo Moses (1990) a qualidade destes aços é usualmente determinada por uma medida de perda magnética, em W/kg. Essa perda é quantidade de energia elétrica dissipada sob a forma de calor ou barulho devido às perdas por correntes ou histeréticas. Ela é medida a frequência e indução especificadas. (Moses, 1990).

Como esta placa será atraída por um campo magnético gerado pelo eletroímã, alguma alteração na composição química do material pode significar alterar o volume de injeção diesel, atrasando ou adiantando a entrega do combustível pressurizado.

Nos itens seguintes, conceituam-se, mais ensaios necessários em que as placas induzidas devem ser submetidas.

3.12 Caracterização abrasiva

A tribologia é uma disciplina que se dedica ao estudo de superfícies que estão em movimento, com foco principal nos fenômenos de atrito e desgaste. Assim sendo, uma das principais contribuições a serem dadas por ela é fomentar o aumento da vida útil de diversos itens, tais como componentes de motores a combustão ou as próprias ferramentas de corte empregadas na fabricação desses componentes. Dessa forma, é possível aprimorar as características superficiais ou tribológicas, podendo prolongar a vida útil de produtos, gerando benefícios que vão desde um aumento no valor agregado até uma diminuição na emissão de substâncias prejudiciais ao meio ambiente devido à sua fabricação. Essas melhorias podem ser alcançadas, por exemplo, através de mudanças nos processos de produção e materiais usados (JOST, 1990; CAI et al., 2020).

Os parâmetros de ensaio abrasivo têm diferentes variantes para os sistemas em estudo dependendo dos requerimentos. Bello, et al (2007) estudaram aços inoxidáveis tipo AISI 304, AISI 316 e duplex e Dos Santos, et al (2015) pesquisou o comportamento do aços inoxidáveis ferríticos em ambiente abrasivo-corrosivo. Existem algumas diferenças entre os parâmetros adotados por tais autores em relação aos parâmetros adotados neste pesquisa, porém a norma DD ENV 1071-6 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2001) esclarece que existe liberdade para que o executante adote os parâmetros que lhe forem mais

convenientes, com a ressalva de que os dados só devem ser comparados se tiverem sido adotados os mesmos parâmetros no ensaio comparativo. Portanto o ensaio deve ser rigorosamente controlado.

3.13 Caracterização corrosiva usando a técnica eletroquímica de polarização

De modo geral, os ensaios eletroquímicos desempenham um papel crucial na avaliação da resistência à corrosão de ligas de aço, demandando um período experimental breve. Estas técnicas desempenham um papel crucial no suporte ao processo produtivo ao proporcionar rapidamente informações sobre as taxas de corrosão de metais em ambientes específicos, além de avaliar a eficácia de inibidores de corrosão (GOMES, 2016).

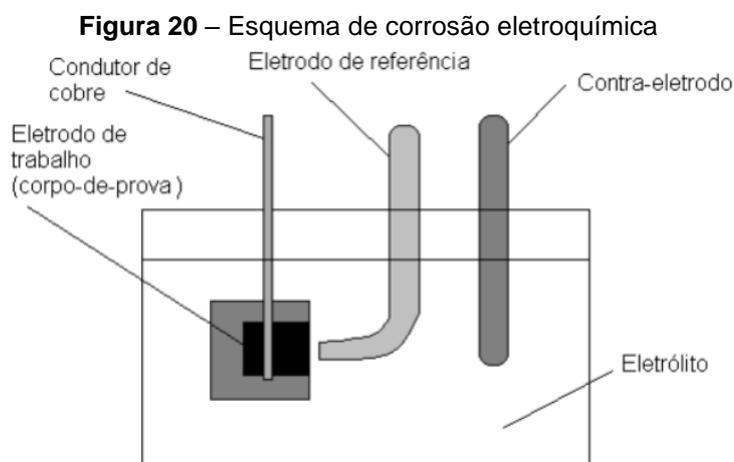
Para que ocorra a corrosão, é necessário que o potencial de equilíbrio da reação anódica seja inferior ao potencial de equilíbrio da reação catódica. O potencial de corrosão representa uma propriedade que um metal desenvolve ao passar pelo processo corrosivo. Esse potencial é determinado pela interseção da curva de polarização anódica com a curva de polarização catódica, sendo experimentalmente estabelecido por meio da medição direta em relação a um eletrodo de referência (WOLYNEC, 2003).

Ribeiro (2014) e Gomes (2016) informam que o Potencial de Circuito Aberto (OCP - *Open Circuit Potential*) constitui o ponto de partida fundamental em experimentos eletroquímicos, como polarizações potenciodinâmicas e análises de impedância. Em essência, trata-se do potencial a partir do qual se inicia o ensaio da amostra. A determinação do potencial de um circuito aberto é conduzida através da comparação entre o eletrodo de trabalho e o eletrodo de referência. O valor de potencial obtido nessas condições reflete o equilíbrio das reações espontâneas em uma célula eletroquímica.

A metodologia de polarização potenciodinâmica, (PDP - *Potentiodynamic Polarization*), é empregada para obter curvas de polarização, envolvendo uma varredura contínua do potencial. Essa varredura tem início a partir do potencial de corrosão (OCP), que é estabelecido quando o material é imerso na solução, ou em potenciais nos quais predominam reações catódicas, apresentando valores inferiores ao potencial de corrosão definido (GIRÃO, 2008). A execução desse

procedimento, que consiste na varredura contínua do potencial juntamente com o registro da corrente gerada, proporciona uma análise detalhada do comportamento eletroquímico do material, culminando na geração da curva de polarização correspondente (Amaro, 2006).

Os procedimentos eletroquímicos fazem uso de instrumentos e softwares especializados. O dispositivo denominado de potenciostato, por exemplo, atua como uma fonte externa para aplicar uma determinada voltagem. Além de impor o potencial desejado ao material em relação a um eletrodo de referência, o potenciostato também pode medir a corrente de polarização e até mesmo registrar essa corrente em função do potencial. A voltagem aplicada por um potenciostato a uma peça de teste de metal imersa em um eletrólito pode ser mantida constante ou variar de forma controlada. Na Figura 20, está representado o esquema para conduzir o ensaio, onde uma célula de corrosão eletroquímica é montada, envolvendo a imersão de três eletrodos no eletrólito (TAIT, 1994 apud GOMES, 2016; WOLYNEC, 2003).



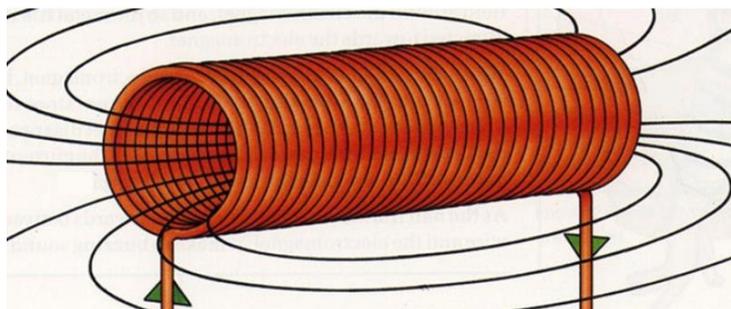
Fonte: Morona (2007 apud GOMES, 2016).

A corrente elétrica originada pelo potenciostato exerce influência sobre o potencial do eletrodo de trabalho, transitando do seu estado inicial de circuito aberto para um potencial que é condicionado pela magnitude da corrente de polarização. Esta interação entre a corrente e o potencial é empregada para analisar o comportamento da corrosão metálica ou para estimar a resistência à corrosão. (GOMES, 2016)

3.14 Consumo de corrente elétrica

O eletroímã da unidade injetora ou solenoide tem a função gerar campo magnético para atrair a placa de atracamento e por consequência a válvula controladora de fluxo. Segundo Freitas (2016) um solenoide é um componente eletromecânico, sendo um fio condutor em formato helicoidal, onde é percorrido uma corrente elétrica. Quando há passagem de corrente elétrica, o campo magnético é formado, podendo ser usado para abrir e fechar algum sistema e pode ser aplicado a sistema eletromecânicos para controlar a passagem de fluidos. A Figura 21 ilustra as linhas de campo magnético formadas, após a aplicação de corrente elétrica em um solenoide.

Figura 21. Solenoide



Fonte: Foxlux, 2023.

Segundo Mehl (2002) a fonte de alimentação é um componente de aparelhos eletrônicos que serve para transformar a energia elétrica que chega pelas tomadas em uma corrente elétrica contínua. Ou seja, ela recebe a energia em 110V ou 220V e transforma na voltagem adequada para o funcionamento do aparelho, que geralmente é 12V. Algumas fontes podem elevar ou baixar o nível de tensão.

No caso do eletroímã da bomba unitária, este controla a passagem do fluido de combustível juntamente com a válvula de controle. Quando está acionada por corrente elétrica a passagem do fluido está liberada, quando está desenergizada a passagem do fluido fica retida. No caso do teste com fonte de tensão, quando o solenoide é ligado, a corrente elétrica aumenta lentamente até que ela alcance o valor constante nominal. O teste de indução ou consumo de corrente elétrica é realizado por uma fonte de alimentação e consiste em certificar-se que a placa será

atraída em um limiar de corrente exato, que necessita ser ajustado para o correto funcionamento do motor.

3.15 Teste funcional em bancada de prova

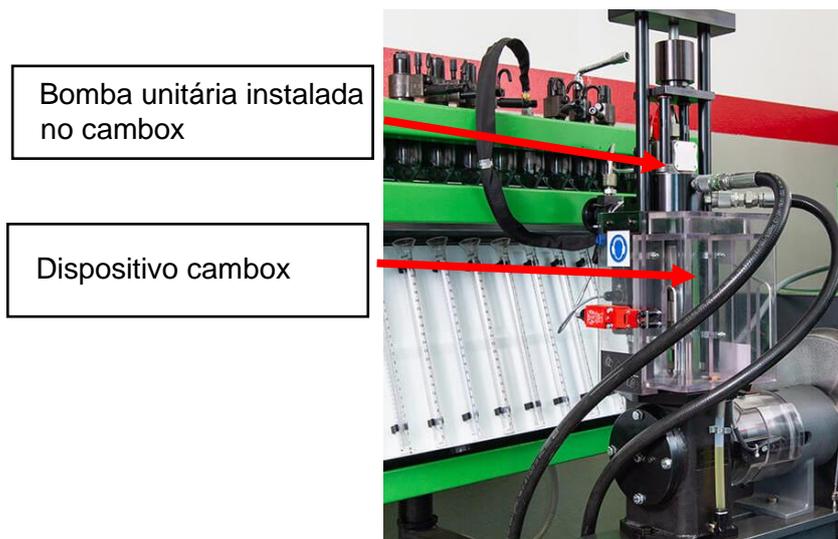
De acordo com Cabrera (2021), as bancadas de testes desempenham um papel fundamental na verificação do funcionamento das bombas, sendo a bomba uma parte crucial do sistema de alimentação de combustível do motor. Estas bancadas são empregadas tanto durante o processo de fabricação quanto de reparo, permitindo a realização de testes de calibração para garantir a eficiência e a precisão das bombas unitárias. A Figura 22 apresenta o modelo de bancada necessário para realizar os testes, proporcionando uma visão mais clara do ambiente onde as análises são conduzidos.

Figura 22. Bancada de teste



Fonte: Bancada de teste, 2020.

Para fixar a bomba unitária na bancada de teste, é necessário encaixá-la no dispositivo conhecido como cambox. O cambox é utilizado especificamente para testar as bombas unitárias eletrônicas. Embora não haja uma tradução precisa para a palavra "cambox" em português, pode-se entendê-la como uma caixa ou câmara. A montagem da bomba unitária ocorre inicialmente dentro deste dispositivo, que posteriormente é fixado na bancada, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23. Dispositivo cambox

Fonte: Fonte: Poka diesel, 2021.

Bosch (2010) esclarece que somente após a instalação do cambox na bancada, juntamente com a bomba unitária, é que o teste prático poderá ter início. Na bancada de testes, será simulada a atuação do came de comando do motor. Um eixo excêntrico irá comprimir a mola da unidade injetora, realizando o bombeamento em alta pressão do óleo teste e enviando-o para o tubo de alta pressão. Este, por sua vez, encaminha o óleo pressurizado ao porta-injetor devidamente calibrado e ajustado.

O teste funcional em bancada de prova opera em sincronia, simulando o funcionamento real no motor. Para um teste eficaz e padronizado deve-se determinar a frequência e a quantidade de pulso elétrico que a bobina eletromagnética da bomba unitária irá receber, sendo que a quantidade de pulsos elétrico, deve ser entendida com a quantidade de injeções realizadas pela bomba unitária.

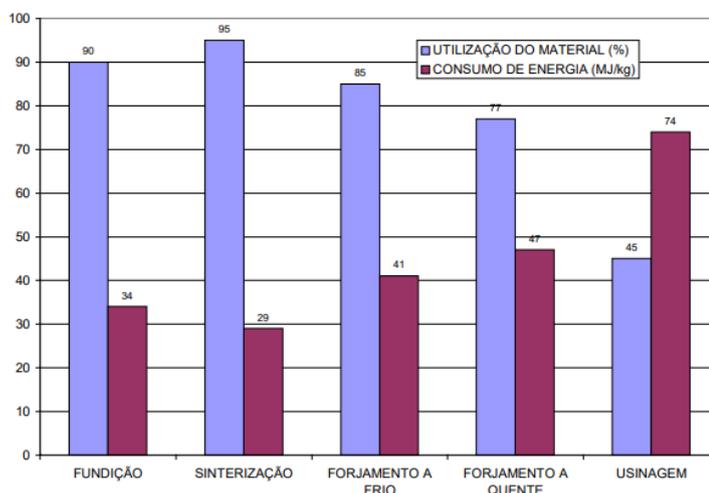
3.16 Metalurgia do pó

A metalurgia do pó é um procedimento praticado desde muito tempo, surgiu antes dos aços fundidos. A primeira metalurgia que se tem registro ocorreu por volta do ano 6000 a.C., onde em um forno primitivo foram forjados, uma espécie de lingotes de ferro maleáveis com uma mistura de carvão e minério. Tem-se o registro também dos egípcios que fabricaram ferramentas de aço, usando técnicas de

metalurgia do pó no ano de 3000 a.C. e índios incas que obtiveram artefatos e joias utilizando pós de metais preciosos. Em 1900 foi criado o primeiro produto pela metalurgia do pó moderna, o filamento de tungstênio para aplicado em lâmpadas elétricas incandescente. Chegando nos anos de 1960 e 1970 foram obtidas partes de automóveis, na década de 1980 fabricou-se peças de turbinas e nos anos de 1990 obteve-se peças compactadas a quente, moldes por injeção e por forjamento de pós (HÜMMLER; OBERACKER, 1993; ZAPATA 1987).

O objetivo da metalurgia do pó é executar a conformação plástica, sem fusão concreta, os pós-metálicos ou não, utilizando pressão e calor respectivamente, usando um tratamento térmico chamado de sinterização que substitui a fundição clássica. A sinterização ocorre em temperatura inferior do ponto de fusão do metal base, onde pode obter a peça na sua forma final ou próximo do desejado. É considerado um processo econômico, pois mais de 94% da matéria prima é aproveitado após a peça acabada, sendo superior a outros processos neste ponto, conforme pode ser visualizado na Figura 24 (HÜMMLER; OBERACKER, 1993; ZAPATA, 1987).

Figura 24. Aproveitamento da matéria prima - sinterização



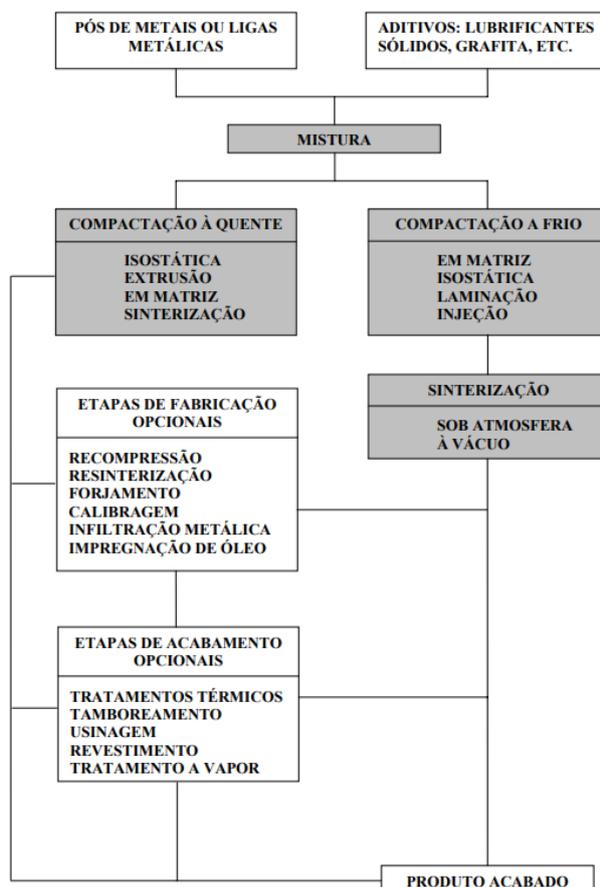
Fonte: Zapata, 1987.

O procedimento torna-se eficaz em relação a custo, podendo produzir componentes complexos já nas medidas finais ou com dimensões próximas a elas, sendo que a produção pode chegar a centenas de peças produzidas por hora. Segundo Zapata (1987) e Chiaverini (1992), o processo que compõem a metalurgia do pó é dividido em três macro etapas:

- **Mistura** dos pós selecionados com aditivos a fim de produzir a liga requerida, promovendo de forma homogênea a matéria prima;
- **Compactação**, é realizada a aplicação de pressão nos pós no interior de uma matriz, na temperatura ambiente. A dimensão da matriz será a forma e dimensão da peça final;
- **Sinterização** também chamada de aquecimento. É realizado em uma temperatura abaixo do ponto de fusão do metal base, com condições controladas de temperatura, tempo de aquecimento e atmosfera.

Além dos três macros processos fundamentais, podem ainda ser adicionados uma série de procedimentos que melhoram o acabamento e as propriedades das peças produzidas que necessitam de caracterização particular, como por exemplo tamboreamento, usinagem, infiltração metálica, tratamento térmico, recompressão, resinterização, entre outros. Na Figura 25, está o fluxograma mostrando as etapas necessárias para se obter o produto acabado através da metalurgia do pó, incluindo os procedimentos considerados opcionais.

Figura 25. Processo de fabricação – Metalurgia do pó



Segundo German (1984) e Chiaverini (1992), a metalurgia do pó possui algumas vantagens como:

- Elimina ou diminui o processo de usinagem;
- Elimina ou diminui os refugos;
- Boa precisão dimensional;
- Pode ser utilizada uma ampla gama de ligas;
- É possível conseguir bom acabamento da superfície;
- Se necessário, as peças podem passar por tratamento térmico para ganho de resistência mecânica ou desgaste;
- É possível controlar o nível de porosidade para fabricação de peças autolubrificantes ou sistema de filtração;
- É possível fabricar peças de geometria complexas, sendo que outros processos seriam onerosos ou impossíveis de fabricar;
- O produto acabado possui boa vida útil em aplicações críticas;
- Controle dos materiais e de suas propriedades, conseguindo boa uniformidade dos produtos, conseguindo assim minimizar segregações e impurezas, bolhas e tensões internas;
- Praticamente qualquer liga metálica ou não metálica pode ser obtida, bem como o controle da inclusão de carbonetos e outros materiais;

Chiaverini (1992) informa que este processo também possui algumas desvantagens ou limitações que precisam ser pontuadas:

- Custo inicial alto para fabricação de todo o ferramental, sendo necessário fabricar grandes quantidades de peças para o projeto se tornar viável;
- Possui limitações no formato da peça, impossibilitando a execução da matriz;
- Peso e tamanho de peça limitado, sendo necessário prensas para compactação;
- Ao longo do processamento, é possível a contaminação dos pós.

3.17 Caracterização dos pós

A matéria prima da metalurgia do pó necessita de um rigoroso controle visando sua uniformidade, controle esse que necessita ser melhor que a maioria dos processos metalúrgicos convencionais, sendo assim todas as suas características precisam ser conhecidas, controladas e apuradas (CHIAVERINI,1992).

German (1984) e Chiaverini (1992) informam que a fabricação da matéria prima dos pós podem ser consideradas tecnologias bem desenvolvidas. Podem ser separadas em quatro principais métodos de fabricação, do ponto de vista econômico e industrial, são eles:

- Deposição eletrolítica;
- Atomização de metais
- Processamento mecânico de materiais sólidos;
- Reações químicas

Em relação as reações químicas o processo mais utilizado é o de redução de óxidos metálicos, onde é empregado um agente redutor sólido (carbono) ou gasoso. Os metais mais comuns que são feitos por esse processo são tungstênio, cobre, ferro e molibdênio.

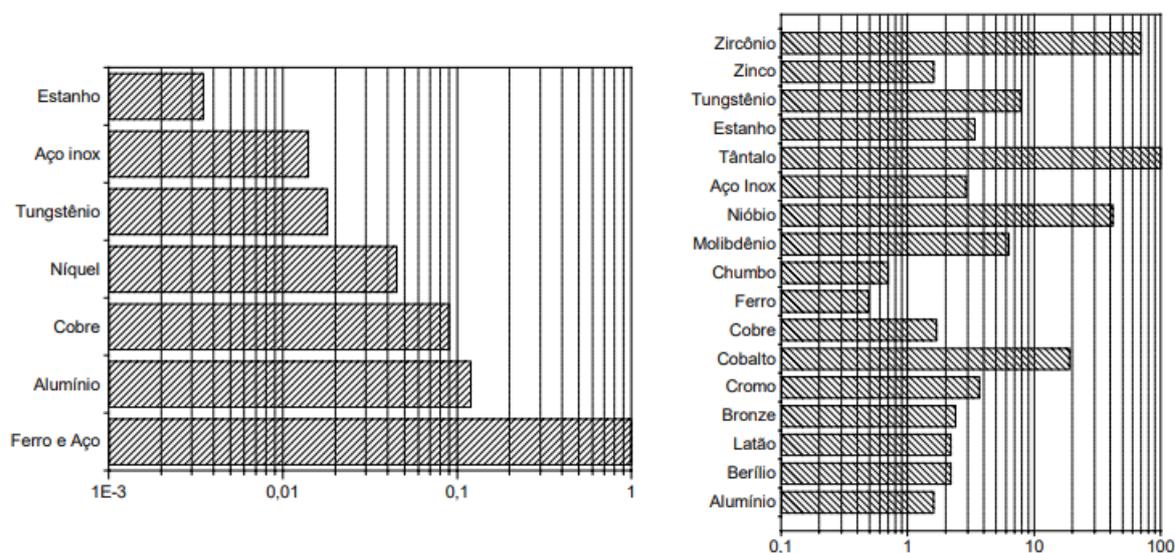
Outro processo é a decomposição térmica onde deste processo é obtido principalmente ferro e o níquel. Consiste na aquisição de partículas de pó combinando condensação e vapor descomposto.

O processo considerado mais importante é a atomização, sendo este utilizado em larga escala, principalmente na produção do pó de ferro, o qual é o metal mais usado no meio industrial da metalurgia do pó, sendo também um dos mais baratos, na Figura 26, está uma relação logarítmica da produção e custo relativo dos pós para sinterização.

Além do ferro, com este processo é possível obter outros materiais como latão, alumínio, cobre, aço inoxidável, entre outros. Para realizar este processo é preciso utilizar líquido metálico em finas partículas na forma de pulverização, em geral menor que 150 μm .

O metal líquido então, de forma forçada, passa através de um pequeno orifício de saída, onde é desintegrado por um jato de gás, água ou ar. O metal se solidifica imediatamente através da ação do jato e pelo resfriamento natural, onde é coletado numa câmara succionada. A classificação da atomização pode ser a água ou a gás, a depender da função utilizada para desfazer a corrente de metal que está em meio líquido.

Figura 26. Relação entre fabricação e preço – pós para sinterização



Fonte: German, 1984.

A deposição eletrolítica é um processo que permite obter grande variedade de pós-metálicos, tendo como benefício principal a alta pureza na obtenção. O procedimento consiste na precipitação do pó no cátodo no interior de uma célula eletrolítica, sendo os pós mais comuns o cobre, metais preciosos e o ferro. Fundamentalmente os processos mecânicos podem ser qualificados por quatro mecanismos de moagem, sendo eles: compressão, atrito, impacto e cisalhamento. O procedimentos mecânicos mais comuns são o “mechanical alloying” e o “milling”. Nos metais quebradiços é utilizado o processo de “milling”. Dentro de um recipiente cilíndrico são colocados esferas duras. Durante a movimentação rotativa do cilindro as esferas se chocam com o material, transformando-o em pó.

O processo que utiliza esferas agitadas é o “mechanical alloying”, sendo utilizado para criar partículas compostas ligadas. O processo iniciasse alocando dentro de agitador mecânico as esferas e os pós dos elementos. Durante o funcionamento o impacto das esferas com os elementos no interior do recipiente produz soldagem a frio microscópica e fratura o que resulta no composto desejado.

Normalmente os processos mecânicos são utilizados como procedimento complementar a fabricação dos pós, tendo como objetivo principal:

- Alterar a propriedades como, velocidade de escoamento, densidade, dentre outras;
- Modificar a forma da partícula;
- Diminuição do tamanho da partícula do pó;

- Aglomeração de pó.

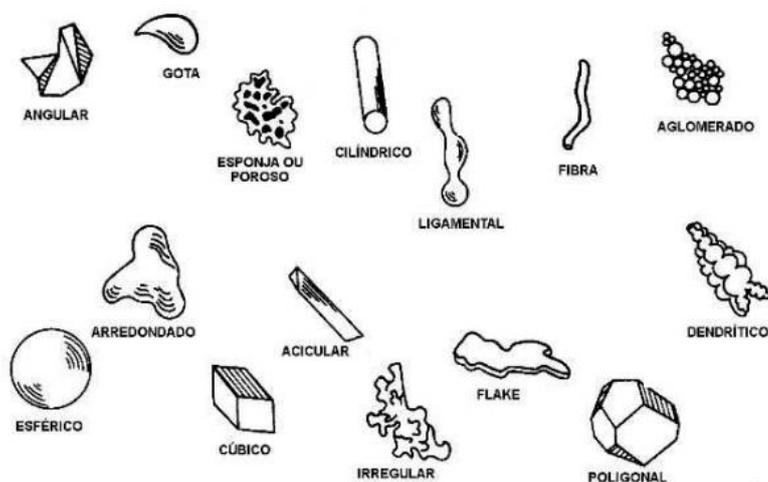
Segundo Salgado (2002), existe ainda um quinto grupo chamado “melt-spinning”. Esta operação diferencia-se das outras devido a possuir um volante fabricado com material de alta condutividade térmica e ser feito a vácuo. O volante rotaciona com alta rotação podendo atingir altas taxas de resfriamento, obtendo um material com propriedades otimizadas.

Os pós obtidos irão apresentar características e propriedades em de acordo com os processos anteriormente mencionados. Torna-se necessário conhecer o processo de obtenção dos pós com detalhe, para selecionar o pó correto para uma determinada aplicação.

O pós metálicos possuem como característica principal:

- Formato;
- Alta pureza e facilidade na alocação de composição química;
- Composição granulométrica e diâmetro ou forma da partícula;
- Compressibilidade;
- Controle da porosidade, após compactado;
- Resistência a verde;
- Densidade;
- Superfície específica;
- Velocidade de vazão.

Figura 27. Formato dos pós para sinterização



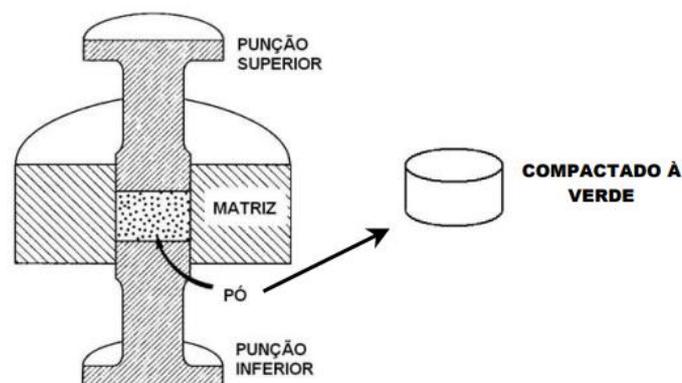
Fonte: German, 1984.

Em relação a partícula unitária, suas propriedades implicam em dureza, composição química, microestrutura, densidade, tamanho e forma. O formato da partícula tem influência no fluxo, compressibilidade, empacotamento, fornecendo dados sobre o modo de fabricação do pó, explicando as características do procedimento utilizado para o processamento. Esta característica é de difícil definição (JESUS FILHO, 2006). A Figura 27 procura descrever as formas de partículas obtidas.

3.18 Processo de Sinterização

A fase final para consolidação dos pós-metálicos é a sinterização, etapa esta que é antecedida pelos passos de mistura e compactação. O material chega para sinterização já com a forma final (compactado à verde), no entanto apresenta baixa resistência mecânica. Na Figura 28 está o exemplo de uma peça compactado a verde.

Figura 28. Compactado a verde

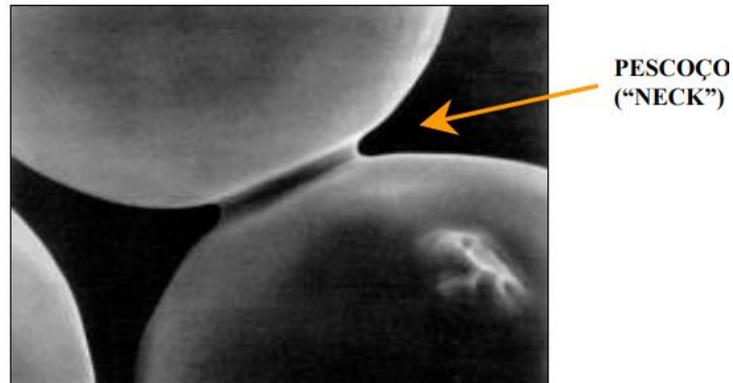


Fonte: German, 1984.

No processo de sinterização o “compactado verde” é aquecido a altas temperaturas, porém abaixo do ponto de fusão do metal base ou metal principal. As condições de temperatura, tempo e atmosfera devem ser controladas. Após, as partículas constituinte do material acabam ligando entre sí, como consequência o material atinge as características desejadas de resistência mecânica, densidade e dureza. Como temperatura para sinterização, normalmente é utilizado a ordem de 2/3 a 3/4 do valor de temperatura do metal base. No final do processo de sinterização, ocorre por difusão o transporte de material, fazendo que o contato e a

ligação das partículas aumentem. Como consequência, forma-se o pescoço, conforme a Figura 29.

Figura 29. Formação de pescoço na sinterização



Fonte: German, 1984.

Neste pescoço é formado o contorno de grão entre as duas partículas. Nesta região ocorrem fluxos difusionais por causa da geometria local, promovendo o crescimento do pescoço, fechando os canais de interligação dos poros. Por último vem a densificação e a eliminação dos poros.

German (1984) informa que o processo de difusão é responsável pelas mudanças estruturais, estando associado ao surgimento do pescoço durante a sinterização. A energia específica necessária para conseguir movimento atômico é ativada pela difusão.

A equação abaixo de Arrhenius, mostra como a relação de espaços vazios se desloca de acordo com a temperatura.

$$\frac{N}{N_0} = \exp\left(\frac{-Q}{R.T}\right)$$

Onde: **N/N₀** é a razão de posições disponíveis, **Q** é a energia de ativação necessária, **T** é a temperatura absoluta e **R** é a constante do gás. Desta forma pode-se considerar que a parte teórica da sinterização se resume nas seguintes etapas:

- a) Ligação inicial e formação de pescoço entre as partículas;
- b) Aumento do pescoço;
- c) Fechamento dos canais de interligação dos poros;
- d) Poros arredondados;

- e) Densificação;
- f) Aumento eventual dos poros.

Durante o procedimento de sinterização, diversos fatores desempenham papéis críticos na obtenção das propriedades desejadas do material. Questões como a temperatura de sinterização, composição das partículas, atmosfera de processamento, tempo de sinterização, estrutura das partículas e a topografia da superfície exercem influências significativas sobre as propriedades finais do material resultante. Portanto, é necessário compreender as características dos pós utilizados, a fim de definir parâmetros adequados que otimizem o processo de sinterização e garantam a obtenção de um material final com as propriedades requeridas.

Na Tabela 1 estão as temperaturas e os tempos de sinterização utilizados comumente para os materiais comerciais de fácil acesso.

Tabela 1. Temperatura e tempo para alguns materiais

MATERIAL	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (min)
Bronze	760 - 860	10 - 20
Cobre	845 - 900	12 - 45
Latão	845 - 900	10 - 45
Ferro, ferro grafita, etc	1010 - 1150	8 - 45
Níquel	1010 - 1150	30 - 45
Aço inoxidável	1095 - 1290	30 - 60
Imãs alcalino	1205 - 1300	120 - 150

Fonte: Chiaverini, 1992

O processo de sinterização pode ocorrer devido a uma série de fatores, podendo cada mecanismo atuar sozinho ou ser uma combinação destes para alcançar a densificação necessária do material. Na Tabela 2 está o resumo dos fatores de sinterização, onde está associado o mecanismo de transporte de material e energia de atuação.

Tabela 2. Fatores de sinterização

Tipo de sinterização	Mecanismo de transporte de material	Energia de ativação
Fase de vapor	Evaporação - condensação	Diferenças na pressão de vapor
Estado sólido	Difusão	Diferenças na energia livre ou potencial química
Fase líquida	Fluxo viscoso, difusão	Pressão capilar, tensão de superfície
Líquido reativo	Fluxo viscoso, solução-precipitação	Pressão capilar, tensão de superfície

Fonte: Richerson, 1992.

Devido a sua simplicidade, a indústria de metalurgia do pó utiliza, em sua maioria, o mecanismo de difusão no estado sólido, tal mecanismo envolve transporte de material por difusão em volume.

Segundo Richerson (1992), a equação abaixo mostra um modelo geral para o mecanismo de transporte de material por difusão, entre a linha do contato entre as partículas formando a região do pescoço (“neck”).

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \left(\frac{K \cdot \gamma \cdot a^3 \cdot D \cdot t}{k \cdot T \cdot d^n} \right)^m$$

Onde:

$\Delta L/L_0$ = Contração linear ou taxa de sinterização;

γ = Energia superficial;

D = Coeficiente de difusão própria;

a^3 = Volume atômico de difusividade

k = Constante de Boltzmann

d = Diâmetro da partícula

t = Tempo

K = Constante dependente da geometria

T = Temperatura

O expoente n pode ser considerado 3 e o expoente m é considerado entre 0,3 e 0,5. Esta equação matemática é a favor para o estágio de início da sinterização, quando os grãos começam a crescer, devem ser adotados modelos com maior complexidade. Analisando a equação acima, é possível perceber que a taxa de sinterização é influenciada pelo tamanho da partícula, quanto menor a partícula, maior a taxa. O coeficiente de difusão também é influenciado pela temperatura.

Como exemplo a Tabela 3 mostra os coeficientes de difusão de alguns elementos como, ferro, níquel, carbono e manganês na estrutura da matriz do ferro CCC e CFC a 1000 °C e a 500 °C.

Para o desenvolvimento de ligas inéditas através da metalurgia do pó, sempre que possível busca-se ligas comerciais que sinterizem em 1150 °C de temperatura máxima. Comumente os fornos encontrados na indústria trabalham com temperaturas desta ordem. A incorporação de aditivos é frequentemente benéfica, agindo para aprimorar o processo de sinterização. Isso pode permitir a redução da temperatura necessária para a densificação do material principal. (GREETHAM, 1990; OLIVEIRA 1999).

Tabela 3. Coeficiente de difusão para alguns materiais

Soluto	Solvente (Estrutura Matriz)	Coeficientes de difusão (m ² /s)	
		500 °C	1000 °C
Carbono	Ferro CFC	(5 x 10 ⁻¹⁵)	3 x 10 ⁻¹¹
Carbono	Ferro CFC	10 ⁻¹²	(2 x 10 ⁻⁹)
Ferro	Ferro CFC	(2 x 10 ⁻²³)	2x10 ⁻¹⁶
Ferro	Ferro CFC	10 ⁻²⁰	(3 x 10 ⁻¹⁴)
Níquel	Ferro CFC	10 ⁻²³	2 x 10 ⁻¹⁶
Manganês	Ferro CFC	(3 x 10 ⁻²⁴)	10 ⁻¹⁶

Fonte: Richerson, 1992.

Na sinterização a atmosfera deve ser controlada, as seguintes atmosferas são possíveis: hidrogênio, gases nobres (Ar e He), vácuo e nitrogênio, grupo de gases parcialmente queimados e amônia dissociada. Para muitas aplicações, o vácuo é mais indicado, porém o custo do equipamento e sua utilização restringe seu uso, sendo indicado para pesquisas laboratoriais. O nitrogênio (N₂) é indicado para

sinterizar ligas de alumínio por se inerte e não possuir característica redutora. O hidrogênio (H₂) é indicado para sinterizar ligas a base de Fe, onde este elemento consegue formar uma atmosfera altamente redutora. Os gases nobres N₂ combinado com H₂ (3% a 5%), torna a mistura não inflamável, ficando com um potencial redutor interessantes para diversas aplicações práticas. O uso de gases nobres geralmente está restrito a laboratórios. GERMAN (1984) e THUMMLER (1993)

3.19 Usinagem

Existem três processo básicos onde se pode obter componentes finalizados para serem utilizados. O primeiro é o processo por deformação, onde o material é conformado por deformação plástica, sendo seu volume final conservado. O segundo é caracterizado pela junção das partes, como solda e metalização. O terceiro procedimento é a usinagem, onde são removidos materiais por meio da uso de ferramentas de cortes.

Neste contexto a metalurgia do pó, mesmo sendo um processo antigo, está cada vez mais ganhando espaço no meio industrial devido a sua versatilidade no formato da fabricação de peças, atingindo boa tolerância de fabricação, em alguns casos semelhante com o processo de usinagem. Nos processo de fabricação dificilmente um processo atua sozinho para acabamento do produto, onde normalmente é utilizado o processo de usinagem para terminar o processo. Segundo Marcondes (1990) desde muito tempo o homem vem se esforçando para dar forma aos seus pensamentos. Sempre querendo melhorar aquilo que já existe, criando formas para tal aperfeiçoamento. Portanto o conceito global de usinagem é “alcançar a perfeição da matéria, não apenas enquanto a torna bela, mas também útil e com razão suficiente para existir”.

De modo técnico a usinagem é a processo executado por uma máquina operatriz, no intuito de remover matéria prima por meio de ferramenta de corte, desta forma são conferidos dimensão e acabamentos planejados de uma peça. Existe muitos processos de usinagem, a depender é claro da complexidade de cada peça e do acabamento requerido. No livro “Fundamentos da Usinagem dos Metais” de Ferraresi (1970) são encontrados 23 processos e 32 sub processos, onde pode se considerar procedimentos universais de usinagem, sendo eles: furação,

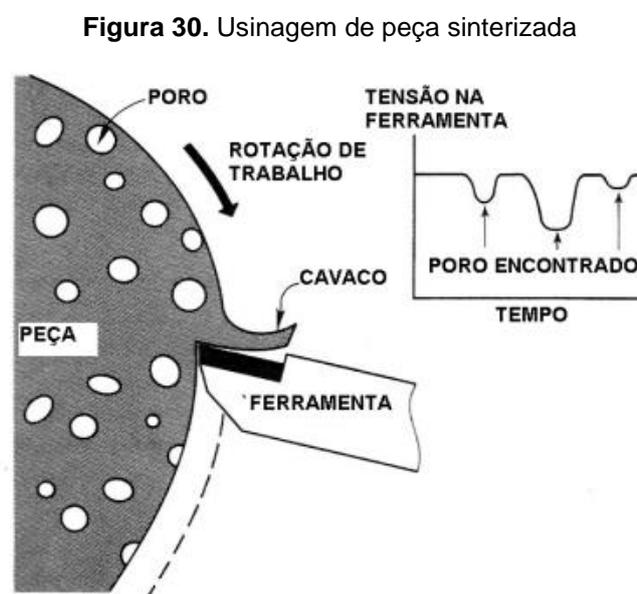
torneamento e fresamento. Todos estes processos irão se caracterizar pelo uso de equipamento e de ferramentas que irão ajudar na forma final da peça desejada.

Pensando no processo produtivo de modo econômico e com qualidade adequada, os fabricantes de materiais e de ferramentas se preocupam com usinabilidade do material, ou seja, com a facilidade com que o material pode ser removido da superfície do material em questão. Marcondes (1990) e Black (1996) informam que a usinagem promove a conformação de um material por meio da remoção de material utilizando uma máquina operatriz.

O tipo de acabamento na superfície do material é produzido pelo corte da ferramenta, e este depende da estratégia de usinagem adotada, da velocidade de corte e da geometria da ferramenta. O material removido é chamado de cavaco ou apara.

As características do material tem grande influência no processo de usinagem, como composição química, inclusões metálicas ou não, tipo de processamento, microestrutura etc. Por exemplo, um material fabricado pela metalurgia do pó, que possui porosidades internas, é altamente agressivo a ferramenta de corte tendo a abreviar a vida da mesma (CHANG, 2001; GERMAN 1984).

Na Figura 30 é possível visualizar uma peça sinterizada submetido ao processo de usinagem por máquina operatriz. Este tipo de usinagem em materiais sinterizados, tendo a diminuir o tempo de vida útil da ferramenta de corte.



Fonte: German, 1984.

3.20 Usinagem da placa fabricada por sinterização

A placa fabricada por sinterização requer usinagem após o processamento. A etapa de usinagem, neste a retífica da superfície, é essencial para garantir um acabamento de alta qualidade, deixando a superfície da placa espelhada e uniforme. Para esse fim, é empregado o rebolo de nitreto cúbico de boro (CBN), conforme ilustrado na Figura 31. De acordo com Klocke e König (1995), o uso do rebolo de CBN durante o processo de retificação resulta em um acabamento excelente, graças às suas características de extrema dureza, resistência ao desgaste, resistência a altas temperaturas e condutividade térmica. Bianchi (1992) ressalta a ampla adoção desses rebolos no mercado, destacando que, apesar do custo inicial elevado, sua utilização se mostra compensatória devido à sua longa durabilidade. Essa durabilidade estende a vida útil do rebolo, resultando em benefícios econômicos significativos a longo prazo.

Figura 31. Rebolo para retífica



Fonte: Próprio autor, 2023.

Após usinagem é necessário realizar a furação com broca e chanfro para assentamento do parafuso, conforme placa original. O custo final da placa fabricada fica em um valor interessante para as organizações que recuperam bombas unitárias. A placa fabricada, após passar por todo o processo de fabricação, apresenta um custo significativamente mais competitivo em comparação com as placas de mercado já prontas. O custo da placa fabricada é, em média, 40% mais econômico.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Serão abordados neste tópico os métodos de fabricação da placa sinterizada e os procedimentos dos ensaios realizados, sendo eles análise química, dureza superficial mecânica, abrasão, corrosão e ainda testes que auxiliam na análise comparativa, como teste de indução elétrica ou atracamento e teste funcional em bancada. Foram submetidas aos ensaios a placa original, a placa fabricada por sinterização e a placa comercializada pelo mercado nacional.

4.1 Método de sinterização

A placa induzida original foi submetida ao ensaio de análise química para conhecer os elementos químicos e as quantidades destes. De posse dos resultados, foram selecionados os pós dos elementos químicos necessários e na quantidade mais próxima de acordo com a placa original. A placa induzida possui as dimensões de 25mm de comprimento por 18mm de largura por 4mm de espessura. Considerando as dimensões e análise química foi proposta a fabricação da placa induzida pelo processo de sinterização.

Para realizar o procedimento de sinterização, os pós-metálicos com aditivo passaram pelo misturador, após foram colocados na cavidade de uma matriz, em seguida foram prensados, inicialmente com uma pré-carga de 70MPa e depois com 700MPa na prensagem final. Posteriormente, as placas compactadas passaram pelas fases de pré-aquecimento em 500°C por 30 minutos, aquecimento e manutenção da temperatura em 1100°C durante 30 minutos, posteriormente houve resfriamento lento. Após a sinterização a placa fabricada necessitou de retífica deixando-a com excelente acabamento espelhado e uniforme, para isso utilizou-se o rebolo de nitreto cúbico de boro. Após usinagem foi necessário realizar as furações e o chanfro no furo central para assentamento do parafuso, conforme placa original

4.2 Ensaio de análise química e ensaio de dureza

A análise química foi conduzida utilizando a espectrometria ICP, uma técnica avançada de análise química instrumental que proporciona a capacidade de examinar diversos elementos simultaneamente. A espectrometria ICP destaca-se pela sua sensibilidade, permitindo a detecção e análise precisa de elementos em

níveis extremamente baixos, da ordem de 1 a 10 partes por bilhão. Essa técnica é particularmente valiosa quando se trata de amostras com concentrações reduzidas de elementos químicos, garantindo resultados confiáveis e de alta precisão.

Neste procedimento, uma fonte de plasma devidamente aquecida, desempenha o papel crucial de excitar os átomos até o ponto em que emitem fótons de luz com comprimentos de onda específicos e distintivos para cada elemento das amostras em estudo. Esta abordagem permite uma identificação precisa e sensível dos constituintes químicos presentes nas amostras, podendo então determinar com precisão o tipo de material. Para assegurar a integridade dos resultados, as amostras passam por um estágio de digestão ácida. Este procedimento visa a remoção eficaz de compostos orgânicos que possam interferir na análise, garantindo assim a pureza das amostras. A limpeza meticulosa é essencial para evitar distorções nos dados e assegurar a confiabilidade dos resultados obtidos.

Destaca-se que o emprego dessa técnica integrada, envolvendo a fonte de plasma e a digestão ácida, representa uma abordagem avançada e eficaz na detecção de elementos químicos, contribuindo desta forma para a precisão e validade dos resultados laboratoriais.

O teste mecânico de dureza superficial foi realizado em três áreas da superfície das placas de atracamento, onde foi calculado a média, para assegurar a confiabilidade do procedimento. Este ensaio foi realizado na escala Brinell onde um penetrador esférico e duro foi forçado contra a superfície do material das placas. Durante o ensaio, a carga padrão de 187,5kgf foi mantida durante 20 segundos. O diâmetro da impressão no material foi medido com microscópio especial, essa medição foi convertida em um número na escala Brinell HB (Hardness Brinell) com auxílio de um gráfico.

4.3 Ensaio de abrasão

O ensaio de desgaste por microabrasão foi meticulosamente conduzido utilizando um equipamento da marca *Anton Paar*. Este procedimento envolveu o uso de uma esfera giratória, a qual foi aplicada com pressão sobre a amostra, enquanto simultaneamente uma suspensão abrasiva era gotejada estrategicamente na zona de contato entre a esfera e a peça em análise. O abrasivo selecionado para este estudo foi a alumina (Al_2O_3), previamente preparada em uma solução diluída

contendo 30% de concentração em água destilada. A escolha da alumina como abrasivo é fundamentada em suas propriedades abrasivas bem estabelecidas e na sua capacidade de representar condições reais de desgaste.

As Figuras 32 e 33 proporcionam uma visualização elucidativa do equipamento empregado durante o ensaio de abrasão. Na Figura 32, é possível observar o dispositivo em si, enquanto a Figura 33 destaca o processo de gotejamento preciso da suspensão abrasiva sobre a esfera rotativa.

Figura 32. Equipamento para ensaio de abrasão



Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 33. Gotejamento na esfera rotativa



Fonte: Próprio autor, 2023.

Para que fosse mantida uma concentração homogênea da solução abrasiva, foi utilizado um agitador magnético ao longo de todo o ensaio.

Assim, após uma fase de pré-teste, foram definidos os melhores parâmetros a serem utilizados no ensaio. Na tabela 4, estão relacionados os parâmetros adotados no ensaio de micro abrasão.

Tabela 4 – Parâmetros do ensaio de microabrasão.

Parâmetro	Valor	Unidade
Diâmetro da esfera - aço SAE 52100	25,4	mm
Concentração do abrasivo	30	%
Taxa de gotejamento do abrasivo	45	gotas/min
Carga Normal	0,4	N
Rotação	200	rpm
Tempo de contato	10,30 e 60	min

Fonte: adaptado pelo autor baseado em Drumond *et al.* (2020).

Antes de iniciar os testes, todas as três amostras de cada placa foram cuidadosamente pesadas em uma balança de alta precisão. Após a realização de cada ensaio, com durações de 10 minutos, 30 minutos e 60 minutos, cada placa foi novamente submetida à pesagem para quantificar a perda de massa.

Essa abordagem sistemática permitiu a comparação dos resultados obtidos entre as três placas em estudo, fornecendo uma análise abrangente da variação de massa ao longo do tempo e evidenciando possíveis diferenças de desempenho entre elas.

Foram também obtidas imagens ampliadas das calotas formadas, por meio de lupa com aumento de 25 vezes. A Figura 34 ilustra uma das imagens obtidas durante o processo de análise. Para cada uma das três placas analisadas, foram capturadas três imagens distintas de cada calota.

Figura 34. Calota ampliada 25 vezes



Fonte: Próprio autor, 2023.

Posteriormente, procedeu-se à medição de cada diâmetro de todas as calotas, realizando cada medida três vezes com o auxílio do software *Image J*. O conjunto de resultados obtidos permitiu a realização de comparações detalhadas entre as diferentes amostras, contribuindo para uma análise precisa e robusta do fenômeno em estudo.

4.4 Ensaio de corrosão

O ensaio de corrosão foi realizado pela técnica eletroquímica de polarização. Possuindo curto tempo de experimentação para obter a taxa de corrosão. O procedimento de ensaio foi dividido em duas etapas, primeiro foi medido o Potencial de Circuito Aberto (OCP – *Open Circuit Potential*) para determinar o ponto de partida do qual o ensaio se inicia. Após, foi aplicado a polarização potenciodinâmica (PDP – *Potentiodynamic Polarization*), técnica utilizada para obtenção das curvas de polarização, registro da corrente gerada e comportamento eletroquímico do material. Na figura 35, está o equipamento utilizado no processo de obtenção da taxa de corrosão.

Figura 35. Equipamento para técnica eletroquímica de polarização



Fonte: Próprio autor, 2023.

Na Figura 36, observa-se o recipiente designado para a acomodação da amostra, cuja taxa de corrosão foi cuidadosamente medida. No contexto desta configuração, o fio condutor de cobre do corpo de prova da amostra está fixado na

garra número 1, enquanto o número 2 refere-se ao fio conectado ao eletrodo de referência e o número 3 está associado ao fio conectado ao contra eletrodo.

O fluido presente no recipiente é composto por água destilada com 3,5% de NaCl, proporcionando assim um ambiente propício para as análises e experimentos conduzidos neste sistema.

Figura 36. Amostra no processo de corrosão



Fonte: Próprio autor, 2023.

Antes do ensaio foram embutidas a frio nove amostras, sendo três de cada placa em estudo, na figura 37 estão as amostras embutidas para exemplificar.

Figura 37. Amostras embutidas



Fonte: Próprio autor, 2023.

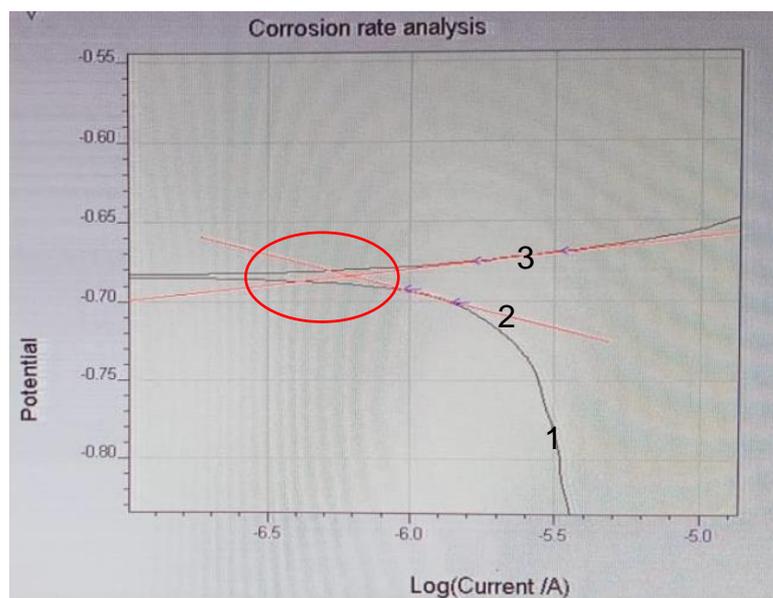
Na tabela 5, estão os parâmetros do ensaio de corrosão adotados para os três tipos de placas em estudo.

Tabela 5 – Parâmetros do ensaio de corrosão para as placas

Tempo de medição OCP - Min	Tempo de medição PPD - Min	Faixa de medição - mV	Velocidade de varredura - mV/s	Concentração da solução - %	Temperatura de ensaio - °C
60	60	(-) 0.250 a 0.250	10mV/s	3,5 de NaCl	25 ± 2

Fonte: Próprio autor, 2023.

Após a realização do ensaio de PDP, as retas de *Tafel* foram meticulosamente delineadas para cada amostra, permitindo a determinação precisa da taxa de corrosão para cada material ou placa induzida. A Figura 38 apresenta a representação visual do software utilizado para traçar essas retas e obter as taxas de corrosão correspondentes. Este procedimento oferece uma análise aprofundada, fornecendo informações valiosas sobre o desempenho corrosivo de cada material testado.

Figura 38. Curva de *Tafel*

Fonte: Próprio autor, 2023.

Curvas de polarização potencioestáticas são ferramentas cruciais na determinação do potencial de corrosão localizada, particularmente em processos de corrosão por pite. Essa técnica envolve a aplicação de potenciais anódicos crescentes enquanto a corrente é registrada em cada potencial aplicado. O decaimento subsequente da corrente é então monitorado em função do tempo ou da densidade de corrente, permitindo uma análise detalhada da suscetibilidade à

corrosão localizada em materiais metálicos. Ainda sobre a figura 38, é importante destacar que o número 1 refere-se à curva anódica. Quando essa curva assume a forma de um "V" e começa a ascender, isso indica o início do processo de corrosão, acompanhado pelo aumento da corrente. Para determinar a taxa de corrosão, é necessário traçar as retas de *Tafel*, identificadas como números 2 e 3 na respectiva figura 38. É crucial observar que a interseção dessas retas deve ocorrer no ponto médio da curva de polarização eletroquímica, proporcionando uma análise precisa do comportamento corrosivo do material em questão.

4.5 Teste de atracamento

O teste de atracamento consiste em certificar-se que a placa será atraída ou atracada em um limiar de corrente exato, que necessita ser perfeitamente ajustado para o correto funcionamento do motor. O teste foi realizado com a bomba unitária na mesma condição, nas mesmas folgas de montagem, substituindo-se apenas a placa de atracamento. Com uma fonte de corrente elétrica de 12 A, os terminais da fonte são fixados no eletroímã e a corrente é aumentada progressivamente, até que se ouça um som característico, indicando que houve indução elétrica, ou seja, a placa foi atraída pelo eletroímã, neste momento o valor de corrente deve ser lido no visor da fonte. Na figura 39 é visto a fonte utilizada para realizar o teste de alimentação de corrente juntamente com os terminais fixados no conector da bomba unitária.

Figura 39 – Fonte de corrente elétrica



Fonte: Próprio autor, 2023.

4.6 Teste funcional em bancada de prova

O teste funcional em bancada, consiste em montar a bomba unitária em uma bancada de teste designada para este fim. A bancada pode ser visualizada na figura 40 e tem por objetivo medir a quantidade de volume de óleo de calibração (ml) de teste injetado. O teste foi realizado com a bomba unitária na mesma condição, nas mesmas folgas de montagem, substituindo-se apenas a placa de atracamento, onde foi medido o volume de óleo de uma placa por vez.

Figura 40 – Bancada de teste



Fonte: Bancada de teste, 2020.

Para instalar a bomba unitária na bancada de teste, é necessário empregar um dispositivo conhecido como cambox. O cambox serve como estrutura de suporte para a montagem da bomba unitária e das mangueiras de entrada, saída e retorno de óleo, sendo fixado à bancada, onde será simulado o funcionamento do came de comando do motor. Nesse processo, um eixo excêntrico é utilizado para comprimir a mola da bomba unitária, desencadeando assim o processo de bombeamento do óleo de teste.

A bancada opera de maneira sincronizada, assemelhando-se ao funcionamento de um motor. É crucial determinar a frequência da corrente elétrica que o eletroímã da bomba unitária receberá, a rotação de trabalho e a quantidade de pulsos de corrente elétrica. A quantidade de pulsos deve ser interpretada como a quantidade de injeções de óleo de teste pressurizado que serão enviadas ao porta injetor mecânico, devidamente calibrado.

Com a definição desses parâmetros, estabeleceu-se o plano de teste, no qual cada bomba unitária é testada individualmente nessas condições para a coleta de resultados. A referência para o valor de volume de óleo é a bomba unitária com placa induzida original. O plano de teste segue as seguintes especificações:

- Largura de pulso: 2 ms;
- Número de pulsos: 350;
- Rotação: 250 RPM;
- Temperatura do óleo de calibração: 40 °C;
- 3 testes para cada placa induzida.

Na Figura 41, apresenta-se um exemplar de bomba unitária instalada na bancada de teste. A seta destacada em vermelho indica a posição da bomba unitária, enquanto os números identificam as diferentes conexões da bomba. A mangueira numerada como 1 corresponde à entrada de óleo, pela qual o fluido é direcionado à bomba unitária. A mangueira marcada com o número 2 representa o retorno de óleo proveniente da bomba. Por fim, a mangueira numerada como 3 indica a saída de óleo, conduzindo-o à proveta graduada. Neste dispositivo de medição, é possível realizar a leitura precisa do volume de óleo injetado pela bomba, proporcionando uma análise detalhada do desempenho de cada bomba.

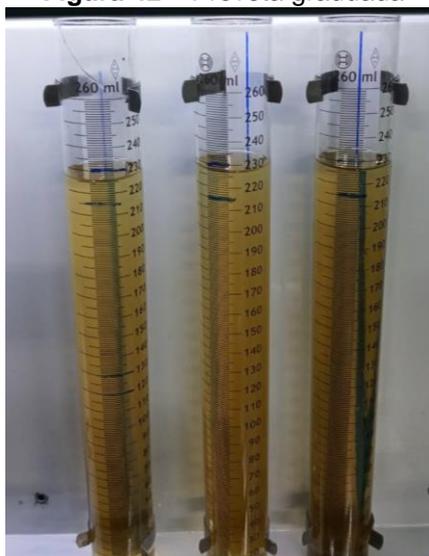
Figura 41 – Bomba unitária instalada em bancada



Fonte: Poka diesel, 2021.

Na Figura 42, apresenta-se a proveta graduada utilizada para a leitura do volume de óleo após a execução de testes funcionais em bancada. A fim de assegurar resultados confiáveis, foram conduzidos três testes independentes, sendo obtida a média e o desvio padrão dos dados resultantes. Cada conjunto de resultados foi analisado e posteriormente comparado, proporcionando uma avaliação desta etapa.

Figura 42 – Proveta graduada



Fonte: Próprio autor, 2023.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico, serão apresentados os resultados dos ensaios conduzidos com as três placas em estudo. Serão abordados de maneira abrangente as conclusões e observações obtidas a partir desses ensaios, proporcionando uma análise detalhada do desempenho e das características específicas de cada placa induzida.

Na tabela 6, estão os resultados do ensaio da análise química elementar realizadas nas três placas induzidas.

Tabela 6 - Análises químicas das placas induzidas (elementar)

	%C	%Al	% Si	% Fe	% Mn	% Ni	% Cu
Placa original	0,01	0,24	1,65	97,68	0,06	0,09	0,21
Placa fabricada	0,003	0,001	2,52	96,85	0,28	0,03	0,02
Placa de mercado	0,07	0	0,011	97,98	1,11	0,09	0,18

Fonte: Próprio autor, 2023.

A placa fabricada apresenta distinções significativas em comparação à placa original, notadamente na composição de alumínio e cobre, que registra uma diferença de 0,001% em relação a 0,24% de alumínio e 0,02% a 0,21% de cobre. No que se refere ao teor de silício, observa-se uma variação de 2,52% em comparação a 1,65%.

No que diz respeito à placa de mercado, é importante notar que ela mantém um teor de cobre bastante próximo ao da placa original, sendo 0,18% contra 0,21%. No entanto, uma distinção significativa é a ausência do elemento alumínio em sua composição. Além disso, há uma notável inversão no cenário do elemento manganês, enquanto a placa de mercado apresenta uma concentração de 1,11%, a placa original contém apenas 0,06%, e a placa fabricada registra 0,28%.

Essas discrepâncias na composição dos elementos podem ter implicações diretas no desempenho e na durabilidade das placas. É crucial considerar como

essas variações podem afetar as propriedades físicas e químicas na aplicação específica da placa. Portanto, uma análise mais aprofundada desses aspectos é fundamental para avaliar adequadamente a adequação das placas.

Na tabela 7, encontram-se os valores de indução de corrente elétrica das placas original, fabricada e de mercado.

Tabela 7 – Indução corrente elétrica

	Resultado 1	Resultado 2	Resultado 3	Média ± desvio padrão
Placa original	6,23A	6,24A	6,22A	6,23 ± 0,011A
Placa fabricada	6,19A	6,20A	6,18A	6,19 ± 0,006A
Placa de mercado	5,95A	5,97A	5,94A	5,95 ± 0,015A

Fonte: Próprio autor, 2023.

Apesar das divergências nos teores dos elementos químicos identificados, os resultados das placas original e fabricada revelam uma notável similaridade, com uma discrepância de apenas 0,04A. Isso sugere que a placa fabricada pode ser considerada aprovada para uso. Em contraste, a placa de mercado exhibe valores substancialmente discrepantes em relação à placa original, evidenciando uma diferença média de 0,28A.

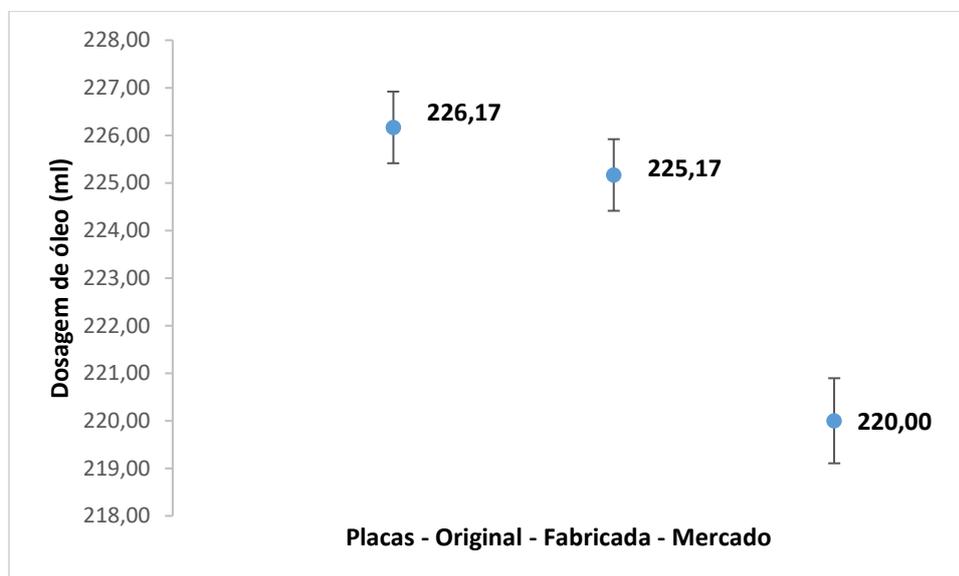
Essa disparidade está intrinsecamente ligada aos teores de silício presentes na composição da placa. Almeida (2013) destaca que a presença de silício na liga metálica contribui para o aumento da resistividade elétrica do material. Batistela (2001) informa que lâminas de aço silício possuem um desempenho magnético superior ao aço comum.

Essas características proporcionam ao material das placas original e fabricada um potencial de indução elétrica mais elevado e a capacidade de aplicar um campo magnético em diversas direções, com variação mínima de perda. A baixa concentração de silício na liga da placa de mercado resulta em uma resistividade elétrica inferior, deixando com resultados diferentes das demais placas.

Na figura 43, estão os valores encontrados após o teste funcional em bancada de cada bomba unitária, quando aplicada com uma das três placas em estudo. Nota-se que a placa de mercado possui resultados discrepantes em relação

as placas original e fabricada, ou seja, a bomba unitária injeta menos óleo quando aplicada com a placa de mercado.

Figura 43 – Resultado do teste de volume de óleo em ml



Fonte: Próprio autor, 2023.

Este resultado está intimamente ligado à disparidade na composição química dos materiais, notadamente no teor dos elementos silício. Essa variação conduziu a divergências nos valores do teste de indução, sendo a placa de mercado a que apresentou menor indução elétrica. Como consequência direta dessa diferença, observou-se uma injeção de óleo inferior em comparação com as demais placas.

No comparativo entre a placa original e placa fabricada nota-se que existe similaridade nos resultados, apesar do valor médio da placa original ficar com o resultado acima em 1ml, 226,17ml contra 225,17ml, quando se considera o desvio padrão de 0,75ml, devido aos três testes realizados, percebe-se que os resultados se coincidem. Em contraste a placa de mercado apresenta um resultado abaixo das demais placas ficando com 220ml. O valor de corrente elétrica no teste de indução, tem influência na dosagem de volume de óleo injetado pela bomba, portanto o valor discrepante da placa de mercado resultou em um resultado abaixo das demais placas.

A diferença no teor de silício entre as placas original e fabricada, devido as suas quantidades (%) terem interferência na resistividade elétrica e

consequentemente no magnetismo de acordo com os autores Almeida (2013) e Batistela (2001) respectivamente, não influenciou de modo significativo o resultado de dosagem de volume de óleo. Dessa forma, a análise aponta para a aprovação da placa fabricada nesta etapa, dada sua notável conformidade com a placa original. Por outro lado, a placa de mercado demonstra diferenças substanciais, podendo ocorrer problemas na aplicação.

Na Tabela 8, são apresentados os resultados de dureza Brinell para as três placas em estudo, sendo a placa original considerada como o valor de referência. Notavelmente, a placa fabricada, apesar de possuir níveis mais elevados de silício e manganês, elementos que tendem a contribuir para o aumento da dureza, apresentou um resultado praticamente idêntico quando comparado à placa original. Esse achado sugere que a influência do teor desses elementos na dureza não foi tão significativa quanto se poderia esperar.

Tabela 8 – Durezas superficiais – Unidade de medida HB

	Dureza	Dureza	Dureza	Média
Placa Original	200	199	200	199,7 ± 0,57
Placa fabricada	202	195	203	200 ± 4,39
Placa de mercado	171	168	170	170 ± 1,53

Fonte: Próprio autor, 2023.

Contrastando com isso, a placa de mercado, embora tenha uma porcentagem mais elevada de manganês em sua composição, elemento que de acordo com Regis (2010) melhora a resistência ao desgaste e ao impacto, revelou uma dureza inferior em aproximadamente 15% em relação a ambas as placas. Neste sentido Gorni (1997) informa que quando existe uma combinação de elementos de liga, como silício e manganês por exemplo, ocorre endurecimento da liga, podendo ser maior que o esperado. Essa disparidade pode ser atribuída ao baixo teor de silício na liga metálica desta placa, indicando que, somente o alto teor de manganês, não foi suficiente no fortalecimento na dureza do material. O método de fabricação por sinterização também pode influenciar nos valores de dureza. Calderia (2021) informa que escolha da temperatura, por exemplo, é um dos fatores que pode alterar os

valores de dureza, pastilhas sinterizadas a 1200°C apresentaram valores de dureza menores que as tratadas a 1150°C.

Essas observações ressaltam a complexidade das interações entre os elementos da liga e destacam a importância de considerar não apenas a concentração individual de cada componente, mas também suas inter-relações na determinação das propriedades mecânicas, como a dureza, das placas em estudo.

Outro ensaio relevante, foi o de desgaste por abrasão, ensaio este que produz uma calota esférica marcada na superfície das placas em estudo, conforme pode ser visualizado na figura 44.

Figura 44 – Placa induzida após teste de abrasão



Fonte: Próprio autor, 2023.

Este ensaio foi analisado em duas etapas. Na primeira etapa, está a tabela 9 com os valores das massas das placas antes e depois de cada ensaio, com 10 minutos, 30 minutos e 60 minutos.

Tabela 9 – Abrasão – Perda de massa após ensaio

	Peso inicial	Massa após 10 minutos	Massa após 30 minutos	Massa após 60 minutos	Unidade
Placa original	11,003	11,003	11,002	11,002	g
Placa fabricada	10,942	10,942	10,941	10,939	g
Placa de mercado	11,798	11,796	11,975	11,793	g

Fonte: Próprio autor, 2023.

Na segunda etapa do experimento, procedeu-se à mensuração dos diâmetros das calotas (impressões) resultantes do teste de abrasão nas placas original, fabricada e de mercado, cujos resultados encontram-se na Tabela 10. Além da coleta de dados quantitativos, imagens das calotas formadas foram capturadas, utilizando um aumento de 25 vezes, em todas as três placas em análise. A determinação precisa do diâmetro de cada calota foi realizada por meio do emprego de um software de análise de imagens, denominado *Image j*.

Tabela 10 – Abrasão – Diâmetro das calotas

	Diâmetro após 10 minutos	Diâmetro após 30 minutos	Diâmetro após 60 minutos	Unidade
Placa original	2,80 ± 0,10	3,60 ± 0,10	3,90 ± 0,10	mm
Placa fabricada	3,00 ± 0,10	3,80 ± 0,10	4,05 ± 0,10	mm
Placa de mercado	3,00 ± 0,10	4,00 ± 0,10	4,20 ± 0,10	mm

Fonte: Próprio autor, 2023.

Observa-se nestas tabelas, que a perda de massa está relacionada com o aumento do diâmetro da calota esférica impressa nas placas. A placa original apresentou melhor desempenho na relação perda de massa e aumento de diâmetro, em todo o ensaio perdeu apenas 0,001g de massa, obtendo diâmetro da calota em 2,80mm com 10 minutos de ensaio e diâmetro final em 3,90mm com 60 minutos de ensaio. Em relação a placa fabricada esta apresentou resultados melhores que a placa de mercado, em relação a placa original seu desempenho ficou abaixo, o diâmetro final da placa fabricada ficou em 4,05mm e perda total de massa em 0,003g. A placa de mercado apresentou o pior desempenho entre as três placas, com maior perda de massa e maior diâmetro com 30 e 60 minutos de ensaio.

Essa diferença no ensaio de resistência mecânica sugere que a combinação dos elementos silício e manganês nas placas original e fabricada contribuiu aumentar a resistência mecânica, conforme informado por Gorni (1997). Apesar da placa de mercado possuir uma maior porcentagem de manganês, ela mostrou-se com resultados inferior, o que pode estar relacionado com o baixo teor de silício presente na liga.

Foi realizado também o ensaio de corrosão, cujo resultado encontra-se na tabela 11, valores estes que foram obtidos pela técnica eletroquímica de polarização em meio salino com 3,5% em água destilada.

Tabela 11 – Taxa de corrosão

	Taxa de corrosão 1	Taxa de corrosão 2	Taxa de corrosão 3	Média	Unidade
Placa original	0,011	0,014	0,015	0,013 ± 0,000043	mm/y
Placa fabricada	0,028	0,026	0,030	0,028 ± 0,000001	mm/y
Placa de mercado	0,062	0,064	0,065	0,064 ± 0,000023	mm/y

Fonte: Próprio autor, 2023.

Ao analisar-se, percebe-se que as placas fabricadas e de mercado possuem valores de taxa de corrosão superiores ao da placa original. A placa fabricada apresentou resultado melhor em mais de duas vezes em relação a placa de mercado, indicando melhor desempenho da placa fabricada, porém inferior a placa original. A unidade de medida da taxa de corrosão é analisada em milímetros por ano ou milimeters per year (mm/y). O desempenho superior da placa original pode ser atribuído à presença significativa dos elementos alumínio (0,24%), níquel (0,09%) e cobre (0,21%). Regis (2010) informa que o alumínio e níquel por serem resistentes a corrosão, melhoram a resistência do aço a corrosão e Jordà e Guedes (2008) relatam que a adição de cobre também auxiliam na resistência a corrosão do aço.

Por outro lado, na placa fabricada, observa-se uma considerável redução nos teores desses elementos, alumínio (0,001%), níquel (0,03%) e cobre (0,02%), o que pode impactar negativamente na resistência à corrosão do material. Ao comparar com a placa de mercado, nota-se que o alumínio está completamente ausente, no entanto os teores de cobre (0,18%) e níquel (0,09%) são semelhantes à da placa original.

Essas variações na composição química podem explicar as diferenças de desempenho entre as placas, destacando a importância dos elementos específicos na resistência e durabilidade do material.

Ao analisar os resultados, observa-se uma notável semelhança entre as placas original e fabricada, destacando-se especialmente a dureza mecânica superficial, e a relação entre o teste de corrente elétrica (indução) e o teste funcional em bancada que mediu a dosagem de óleo expelida pela bomba. Nas demais análises a placa original apresentou-se ligeiramente superior, mas é importante ressaltar que os resultados da placa fabricada são positivos, indicando sua viabilidade para aplicação em larga escala nas bombas unitárias.

Em contraste, a placa de mercado demonstrou discrepâncias significativas nas análises comparativas com as outras placas, apresentando resultados inferiores. A diferença nos teores de silício, manganês e alumínio entre as placas original e fabricada teve impacto limitado nos resultados gerais. No entanto, a presença de baixo teor de silício e elevado teor de manganês na placa de mercado influenciou de maneira significativa em diversas análises, notadamente na dureza mecânica, consumo de corrente elétrica, dosagem de óleo no teste funcional em bancada e abrasão.

Assim, apesar das diferenças identificadas, a placa fabricada demonstra ser uma opção viável para utilização em bombas unitárias em grande escala, enquanto a placa de mercado não se mostra recomendada devido às disparidades nos resultados analisados.

6 CONCLUSÕES

O estudo proposto consistiu na fabricação de uma placa induzida pelo método de sinterização, aplicada na bomba unitária presente no sistema de alimentação de combustível dos motores diesel. No comparativo entre as placas fabricada e de mercado, foi possível notar uma diferença acentuada no teor dos elementos da composição química de cada placa, destacando-se o teor de silício, em que placa de mercado possui 0,11% e a placa fabricada possui 2,52%. Possuiu resultado discrepante no teste indutivo por corrente elétrica e menor valor de volume (vazão) de óleo no teste funcional em bancada. Notou-se então que a placa fabricada possuiu melhor desempenho nos ensaios realizados se comparada com a placa de mercado.

No comparativo entre a placa original e placa fabricada, constatou-se que a placa fabricada obteve resultados bem aproximados da placa original. A dureza mecânica foi praticamente a mesma em ambos os materiais. Em relação a composição química a diferença mais relevante encontrada foi o teor de silício em 52,7% para mais na placa fabricada. No entanto, mesmo com estas diferenças, no teste de corrente elétrica (indução) os resultados foram bem aproximados, sendo a diferença de apenas 0,04A, como consequência no teste prático de volume de óleo (vazão) em bancada, o resultado foi similar, com a diferença de apenas 1ml. Levando em conta o valor de desvio padrão de 0,75ml, os resultados de ambas as placas ficam dentro da mesma margem. Mesmo com tais diferenças a placa fabricada mostrou-se apta para substituí-la.

Estes resultados mostram que a diferença na composição química entre as placas originais e fabricadas, não afetaram de modo significativos os resultados práticos da placa fabricada. Mesmo com as diferenças encontradas, a placa fabricada está apta ser utilizadas nas bombas unitárias. O processo de fabricação da placa fabricada é outro ponto de atenção, sendo um processo eficiente e viável economicamente, além disso, caso seja necessário, pode-se alterar os parâmetros aquecimento, prensagem e resfriamento para melhoramento do material acabado, sem influenciar de modo significativo no custo final. O custo de fabricação da placa sinterizada fica em cerca de 40% menor que o preço de aquisição da placa de mercado.

Por outro lado, a diferença acentuada na composição química da placa de mercado, afetou os resultados de consumo de corrente elétrica como consequência afetou a dosagem de combustível da bomba unitária. Outro ponto de atenção foi a dureza mecânica superficial e a abrasão menores, o que poderá provocar desgaste na bomba unitária com menor tempo de utilização. A placa de mercado, não está necessariamente reprovada, visto que esta placa é amplamente utilizada no mercado de reparação de bombas unitárias, mas é notório que podem ocorrer problemas na aplicação, pois nos testes realizados, principalmente no teste funcional de volume de óleo em bancada, houve uma vazão menor.

7 RELEVANCIA DOS RESULTADOS

- Placa fabricada com desempenho semelhante à original no ensaio de dureza, volume de óleo no teste em bancada e teste de indução de corrente elétrica. Nos ensaios de abrasão e corrosão a placa original é levemente superior. Estes resultados asseguram praticamente a mesma durabilidade das placas fabricadas em relação as placas originais;
- O custo final de produção da placa fabricada é aproximadamente 40% menor em comparação com aquelas adquiridas no mercado paralelo. Além disso, destaca-se pelos resultados superiores obtidos nos testes conduzidos ao longo deste estudo;
- Contribuição significativa para o fortalecimento da indústria nacional, permitindo o abastecimento dos fornecedores com material de alta qualidade e reduzindo a necessidade de importações;

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aperfeiçoamento no estudo da placa fabricada em aço silício pelo método de sinterização, referente no que a sinterização pode afetar o eletromagnetismo;
- Aprimoramento do estudo da influência das propriedades físicas e estruturais da placa de aço silício, nas propriedades eletromagnéticas;
- Analisar a viabilidade da implementação de placas de aço silício nas unidades injetoras diesel do sistema EUI, popularmente conhecido como bomba-bico. Neste sistema inovador, o diesel é pressurizado e injetado no interior do motor por meio de um único componente;

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Adriano Alex de. **Influência do tamanho de grão, teor de silício e frequência de excitação nas perdas anômalas do aço GNO**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

AMARO, L. O. **Estudo da resistência à corrosão do aço inoxidável duplex UNS S31803 ou SAF 2205 submetido a processo de soldagem**. 2006. 72f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências de Materiais Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2006.

BANCADA DE TESTE. **Bancada de testes boss EPS619**. 2020. Disponível em: <https://pt.made-in-china.com/co_hespring/product_Test-Bench-BOSS-EPS-619_hhyiyseug.html>. Acesso em 16 set. 2022.

BARBOSA RODRÍGUEZ, Edwin Fabián. **Diseño de un dispositivo de accionamiento y control para sistemas de inyección diesel EUI-UPS**. 2017

BATISTELA, Nelson Jhoe et al. **Caracterização e modelagem eletromagnética de lâminas de aço silício**. 2001.

BELLO J. O., WOOD R. J. K. e WHARTON J. A. **Synergistic effects of micro-abrasion–corrosion of UNS S30403, S31603 and S32760 stainless steels [publicação periódica]**. Elsevier, 2007. - 149–159 : Vol. 263.

BENNETT, S. Engine cooling systems. **Modern diesel technology: diesel engines**. Nova York: Cengage Learning, p. 139-163, 2009.

BIANCHI, E. C. **Ação da geometria teórica do cavaco no desgaste de rebolos de CBN com ligante resinoide**. Tese (doutorado em engenharia mecânica) – Escola de engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

BLACK, S.C.; CHILES, V.; LISSAMAN, A.J.; MARTIN, S.J. **Principles of engineering manufacture**, 3 ed., Arnold, 1996.

BLOG TÉCNICO AUTOMOTRIZ. **Bombas de Inyección Diesel UIS y UPS**. 2013. Disponível em: <<https://www.autoavance.co/blog-tecnico-automotriz/130-bombas-de-inyeccion-diesel-uis-y-ups/>>. Acesso em 15 set. 2022.

BOEHS, Lourival et al. **Metalurgia do pó empregada na fabricação de ferramentas de aço rápido**. 2000.

BOSCH. **Manual resumido EPS815 e EPS945 – banco de provas para bombas de injeção e Cam847**. Edição 2010.

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. São Paulo: Blucher, 2010. V.1.

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. São Paulo: Blucher, 2012. V.2.

CABRERA, Ramon José Soca. **Motores de Combustión interna, pruebas Y características de inyección diésel**. Departamento de ingeniería mecánica agrícola. Universidad Autónoma de Chapingo. 2021.

CAI, R., et al. **Wear mechanism evolution on brake discs for reduced wear and particulate emissions**. Wear 452-453, 2020.

CHANG, C.; SMITH, G.; LITTLEFAIR, G. **Machinability of sintered distaloy HP-1 components**. **SAE TRANSACTIONS**: Journal of materials and manufacturing, v. 110, p. 269-274, 2001

CHIAVERINI, V. **Metalurgia do pó: técnicas e produtos**. ABM, 3. ed., 1992.

DE TOLEDO, Thalita França de. **Siliciação de aço silício**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) REDEMAT – Universidade federal de Ouro Preto.

DOS SANTOS, Marcelo Braga et al. **Abrasão-Corrosão: Novas informações a partir da medida das forças no contato**. 2015

DRUMOND, Ramon Martins et al. **Avaliação do desgaste por microabrasão do aço aisi m-35 revestido por dlc–diamond-like carbon**. Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia-ISSN: 1984-5693, v. 12, 2020.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Advanced technical ceramics: Methods of test for ceramic coatings**. Brussels: DIN; 2001. DD ENV 1071-6: Determination of the abrasion resistance of coatings by a micro-abrasion wear test.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. v.1, Edgard Blucher, 1970.

FOXLUX. **Como testar um solenoide**. 2023. Disponível em: <<https://www.foxlux.com.br/blog/dicas/como-testar-um-solenoide/>>. Acesso em 12 mar.2023.

FREITAS, Marla Souza et al. **Modelagem teórica do campo magnético em solenoides**. Revista de trabalhos acadêmicos universo–são gonçalo, v. 1, n. 2, p. 286, 2016.

FROTA, Evanise Batista; VASCONCELOS, Nadja Maria Sales de. **Química ambiental**. Fortaleza-CE: edUECE. Ano 2019.

GERMAN, R.M. **Powder metallurgy science**. Princeton, NJ: MPIF, 2nd edition, 1984

GOMES, M. V. **Avaliação eletroquímica de resistência à corrosão uniforme do aço ABNT 1020 recoberto com níquel fósforo**. 72f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Graduação em Engenharia de Materiais, CEFET-MG, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2016.

GORNI, Antonio Augusto; CAVALCANTI, Celso Gomes. **Efeito dos Elementos de Liga sobre a Resistência à Deformação a Quente de Aços ao Carbono e Microligados**. In: II Congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgica e de Materiais. Anais... Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo. 1997.

GREETHAM, G. **Development and performance of infiltrated and non- infiltrated valve seat insert materials and their performance**. Powder Metall., v. 33, n. 2, p. 112-114, 1990.

JESUS FILHO, ES et al. **Usinagem e caracterização mecânica de materiais PM para insertos de sede de válvula**. In: Fórum de ciência de materiais. Trans Tech Publications Ltd, 2005. p. 79-85.

JESUS FILHO, EDSON Souza de. **Obtenção, usinagem e desgaste de ligas sinterizadas para aplicações automotivas**. 2006.

JORDÀ, Daniel Dalmau; GUEDES, Isabel Correia. **Influência do teor de cobre no aço carbono quanto à resistência à corrosão dos filmes formados em uma câmara de corrosão atmosférica**. In: INTERCORR 2008: anais do congresso. 2008.

JOST, H. Tribology – **origin and future**. Wear 136, 1-17, 1990

KLOCKE, F. e KONIG, W. **Appropriate conditioning strategies increase the performance capabilities of vitrified-bond CBN grinding wheels**. Annals of CIRP, V.44/1, p. 305-310, 1995.

MARCONDES, F.C. **A História do metal duro**. Sandvik, p. 219-22, 1990.

MEHL, Ewaldo LM. Fontes Chaveadas. **Apostila-Centro Politécnico–Universidade Federal do Paraná**. Revisão, 2002.

MERCEDES BENZ. **Fundamental de serviço treinamento técnico**. Ed A. Campinas/SP. 2009.

MOSES, A. J. **Electrical steels: past, present and future developments**. IEE Proceedings A (Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education), v. 137, n. 5, p. 233-245, 1990.

OLIVEIRA, M.M.; BOLTON, J.D. **High-speed steels: increasing wear resistance by adding ceramic particles**. J. Mat. Processig Technology, v. 92-93, p. 15-20, 1999

POKA DIESEL. **Cambox acoplado na bancada de teste**. 2021. Disponível em: < <https://pokadiesel.com.br/bancada-de-testes/>>. Acesso em 16 set. 2022.

RACHE, Marco. **Mecânica a Diesel – Caminhões, Pick – Ups, Barcos**. Hemus Livraria e Editora, 2004. Cap. 1 e 2.

REGIS, Roosevelt de Carvalho. **Influência dos Elementos de Liga nos Aços Carbono, Baixa e Média Liga**. Uma revisão. 2010.

RIBEIRO, R. F. **Avaliação da resistência a corrosão de uma junta de aço inoxidável duplex UNS S31803 soldada por processo a fricção com pino consumível**. 2014. 91f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RICHERSON, D.W. **Modern ceramic engineering: properties, processing, and use in design**. New York, Marcel Dekker, 1992.

TAYLOR, C. F. **Análise dos motores de combustão interna**. São Paulo: Edgard Blucher. 1988.

TECNO DIESEL. **Sistema UPS (Sistema de Bomba Unitária)**. 2018. Disponível em: <<https://tecnodieselam.com.br/sistemas-eletronicos-ups-uis/>>. Acesso em 14 set. 2022.

HÜMMLER, F.; OBERACKER, R. **An introduction to powder metallurgy**. The University Press, Cambridge, 1993.

VARELLA, Carlos Alberto Alves; SANTOS, Gilmar de Souza. **Noções Básicas de Motores Diesel**. 1. ed. Seropédica/RJ: UFRJ, 2010. 1-44 p. Disponível em: http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT154_motores_e_tratores/Literatura/No%20E7%F5es%20B%E1sicas%20de%20Motores%20Diesel.pdf. Acesso em: 01 set. 2022.

WOLYNEC, Stephan. **Técnicas eletroquímicas de corrosão**. São Paulo. Editora da Universidade de São Paulo, 2003. 162 p.

ZAPATA, C. W. **Ciclo de palestras sobre metalurgia do pó**. FEJ/UDESC, Joinville, 1987.