



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA
PARAÍBA
DIRETORIA GERAL DO CAMPUS JOÃO PESSOA
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ALEXANDRE MIGUEL MARTINS SILVA BEZERRA

**DESENVOLVIMENTO E MONTAGEM DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA A
ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DE UM DIFERENCIAL AUTOMOTIVO COM
SISTEMA DE TRAVAMENTO NAS RODAS, UTILIZANDO TECNOLOGIA DE
IMPRESSÃO 3D.**

JOÃO PESSOA

2026

ALEXANDRE MIGUEL MARTINS SILVA BEZERRA

DESENVOLVIMENTO E MONTAGEM DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA A ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DE UM DIFERENCIAL AUTOMOTIVO COM SISTEMA DE TRAVAMENTO NAS RODAS, UTILIZANDO TECNOLOGIA DE IMPRESSÃO 3D.

Projeto de TCC apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Paraíba do Instituto Federal de João Pessoa.

Orientador: Me. Erick Zambrano Cordeiro

JOÃO PESSOA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *Campus* João Pessoa

B574d	<p>Bezerra, Alexandre Miguel Martins Silva.</p> <p>Desenvolvimento e montagem de uma bancada didática para análise do funcionamento de um diferencial automotivo com sistema de travamento nas rodas, utilizando tecnologia de impressão 3D / Alexandre Miguel Martins Silva Bezerra. – 2026.</p> <p>48 f. : il.</p> <p>TCC (Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Educação da Paraíba / Departamento de Ensino Superior / Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Mecânica, 2026.</p> <p>Orientador: Prof^o Me. Erick Zambrano Cordeiro.</p> <p>1. Engenharia de automóvel. 2. Diferencial automotivo. 3. Bancada didática. 4. Sistema de travamento. 5. Transmissão de potência. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 629.331(043)</p>
-------	--

ALEXANDRE MIGUEL MARTINS SILVA BEZERRA

**DESENVOLVIMENTO E MONTAGEM DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA A ANÁLISE DO
FUNCIONAMENTO DE UM DIFERENCIAL AUTOMOTIVO COM SISTEMA DE TRAVAMENTO NAS
RODAS, UTILIZANDO TECNOLOGIA DE IMPRESSÃO 3D**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC) submetido a
Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia
Mecânica, do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), como parte
dos requisitos institucionais para a obtenção do Título de
ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado em 08 de fevereiro de 2026.

Membros da Banca Examinadora:

Prof. Me. ERICK ZAMBRANO CORDEIRO

Instituto Federal da Paraíba –
Orientador

Profa. Dra. MICHELLINE NERY AZEVEDO LIMA

Instituto Federal da Paraíba
Examinador

Prof. Dr. GILVAN VIEIRA DE ANDRADE JUNIOR

Instituto Federal da Paraíba
Examinador

Documento assinado eletronicamente por:

- **Erick Zambrano Cordeiro**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 27/02/2026 11:35:39.
- **Gilvan Vieira de Andrade Junior**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 27/02/2026 11:47:16.
- **Michelline Nery Azevedo Lima**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 27/02/2026 16:58:50.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 27/02/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código 841571
Verificador: de96f16b34
Código de Autenticação:



AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, a Deus, por me conceder forças e sabedoria, por estar sempre ao meu lado durante todo este processo e por guiar meus passos até a conclusão desta importante e transformadora jornada.

Aos meus pais, Airton Bezerra da Luz e Francinalda Cidnea Martins Silva Bezerra, expresso minha mais profunda gratidão por todo o amor incondicional, pelos inúmeros sacrifícios realizados para que eu pudesse trilhar este caminho e pelo apoio constante em todas as decisões importantes da minha vida. A eles, dedico meu eterno amor e gratidão, pois nada do que eu fizer será suficiente para retribuir tudo o que fizeram por mim. Aos meus irmãos, Aleson Gabriel Martins Silva Bezerra e Anderson Rafael Martins Silva Bezerra, agradeço pelo carinho, incentivo e apoio ao longo desses anos.

À minha querida namorada, Andryny Ferreira Ortolan, agradeço por todo o amor, carinho, paciência e apoio incondicional. Sou grato por sua presença em um momento tão significativo da minha vida e por sempre me incentivar, de diversas formas, a buscar a melhor versão de mim mesmo, independentemente das circunstâncias.

Ao meu orientador, professor Erick Zambrano Cordeiro, registro meu sincero agradecimento por ter aceitado este desafio acadêmico, pela confiança, incentivo, dedicação e postura sempre positiva ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Laboratório Lâmpião Maker pelo suporte técnico, estrutural e acadêmico oferecido durante a realização deste trabalho, proporcionando um ambiente propício à aprendizagem prática, à pesquisa e à inovação. Estendo meus agradecimentos aos coordenadores do laboratório, os professores Gilvan Vieira de Andrade e Nadja da Nóbrega Rodrigues, pela orientação, disponibilidade, incentivo e contribuições fundamentais para o amadurecimento técnico e científico deste projeto.

A Murilo Fernando Silva e Silva, Kaynnan Luiz da Silva Araújo e todos os colegas de classe que compartilharam comigo esta jornada, tornando-a mais leve e gratificante, deixo meu agradecimento.

Ao Instituto Federal da Paraíba, aos meus professores, à coordenadora Prof.^a Dra. Michelline Nery Azevedo Lima e a todos os profissionais com quem tive a oportunidade de conviver ao longo dessa caminhada, expresso minha eterna gratidão.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para a minha formação acadêmica. A todos, o meu muito obrigado.

RESUMO

O diferencial automotivo desempenha um papel essencial no sistema de transmissão dos veículos, pois distribui o torque de maneira equilibrada entre as rodas motrizes, tanto quando estão alinhadas e girando na mesma velocidade quanto em curvas, quando as rotações das rodas são distintas. Este estudo apresenta o projeto e a construção de uma bancada didática portátil, destinada ao ensino do funcionamento do diferencial automotivo, equipada com acionamento por manivela e um mecanismo de travamento nas rodas. A bancada desenvolvida permite a análise do comportamento do diferencial em condições controladas, possibilitando a observação das variações na rotação das rodas com o sistema de travamento ativado. A metodologia adotada abrangeu revisão bibliográfica, dimensionamento do sistema de acionamento, projeto da estrutura mecânica, desenvolvimento do mecanismo de travamento, construção da bancada e realização de testes experimentais.

Palavras-chave: Diferencial automotivo. Bancada didática. Sistema de travamento. Transmissão de potência.

ABSTRACT

The automotive differential plays an essential role in a vehicle's transmission system, as it distributes torque evenly between the drive wheels, both when they are aligned and rotating at the same speed and during cornering, when the wheel speeds differ. This study presents the design and construction of a portable didactic test bench intended for teaching the operation of an automotive differential, equipped with a hand-crank drive system and a wheel locking mechanism. The developed bench allows the analysis of the differential's behavior under controlled conditions, enabling the observation of variations in wheel rotation when the locking system is activated. The adopted methodology included a literature review, sizing of the drive system, mechanical structure design, development of the locking mechanism, construction of the bench, and experimental testing.

Keywords: Automotive differential. Didactic test bench. Locking system. Power transmission.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Engenheiro Karl Friedrich Michael Benz.	12
Figura 2 – Engenheiro Onésiphore Pecqueur	13
Figura 3 – Componentes internos do diferencial	14
Figura 4 – Fundição em areia	17
Figura 5 – Fundição em moldes metálicos	18
Figura 6 – Metalurgia do pó	19
Figura 7 – InvoMilling.....	21
Figura 8 – Power Skiving	22
Figura 9 – Diferencial aberto	23
Figura 10 – Diferencial autoblocante	24
Figura 11 – Diferencial Torsen.....	25
Figura 12 – Diferencial bloqueável	26
Figura 13 - Sistema de transmissão automotiva	26
Figura 14 – Embreagem.....	27
Figura 15 – Caixa de Mudanças	28
Figura 16 – Eixo Articulado	28
Figura 17 – Diferencial	29
Figura 18 – Semi-Árvore	29
Figura 19 – Filamento.....	35
Figura 20 – Impressora 3d (Ender 3v3KE).....	36
Figura 21 – Fatiador 3d.....	37
Figura 22 – Software de modelagem	37
Figura 23 - Modelagem tridimensional	38
Figura 24 – Impressão da engrenagem	40
Figura 25 – Diferencial impresso	40
Figura 26 – Peças do sistema de travamento	42
Figura 27 – Bancada didática	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AWD – *All Wheel Drive* (Tração Integral Permanente)

CAD – *Computer Aided Design* (Projeto Assistido por Computador)

CNC – *Computer Numerical Control* (Comando Numérico Computadorizado)

IFPB – Instituto Federal da Paraíba

LSD – *Limited Slip Differential* (Diferencial de Deslizamento Limitado)

MDF – *Medium Density Fiberboard* (Placa de Fibra de Média Densidade)

PETG – *Polyethylene Terephthalate Glycol* (Polietileno Tereftalato Glicol)

PLA – *Polylactic Acid* (Ácido Polilático)

SUV – *Sport Utility Vehicle* (Veículo Utilitário Esportivo)

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	11
2.1 Objetivo Geral	11
2.2 Objetivos Específicos	11
3 DIFERENCIAL AUTOMOTIVO: PRINCÍPIOS E FUNCIONALIDADE	12
3.1 História do Automóvel e os Primeiros Diferenciais	12
3.2 Diferencial automotivo	13
3.2.1 Componentes internos	14
3.3 Processo de fabricação do diferencial automotivo	15
3.3.1 Processos tradicionais	16
3.3.2 Processos inovadores	20
3.4 Tipos de Diferenciais e suas aplicações.....	22
3.4.1 Diferencial aberto	23
3.4.2 Diferencial autoblocante (Diferencial de deslizamento limitado)	23
3.4.3 Diferencial Torsen	24
3.4.4 Diferencial eletrônico	25
3.4.5 Diferencial bloqueável.....	25
3.5 Componentes de Transferência de Torque e Potência.....	26
3.5.1 Embreagem	27
3.5.2 Caixa de mudanças	27
3.5.3 Eixo Articulado.....	28
3.5.4 Diferencial	29
3.5.5 Semi-Árvore	29
4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO DIFERENCIAL AUTOMOTIVO	30
4.1 Análise de Torque, Relação de Transmissão e Esforços Mecânicos no Diferencial	30

5 METODOLOGIA.....	33
5.1 Revisão bibliográfica	33
5.2 Desenvolvimento do protótipo	34
5.2.1 Materiais utilizados.....	34
5.2.1.1 Placa de MDF	34
5.2.1.2 Filamento PLA e PETG.....	34
5.2.2 Equipamentos e Ferramentas Utilizadas.....	35
5.2.2.1 Impressora 3D.....	35
5.2.2.2 Fatiador 3D	36
5.2.2.3 Software de Modelagem	37
5.2.2.4 Ferramentas de Corte e Acabamento	38
5.3 Modelagem Tridimensional do Diferencial e do Sistema de Travamento	38
5.4 Fabricação das Peças	38
5.4.1 Peças do Diferencial	39
5.4.2 Peças do Sistema de Travamento	41
5.5 Montagem do Protótipo	42
5.5.1 Testes e Avaliação do Funcionamento do Protótipo	43
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
8 REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

O setor automotivo apresenta constante evolução tecnológica, exigindo dos engenheiros mecânicos uma formação cada vez mais sólida tanto do ponto de vista teórico quanto prático veicular, o diferencial automotivo destaca-se por sua função essencial de permitir que as rodas motrizes girem a velocidades angulares distintas, especialmente durante a realização de curvas, garantindo estabilidade, dirigibilidade e segurança ao veículo (Milliken, 1995).

Apesar de sua relevância, o estudo do diferencial automotivo nos cursos de Engenharia Mecânica ainda ocorre, em grande parte, de forma teórica, com limitações no acesso a equipamentos experimentais que permitam a visualização clara de seu funcionamento interno e de fenômenos como a distribuição de torque e a diferença de rotação entre as rodas. Essa lacuna dificulta a assimilação completa dos conceitos abordados em disciplinas relacionadas à mecânica aplicada, transmissão de potência e dinâmica veicular (Juvinall; Marshek, 2012).

Paralelamente a esse cenário, a manufatura aditiva, popularmente conhecida como impressão 3D, tem se consolidado como uma tecnologia de grande relevância na engenharia moderna. Essa tecnologia permite a fabricação de componentes com geometrias complexas, redução de custos de prototipagem e maior flexibilidade no desenvolvimento de projetos, sendo amplamente aplicada em ambientes acadêmicos e industriais.

No contexto educacional, a impressão 3D destaca-se como uma ferramenta eficiente para o desenvolvimento de dispositivos experimentais personalizados, possibilitando a integração entre projeto, fabricação e validação prática, além de contribuir significativamente para o processo de ensino-aprendizagem (Volpato 2017).

Nesse contexto, este trabalho propõe o projeto e a construção de uma bancada didática para o estudo de um diferencial automotivo de carro, equipada com um sistema de travamento. A bancada foi desenvolvida utilizando, em grande parte, componentes fabricados por meio de impressão 3D, permitindo a redução de custos, facilidade de montagem e adaptação do projeto às necessidades didáticas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Projetar, construir e validar experimentalmente uma bancada didática para o estudo do funcionamento de um diferencial automotivo, utilizando um sistema de acionamento por manivela e um mecanismo de travamento, com o intuito de possibilitar a análise prática da distribuição de torque e da diferença de rotação entre as rodas. O projeto visa integrar à aplicação prática da manufatura aditiva (impressão 3D), contribuindo para o processo de ensino-aprendizagem no curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal da Paraíba.

2.2 Objetivos Específicos

- Estudar o funcionamento e os princípios mecânicos do diferencial automotivo;
- Analisar os principais tipos de diferenciais utilizados em veículos;
- Projetar a estrutura mecânica da bancada utilizando software de modelagem 3d;
- Montar o protótipo e implementar um sistema de travamento do diferencial;
- Realizar testes experimentais com o diferencial livre e travado e avaliar sua aplicabilidade como bancada didática para o ensino sobre o diferencial;

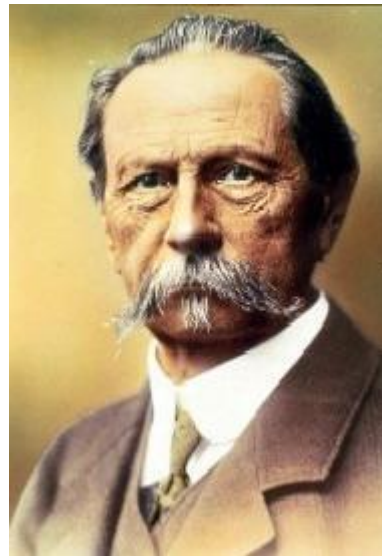
Os objetivos específicos deste trabalho foram definidos de modo a detalhar as etapas necessárias para o desenvolvimento da bancada didática, abrangendo desde o embasamento teórico até a validação experimental do sistema. Esses objetivos visam garantir a compreensão completa do funcionamento do diferencial automotivo e consolidar os conhecimentos adquiridos ao longo da graduação de engenharia mecânica.

3 DIFERENCIAL AUTOMOTIVO: PRINCÍPIOS E FUNCIONALIDADE

3.1 História do Automóvel e os Primeiros Diferenciais

O desenvolvimento do automóvel está diretamente ligado aos avanços tecnológicos ocorridos durante a Revolução Industrial, especialmente no século XIX, período marcado pela evolução das máquinas térmicas, sistemas de transmissão de potência e mecanismos de engrenagens. O primeiro automóvel reconhecido historicamente foi desenvolvido por Karl Benz (Figura 1) em 1885, movido por um motor a combustão interna, representando um marco fundamental na mobilidade moderna.

Figura 1 – Engenheiro Karl Friedrich Michael Benz.



Fonte: Engrenar Jr (2020)

Com o surgimento dos primeiros veículos autopropulsionados, tornou-se evidente a necessidade de mecanismos capazes de transmitir potência às rodas de forma eficiente, segura e adaptável às condições de movimento, especialmente durante curvas (Heisler, 2002). Nesse contexto, destaca-se o engenheiro francês Onésiphore Pecqueur, amplamente reconhecido na literatura técnica como o criador do diferencial mecânico aplicado a veículos terrestres (Encyclopaedia Britannica, 2023).

Em 1827, Onésiphore Pecqueur (Figura 2) desenvolveu e patenteou um sistema de engrenagens capaz de permitir que duas rodas solidárias ao mesmo eixo girassem a velocidades diferentes, mantendo a transmissão contínua de torque. Inicialmente concebido para veículos movidos a vapor, o diferencial de Pecqueur solucionou um problema crítico de dirigibilidade e

desgaste excessivo dos pneus, tornando-se posteriormente indispensável nos automóveis com motores a combustão interna (Heisler, 2002).

Figura 2 – Engenheiro Onésiphore Pecqueur



Fonte: Pecqueur Motorists (2023)

A invenção de Pecqueur representou um avanço decisivo para a engenharia automotiva, pois possibilitou maior estabilidade, eficiência energética e controle direcional dos veículos. A partir de sua concepção original, o diferencial passou por diversas evoluções construtivas, mantendo, entretanto, o mesmo princípio básico idealizado por seu criador, princípio este que permanece aplicado nos sistemas automotivos modernos (Heisler, 2002).

Dessa forma, a contribuição de Onésiphore Pecqueur consolida-se como um dos pilares fundamentais da transmissão automotiva, sendo essencial para a compreensão do funcionamento dos diferenciais atuais e para o desenvolvimento de projetos didáticos e experimentais.

3.2 Diferencial automotivo

O diferencial automotivo é um conjunto mecânico fundamental do sistema de transmissão, responsável por permitir que as rodas motrizes de um veículo girem a diferentes velocidades angulares, principalmente durante a realização de curvas. Esse mecanismo garante a distribuição adequada do torque proveniente do motor, assegurando estabilidade, controle direcional e redução de esforços mecânicos nos componentes do veículo.

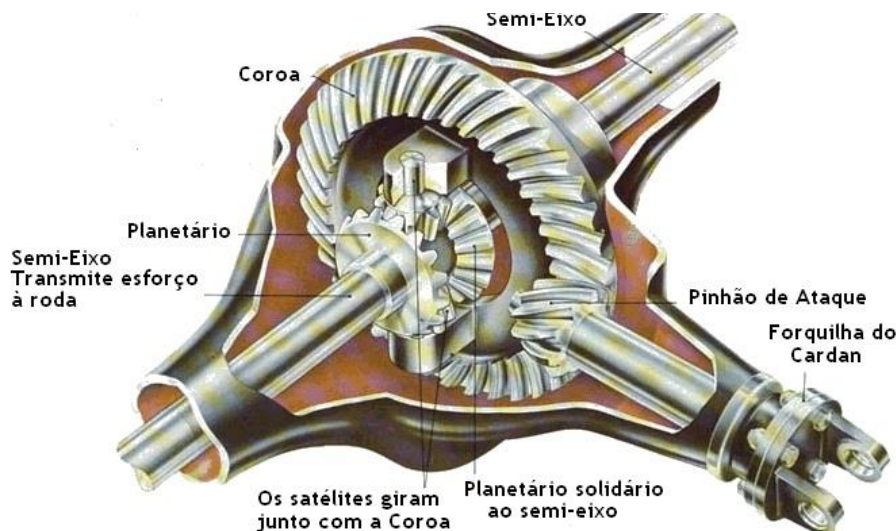
Durante o deslocamento em curva, a roda externa percorre um caminho maior do que a roda interna, exigindo maior velocidade de rotação. Sem a presença do diferencial, ambas as rodas seriam obrigadas a girar à mesma velocidade, ocasionando escorregamento dos pneus, aumento do desgaste e perda de eficiência energética. Dessa forma, o diferencial torna-se indispensável para o funcionamento adequado dos veículos automotores (Heisler, 2002).

Além de permitir a diferença de velocidades entre as rodas, o diferencial também atua como um redutor de torque, por meio do conjunto coroa e pinhão, sendo responsável por adaptar a rotação proveniente da transmissão às necessidades das rodas motrizes.

3.2.1 Componentes internos

Os componentes internos do diferencial (Figura 3) automotivo são responsáveis por permitir a distribuição do torque entre as rodas motrizes, assegurando que estas possam girar a diferentes velocidades angulares sem interrupção da transmissão de potência. Esse comportamento é fundamental para a estabilidade e a dirigibilidade do veículo, especialmente durante a realização de curvas (Heisler, 2002).

Figura 3 – Componentes internos do diferencial



Fonte: Dana (2025)

A coroa é a engrenagem de maior diâmetro do diferencial e tem como função receber o torque transmitido pelo pinhão de ataque, repassando-o à caixa do diferencial. Ela é fixada rigidamente à caixa, de modo que sua rotação provoca o movimento do conjunto interno. A relação entre o número de dentes da coroa e do pinhão define a relação de transmissão final, influenciando diretamente o torque e a velocidade do sistema.

O pinhão de ataque é responsável por transmitir o movimento proveniente do eixo de entrada para a coroa do diferencial. Normalmente possui dentes helicoidais, o que proporciona maior suavidade de funcionamento e melhor capacidade de transmissão de carga. O correto ajuste do pinhão é essencial para garantir eficiência mecânica, reduzir ruídos e evitar desgaste prematuro do conjunto.

A caixa do diferencial é o componente estrutural que abriga as engrenagens satélites e planetárias. Ela gira solidariamente com a coroa e é responsável por distribuir o torque recebido para os semieixos. Além disso, permite que o sistema interno realize a compensação de velocidades entre as rodas, sendo submetida a elevados esforços mecânicos durante o funcionamento.

As engrenagens planetárias estão conectadas diretamente aos semieixos e, conseqüentemente, às rodas do veículo. Sua função é transmitir o torque para cada roda, permitindo que ambas girem com velocidades diferentes quando necessário, como em curvas. Em condições de deslocamento retilíneo, as engrenagens planetárias giram com a mesma velocidade angular.

As engrenagens satélites permitem a variação de velocidade entre as engrenagens planetárias. Elas giram em torno de seu próprio eixo e acompanham o movimento da caixa do diferencial. Durante curvas, entram em rotação relativa, possibilitando que a roda externa percorra um caminho maior e gire mais rapidamente do que a roda interna. (Dana Incorporated, 2020).

3.3 Processo de fabricação do diferencial automotivo

De modo geral, praticamente todos os componentes do diferencial automotivo, com exceção da caixa do diferencial, são constituídos por engrenagens cônicas, o que faz com que esses elementos sejam submetidos a processos de fabricação bastante semelhantes (Crola, 2009). Em razão das elevadas cargas mecânicas às quais são submetidas, as engrenagens utilizadas em diferenciais exigem materiais com alta resistência e boa durabilidade. Entre os materiais mais empregados destacam-se o aço-liga, ferro fundido, ligas de cromo-níquel, bronze fosforoso, alumínio e, em aplicações específicas, o náilon (Shigley, 2005).

A produção dos dentes das engrenagens pode ser realizada por diferentes métodos de fabricação, como fundição em areia, moldagem em casca, fundição por cera perdida, fundição em moldes permanentes, fundição sob pressão e fundição centrífuga. Outra alternativa consiste no uso da metalurgia do pó, além de processos como a extrusão, em que barras metálicas,

geralmente de alumínio, são produzidas e posteriormente seccionadas para a obtenção das engrenagens.

Para aplicações que exigem elevada capacidade de transmissão de carga em relação ao tamanho do componente, as engrenagens são, em sua maioria, fabricadas em aço e têm seus dentes produzidos por processos de corte, utilizando ferramentas de forma ou métodos de geração (Shigley, 2005). No corte por forma, o perfil do dente é obtido diretamente a partir do formato da ferramenta. Já no método de geração, a ferramenta possui geometria distinta do perfil final do dente, e o formato correto é obtido por meio do movimento relativo entre ferramenta e peça.

Entre os métodos mais recentes de fabricação de dentes destaca-se a conformação ou laminação a frio, processo no qual matrizes são pressionadas e roladas sobre peças de aço para conformar os dentes da engrenagem. Esse método proporciona melhorias significativas nas propriedades mecânicas do material, além de gerar perfis de dentes com elevada qualidade dimensional e superficial (Shigley, 2005).

As engrenagens cônicas podem apresentar diferentes tipos de dentado, como reto, helicoidal ou em arco espiral. Normalmente, os eixos dessas engrenagens se intersectam formando um ângulo de 90° , embora outras configurações também sejam possíveis (Crola, 2009). A fabricação dessas engrenagens requer cuidados específicos, uma vez que falhas no processo produtivo podem comprometer sua eficiência e vida útil.

Durante a fabricação, as engrenagens cônicas passam por diversas etapas. Inicialmente, realiza-se a usinagem básica, que pode envolver processos como fresagem com fresa caracol, fresagem convencional ou moldagem. Em seguida, são aplicados processos de acabamento, como rebarbação, brunimento, retificação ou lapidação. Quando essas etapas são conduzidas de forma adequada, as engrenagens cônicas apresentam elevado desempenho, alta durabilidade e excelente relação custo-benefício.

3.3.1 Processos tradicionais

Os métodos mais tradicionais de fabricação de engrenagens, utilizados desde períodos anteriores à Primeira Revolução Industrial, incluem principalmente os processos de fundição por moldes e conformação mecânica. Cada um desses processos oferece diferentes níveis de precisão dimensional e qualidade de acabamento, possibilitando sua aplicação em diversos setores industriais, como o automotivo, têxtil, alimentício, entre outros.

O processo de fundição permite a produção de componentes com ampla variedade de formas e dimensões. As peças obtidas por esse método podem posteriormente ser submetidas a

operações complementares, como conformação mecânica, ajustes dimensionais, soldagem ou usinagem. No entanto, de modo geral, os produtos fundidos passam por etapas de acabamento, que incluem a remoção de canais de alimentação, usinagem e rebarbação, a fim de atender às exigências dimensionais e funcionais do projeto.

No caso específico da fabricação de engrenagens, a escolha do método de fundição depende diretamente da aplicação final do componente. Para engrenagens empregadas em diferenciais automotivos, os requisitos são mais rigorosos, uma vez que essas peças devem suportar elevadas cargas mecânicas e operar sob altas rotações. Existem padrões específicos de fundição que devem ser adotados conforme o nível de exigência do sistema no qual a engrenagem será utilizada.

Em aplicações não críticas, como brinquedos ou eletrodomésticos, podem ser empregadas engrenagens fundidas com baixo nível de precisão. A fundição em areia (Figura 4), por exemplo, é indicada quando não há necessidade de elevado acabamento superficial. Já a fundição em moldes metálicos permite a obtenção de engrenagens com melhor acabamento e maior precisão dimensional. No caso das engrenagens utilizadas em diferenciais automotivos, torna-se indispensável o uso de métodos que assegurem maior qualidade e confiabilidade, o que justifica a adoção de processos de fundição mais precisos.

Figura 4 – Fundição em areia



Fonte: Freamar (2025)

Entretanto, os processos de fabricação de engrenagens por fundição apresentam algumas limitações quando aplicados aos componentes do diferencial. Métodos como a fundição em areia embora versátil, apresentam menor qualidade de acabamento superficial e não é o mais adequados para produção em larga escala de engrenagens de alta precisão (Groover, 2007). Por outro lado, a fundição em molde (Figura 5) permanente oferece excelente acabamento superficial, porém é restrita a materiais com temperaturas de fusão relativamente mais baixas, uma vez que os moldes metálicos permanentes, geralmente fabricados em aço ou ferro fundido, não suportam temperaturas elevadas como as exigidas na fundição de ferro e aço.

Figura 5 – Fundição em moldes metálicos



Fonte: Freamar (2025)

Outro processo relevante na fabricação de engrenagens é a metalurgia do pó (Figura 6), a qual proporciona características de propriedades mecânicas distintas quando comparada aos métodos tradicionais de fundição. Esse processo destaca-se principalmente pela precisão dimensional e pela possibilidade de controle das propriedades do material.

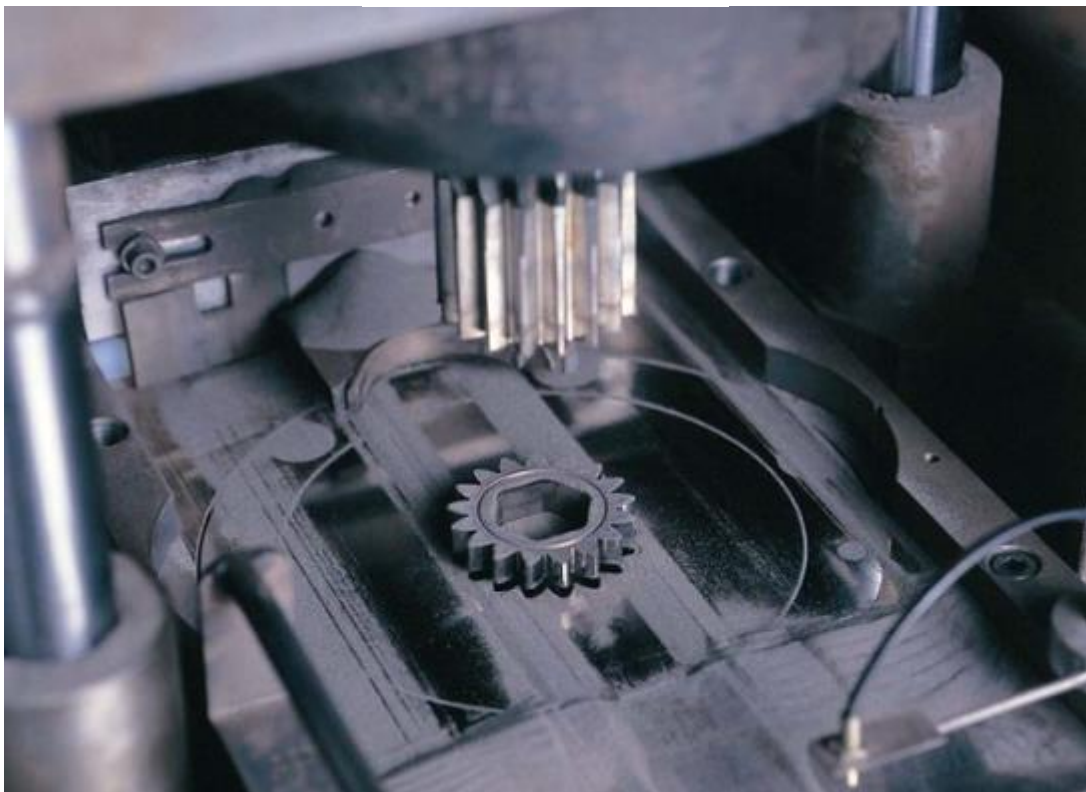
A metalurgia do pó consiste em uma técnica de fabricação de componentes metálicos, ferrosos ou não ferrosos, obtidos por meio da compactação de pós metálicos seguida de um tratamento térmico denominado sinterização. Esse tratamento promove a ligação das partículas

sólidas por aquecimento a temperaturas inferiores ao ponto de fusão do material, realizado sob atmosfera controlada, conferindo ao produto final propriedades físicas e mecânicas específicas.

Um dos principais benefícios desse processo está relacionado ao custo-benefício tanto do ponto de vista material quanto dimensional. No aspecto material, a metalurgia do pó permite a formulação precisa da composição química, possibilitando o ajuste das propriedades físico-mecânicas de acordo com as solicitações de serviço da engrenagem (Groover, 2007). Já no aspecto dimensional, a compactação em ferramentas específicas assegura a obtenção de geometrias complexas com tolerâncias rigorosas e elevada repetibilidade dimensional.

Além disso, a metalurgia do pó apresenta vantagens ambientais quando comparada aos processos convencionais de fabricação. Esse método promove melhor aproveitamento da matéria-prima, reduz o consumo energético e possibilita o uso seletivo de elementos de liga, resultando em menor impacto ambiental. Dessa forma, trata-se de um processo tecnologicamente eficiente e ambientalmente mais sustentável.

Figura 6 – Metalurgia do pó



Fonte: Flickr (2025)

3.3.2 Processos inovadores

Com o avanço das técnicas de manufatura e o aumento da complexidade geométrica dos projetos modernos de engrenagens, novos métodos de fabricação passaram a ser empregados. Entre esses métodos destacam-se processos como *InvoMilling* (Figura 7) e *Power Skiving* (Figura 8), os quais possibilitam maior flexibilidade e precisão na produção de engrenagens.

De modo geral, a fabricação de engrenagens ainda exige que o perfil da ferramenta seja desenvolvido especificamente para cada tipo de engrenagem. Isso ocorre porque as dimensões e a geometria do espaço entre os dentes devem corresponder exatamente ao perfil da ferramenta utilizada, garantindo a correta formação dos dentes e o desempenho adequado do conjunto mecânico.

De modo geral, a usinagem de engrenagens exige o uso de ferramentas específicas, projetadas de acordo com o perfil de cada tipo de engrenagem. Nesse contexto, o *InvoMilling* surge como um processo avançado para a usinagem de engrenagens externas, estrias e engrenagens cônicas de dentes retos, possibilitando inclusive o fresamento interno de engrenagens em máquinas convencionais de usinagem.

Uma das principais vantagens desse método é a flexibilidade proporcionada pelo uso de programação CNC. Ao invés de substituir a ferramenta, a alteração do perfil da engrenagem é realizada por meio da modificação do programa, permitindo que um mesmo conjunto de ferramentas seja utilizado para a fabricação de diferentes geometrias. Além disso, o processo possibilita a usinagem completa das peças em um único *set-up*, utilizando máquinas multitarefas ou centros de usinagem de cinco eixos.

Dessa forma, o *InvoMilling* contribui significativamente para a redução do tempo de manufatura e do prazo total de produção, tornando-se uma alternativa eficiente e econômica para a fabricação de engrenagens de alta precisão (Groover, 2007).

Figura 7 – InvoMilling



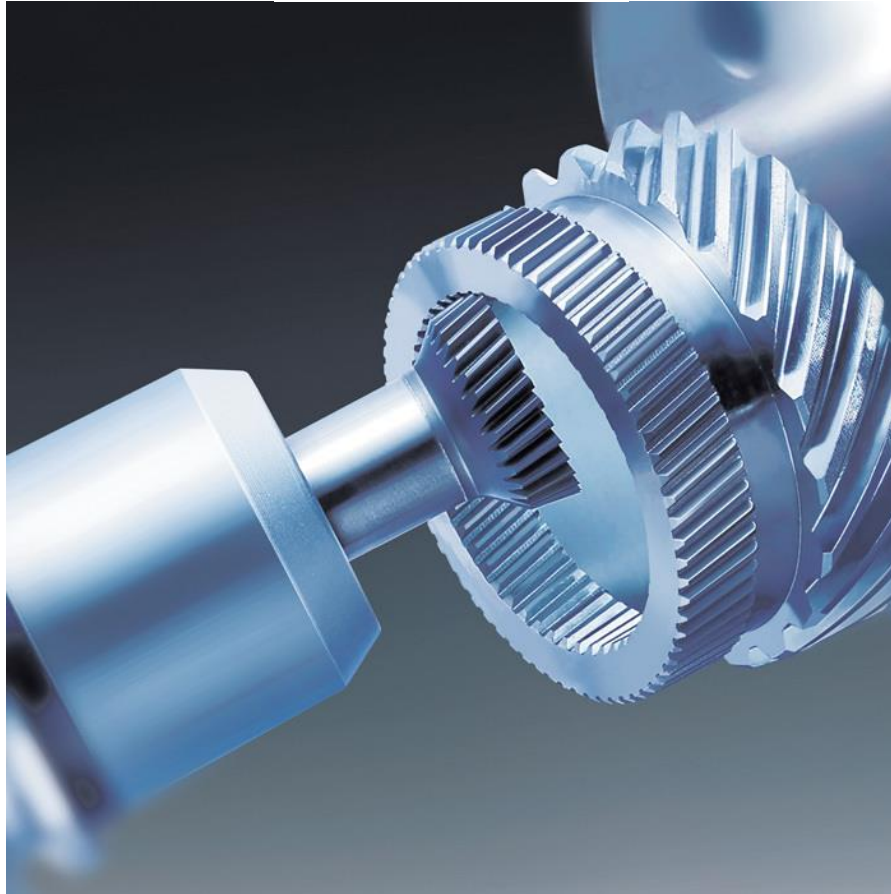
Fonte: Sandvik Coromant (2025)

O *Power Skiving* é um processo de usinagem por corte contínuo que apresenta elevada taxa de remoção de material, sendo consideravelmente mais rápido que o processo de *shaping* e mais versátil quando comparado ao brochamento. Embora o conceito do *Power Skiving* exista há aproximadamente um século, sua aplicação prática passou por avanços significativos nos últimos anos.

Esse avanço está diretamente relacionado ao desenvolvimento de máquinas-ferramenta mais robustas e rígidas, além da utilização de fusos sincronizados, fatores que tornaram o processo mais estável e preciso, possibilitando sua ampla aplicação industrial (Groover, 2007). O *Power Skiving* pode ser empregado tanto na fabricação de engrenagens internas quanto externas, destacando-se especialmente na usinagem de engrenagens internas, onde apresenta elevada produtividade.

Além disso, esse método mostra-se particularmente eficiente em processos de produção em larga escala, nos quais a redução do tempo de fabricação é um fator determinante para a competitividade industrial.

Figura 8 – Power Skiving



Fonte: Toyota (2020)

3.4 Tipos de Diferenciais e suas aplicações

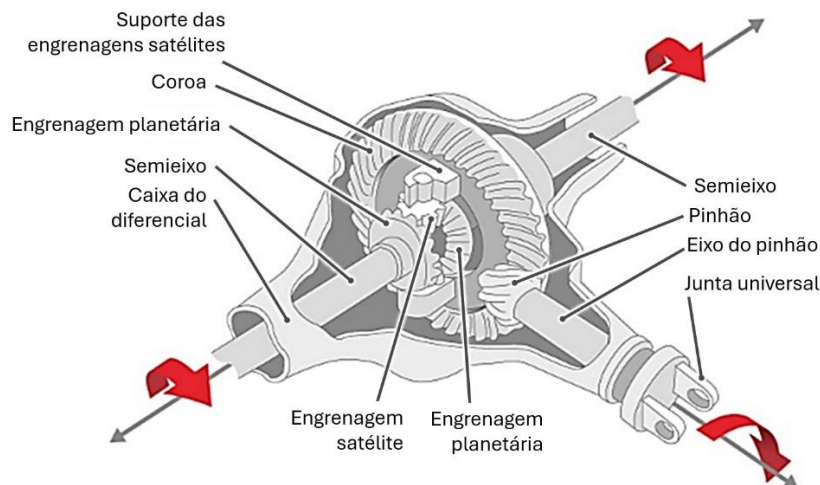
Com a evolução da engenharia automotiva, diversos tipos de diferenciais foram desenvolvidos para atender às diferentes necessidades de tração, estabilidade e desempenho dos veículos. Cada tipo apresenta características construtivas específicas e aplicações distintas, conforme as condições de operação.

Para atender às diferentes exigências de tração e estabilidade, os sistemas diferenciais podem ser classificados de acordo com seu princípio de funcionamento. Entre os principais encontram-se o diferencial aberto, o diferencial autoblocante, o diferencial bloqueado, o diferencial do tipo Torsen e os diferenciais eletrônicos. Cada um desses sistemas apresenta características próprias quanto à distribuição de torque entre as rodas, sendo aplicados conforme as necessidades de desempenho, segurança e condições de operação do veículo.

3.4.1 Diferencial aberto

O diferencial aberto (Figura 9) é o tipo mais simples e amplamente utilizado em veículos de passeio. Seu funcionamento baseia-se na livre rotação das engrenagens internas, permitindo que as rodas girem a diferentes velocidades durante curvas. Entretanto, esse tipo de diferencial apresenta como principal limitação a perda de tração quando uma das rodas encontra menor aderência, fazendo com que o torque seja direcionado majoritariamente para a roda com menor resistência (Heisler, 2002). Devido à sua simplicidade construtiva, baixo custo e facilidade de manutenção, o diferencial aberto é amplamente aplicado em automóveis de uso urbano e rodoviário, onde as condições de aderência são, em geral, homogêneas e previsíveis.

Figura 9 – Diferencial aberto

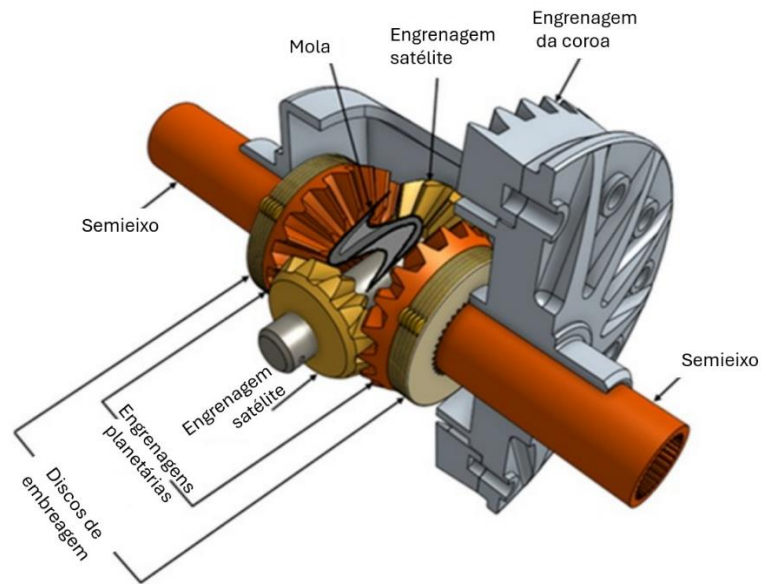


Fonte: MathWorks (2025)

3.4.2 Diferencial autoblocante (Diferencial de deslizamento limitado)

O diferencial autoblocante (Figura 10), também conhecido como *Limited Slip Differential* (LSD), foi desenvolvido para reduzir os efeitos da perda de tração presentes no diferencial aberto. Esse sistema utiliza elementos de atrito, como discos de embreagem ou rampas mecânicas, para limitar a diferença de rotação entre as rodas, garantindo melhor distribuição de torque em situações de baixa aderência (Juvinall; Marshek, 2012). Esse tipo de diferencial é amplamente aplicado em veículos esportivos, utilitários e veículos de alto desempenho, nos quais se busca maior estabilidade, melhor tração em curvas e desempenho superior em pisos escorregadios ou irregulares.

Figura 10 – Diferencial autoblocante



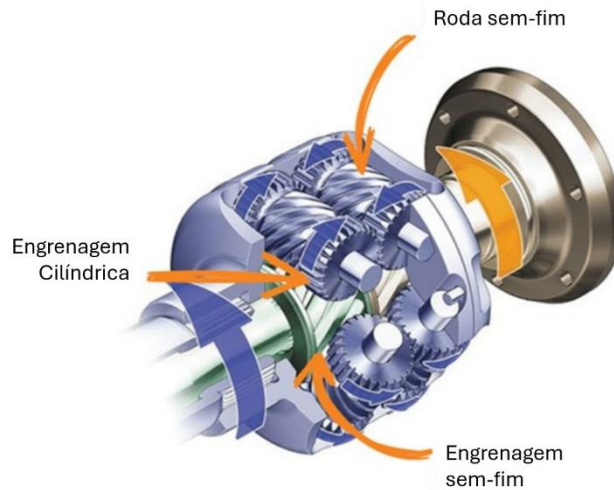
Fonte: MathWorks (2025)

3.4.3 Diferencial Torsen

O diferencial Torsen (Figura 11) é um tipo de diferencial mecânico que utiliza engrenagens helicoidais para realizar a distribuição automática do torque entre as rodas. Seu funcionamento é totalmente mecânico, dispensando sistemas eletrônicos ou embreagens adicionais.

O diferencial Torsen apresenta resposta rápida, elevada eficiência e é amplamente aplicado em veículos esportivos e de alto desempenho, além de sistemas de tração integral. Suas aplicações incluem automóveis com tração integral permanente (*AWD*), veículos de competição e modelos que exigem elevada estabilidade e tração em diferentes condições de piso, como superfícies molhadas, escorregadias ou irregulares.

Figura 11 – Diferencial Torsen



Fonte: KMP Drivetrain Solutions (2024)

3.4.4 Diferencial eletrônico

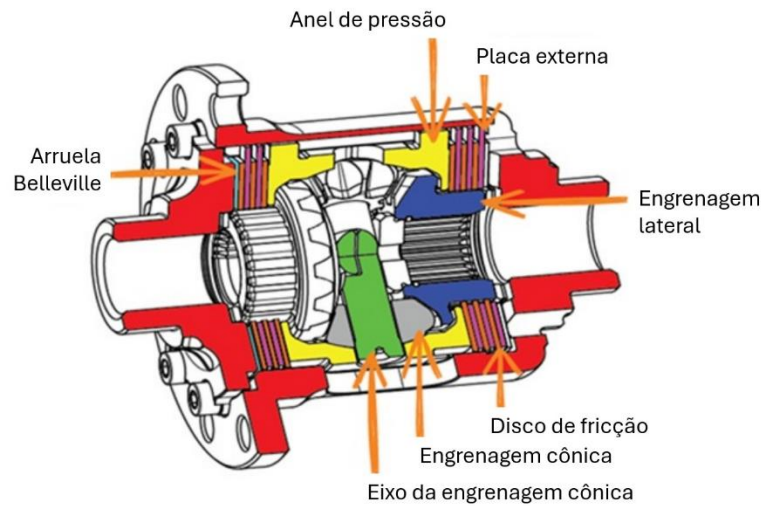
O diferencial eletrônico atua em conjunto com sistemas de controle de tração e estabilidade do veículo. Nesse sistema, sensores monitoram a rotação das rodas e, ao detectar perda de aderência, o sistema aplica frenagem seletiva ou redistribui o torque eletronicamente. Esse tipo de diferencial oferece elevada eficiência em condições variadas de terreno, porém depende de sistemas eletrônicos e sensores para seu funcionamento adequado. Suas principais aplicações estão em veículos modernos de passeio, SUVs (Veículos utilitários esportivos) e veículos com sistemas avançados de assistência à condução, onde o controle eletrônico contribui para maior segurança, estabilidade e conforto em diferentes condições de rodagem.

3.4.5 Diferencial bloqueável

O diferencial bloqueável (Figura 12) permite o travamento total das rodas motrizes, fazendo com que ambas girem à mesma velocidade. Esse tipo de diferencial é amplamente utilizado em veículos *off-road*, tratores e veículos militares, onde a tração máxima é necessária em terrenos de baixa aderência. Suas aplicações concentram-se em situações extremas, como

lama, areia, neve ou terrenos acidentados, nas quais a perda de aderência é significativa e a distribuição igual de torque entre as rodas torna-se essencial. Apesar de sua eficiência nessas condições, o uso do bloqueio não é recomendado em curvas, pois pode comprometer a dirigibilidade do veículo.

Figura 12 – Diferencial bloqueável



Fonte: KMP Drivetrain Solutions (2024)

3.5 Componentes de Transferência de Torque e Potência

O sistema de transmissão automotiva (Figura 13) é composto por diversos elementos mecânicos responsáveis por conduzir a potência gerada pelo motor até as rodas do veículo. Esses componentes atuam de forma integrada para garantir eficiência, segurança e confiabilidade durante a operação.

Figura 13 - Sistema de transmissão automotiva



Fonte: O autor

3.5.1 Embreagem

A embreagem (Figura 14) é o componente responsável por realizar o acoplamento e desacoplamento entre o motor e o sistema de transmissão. Sua principal função é permitir a partida do veículo, a troca de marchas e a absorção de variações bruscas de torque, garantindo uma transferência gradual de potência por meio do atrito entre seus elementos (Marshek, 2012).

Além disso, a embreagem atua como um elemento de proteção do conjunto motriz, reduzindo esforços excessivos sobre a transmissão e demais componentes mecânicos durante mudanças de regime de rotação do motor. Ao permitir um engate progressivo, o sistema minimiza impactos, vibrações e ruídos, contribuindo para o conforto do condutor e para o aumento da vida útil dos componentes envolvidos.

Figura 14 – Embreagem

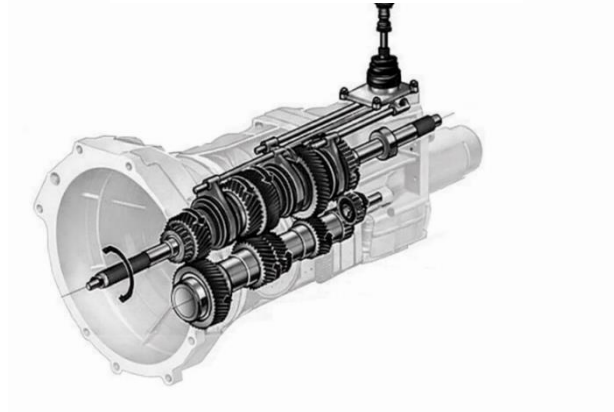


Fonte: AutoPapo (2020)

3.5.2 Caixa de mudanças

A caixa de mudanças (Figura 15), também conhecida como câmbio, tem como função adequar o torque e a rotação do motor às diferentes condições de operação do veículo. Por meio de diferentes relações de engrenagens, é possível aumentar o torque em baixas velocidades ou reduzir a rotação do motor em altas velocidades, contribuindo para a eficiência energética e o desempenho do sistema (Heisler, 2002).

Figura 15 – Caixa de Mudanças

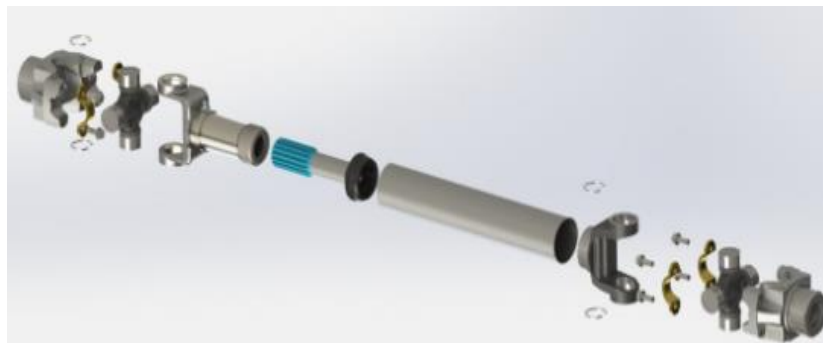


Fonte: The Engineers Post (2023)

3.5.3 Eixo Articulado

O eixo articulado (Figura 16) é responsável por transmitir o movimento rotacional da saída da transmissão até o diferencial, permitindo variações angulares decorrentes do movimento da suspensão. Normalmente equipado com juntas universais ou homocinéticas, esse componente garante a continuidade da transmissão de torque mesmo em condições de desalinhamento geométrico.

Figura 16 – Eixo Articulado

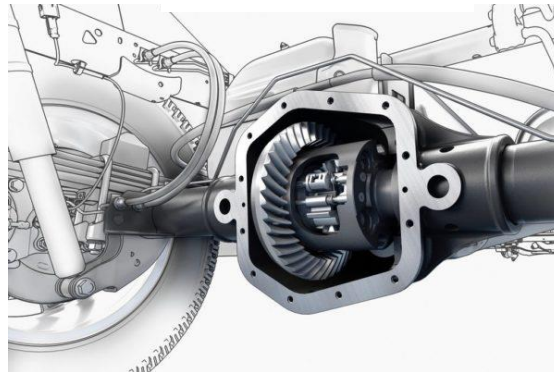


Fonte: Carros e garagem (2025)

3.5.4 Diferencial

O diferencial (Figura 17) é composto por um conjunto de engrenagens, incluindo coroa, pinhão, engrenagens planetárias e satélites. Além de permitir diferentes velocidades de rotação entre as rodas, ele atua como o último estágio de redução de torque antes da aplicação direta nas rodas motrizes, sendo essencial para a dirigibilidade e a segurança do veículo.

Figura 17 – Diferencial

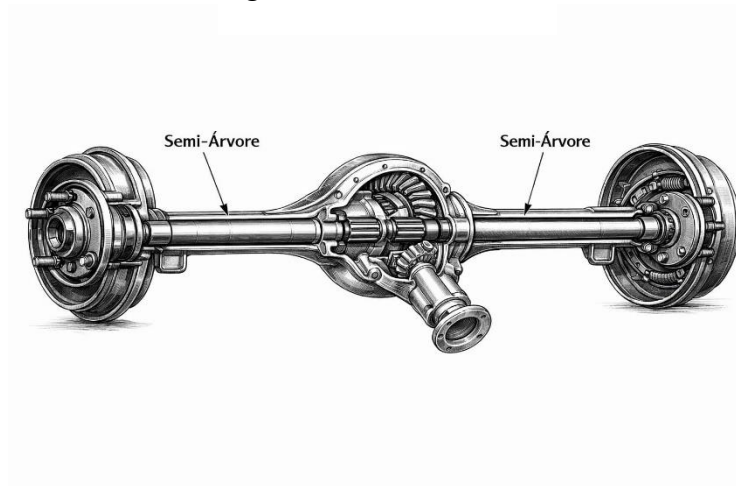


Fonte: Dana (2024)

3.5.5 Semi-Árvore

As semi-árvores (Figura 18) são os componentes responsáveis por transmitir o torque do diferencial diretamente às rodas motrizes. Elas devem suportar elevados esforços de torção e flexão, além de acompanhar os movimentos da suspensão. Em veículos com tração dianteira, geralmente utilizam juntas homocinéticas para garantir suavidade e eficiência na transmissão do movimento.

Figura 18 – Semi-Árvore



Fonte: Seduc adaptado (2011)

4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO DIFERENCIAL AUTOMOTIVO

O diferencial automotivo é um dos componentes mais importantes do sistema de transmissão de veículos, sendo responsável por permitir que as rodas motrizes girem a velocidades angulares diferentes, principalmente durante a realização de curvas, sem comprometer a transmissão de torque proveniente do motor.

Durante o deslocamento em linha reta, ambas as rodas percorrem trajetórias de mesmo comprimento, o que faz com que o diferencial funcione de forma praticamente solidária, distribuindo o torque de maneira equilibrada entre as duas semi-árvores. Nesse caso, os satélites internos não giram em torno do próprio eixo, apenas acompanham o movimento da caixa do diferencial solidária à coroa dentada (Heisler, 2002).

Entretanto, ao realizar uma curva, a roda externa percorre um caminho maior do que a roda interna, exigindo que gire a uma velocidade superior. O diferencial possibilita essa diferença de rotação por meio do conjunto de engrenagens planetárias, compostas por engrenagens satélites e planetárias. Quando ocorre a diferença de resistência entre as rodas, os satélites passam a girar em torno do próprio eixo, permitindo que cada semi-árvore assuma uma velocidade angular distinta, mantendo, porém, a continuidade da transmissão de torque (Juvinall 2012).

O torque transmitido ao diferencial chega através do pinhão, que engrena com a coroa dentada. A coroa, solidária à caixa do diferencial, transfere o movimento para os satélites, que distribuem o torque às engrenagens planetárias conectadas às semi-árvores. Dessa forma, o diferencial garante simultaneamente a transmissão de potência e a compensação de velocidades entre as rodas, evitando o arrasto excessivo dos pneus, esforços elevados nos componentes mecânicos e perda de estabilidade do veículo (Milliken, 1995).

No contexto da bancada didática desenvolvida neste trabalho, o princípio de funcionamento do diferencial é explorado de forma experimental, permitindo visualizar claramente o comportamento do sistema em situações simuladas de movimento retilíneo e de curva, ampliando o entendimento dos efeitos da distribuição de torque e da diferença de velocidades angulares entre as rodas.

4.1 Análise de Torque, Relação de Transmissão e Esforços Mecânicos no Diferencial

O projeto e a análise do funcionamento de um diferencial automotivo envolvem diretamente conceitos fundamentais da Engenharia Mecânica, como torque, relação de

transmissão, velocidade angular e esforços mecânicos atuantes nos componentes internos do conjunto.

O torque transmitido ao diferencial é proveniente do sistema de transmissão e pode ser expresso pela relação:

$$T_d = T_m \cdot i_t$$

onde:

T_d é o torque aplicado ao diferencial (N·m),

T_m é o torque fornecido pelo motor (N·m),

i_t é a relação total de transmissão até o diferencial.

No interior do diferencial, ocorre a redução de rotação por meio do conjunto pinhão–coroa, cuja relação de transmissão é dada por:

$$i_d = \frac{Z_p}{Z_c} \quad (1)$$

em que:

i_d representa a relação de transmissão

Z_c representa o número de dentes da coroa,

Z_p representa o número de dentes do pinhão.

Essa relação influencia diretamente o torque disponível nas rodas motrizes, sendo que o torque nas semi-árvores pode ser aproximado por:

$$T_{sa} = \frac{T_d}{2} \quad (2)$$

Em que:

T_{sa} representa o torque nas semi-árvores,

T_d é o torque aplicado ao diferencial (N·m).

em condições ideais de aderência e funcionamento simétrico do diferencial.

Durante a realização de curvas, embora as velocidades angulares das rodas sejam diferentes, o diferencial mantém a soma das velocidades constantes, conforme a relação:

$$\omega_e + \omega_i = 2 \cdot \omega_m \quad (3)$$

onde:

ω_e é a velocidade angular da roda externa,

ω_i é a velocidade angular da roda interna,

ω_m é a velocidade angular média do diferencial.

5 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho possui caráter qualitativo e experimental, tendo como foco o desenvolvimento de uma bancada didática para o estudo do diferencial automotivo. Inicialmente, foi realizado um levantamento bibliográfico em livros e materiais técnicos sobre sistemas de transmissão, funcionamento do diferencial e aplicações didáticas desses mecanismos, com o objetivo de fornecer embasamento teórico ao projeto.

Em seguida, foi desenvolvido o projeto mecânico da bancada, no qual os componentes estruturais, suportes e mecanismos auxiliares foram modelados em softwares de Projeto (CAD). A modelagem permitiu o correto dimensionamento das peças, verificação de interferências e planejamento da montagem do conjunto.

Posteriormente, os componentes projetados foram fabricados majoritariamente por meio de manufatura aditiva (impressão 3D), possibilitando rapidez na prototipagem e flexibilidade para ajustes. Após a fabricação, realizou-se a montagem da bancada, integrando o diferencial automotivo e o sistema de travamento.

Por fim, foram realizados testes experimentais para avaliar o funcionamento do diferencial em condições livre e travada, permitindo verificar o comportamento das rotações das rodas e validar a bancada como ferramenta didática para o ensino de Engenharia Mecânica.

5.1 Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica constitui uma etapa fundamental para o desenvolvimento deste trabalho, pois fornece o embasamento teórico necessário à compreensão do funcionamento do diferencial automotivo, dos sistemas de transmissão de potência e dos métodos de fabricação de seus componentes. Por meio do levantamento de livros, artigos científicos, normas técnicas e materiais especializados da área de Engenharia Mecânica, foi possível compreender os princípios mecânicos, construtivos e operacionais dos diferentes tipos de diferenciais.

As principais fontes consultadas abordam temas como cinemática e dinâmica de engrenagens, distribuição de torque, comportamento do diferencial em curvas, bem como os processos tradicionais e inovadores de fabricação de engrenagens. Autores consagrados na área, como Heisler (2002), Juvinal e Marshek (2012), Milliken (1995) e Groover (2007), contribuíram de forma significativa para a fundamentação teórica do projeto.

Além disso, a revisão bibliográfica possibilitou a identificação das vantagens e limitações dos diferentes tipos de diferenciais, como o diferencial aberto, autoblocante, Torsen, eletrônico e bloqueável, permitindo a escolha das soluções mais adequadas para a proposta da

bancada didática. Esse estudo prévio também orientou o dimensionamento do sistema, a definição do mecanismo de travamento e a seleção dos materiais e processos de fabricação adotados.

Dessa forma, a revisão bibliográfica desempenhou papel essencial no direcionamento do projeto, assegurando que a bancada desenvolvida estivesse fundamentada em conceitos consolidados da engenharia mecânica e alinhada às práticas utilizadas na indústria automotiva e no ensino técnico e superior.

5.2 Desenvolvimento do protótipo

O desenvolvimento da bancada iniciou-se com a modelagem tridimensional das peças em softwares (CAD). Essa etapa permitiu definir as dimensões, tolerâncias e geometrias necessárias para o correto funcionamento e montagem do sistema.

Após a modelagem, os arquivos digitais foram preparados para impressão 3D, considerando parâmetros como orientação das peças, preenchimento e espessura de camadas. A fabricação por manufatura aditiva possibilitou a produção rápida dos componentes, além de facilitar ajustes e correções durante o desenvolvimento do projeto.

5.2.1 Materiais utilizados

Os materiais utilizados na construção da bancada didática foram selecionados com base em critérios de disponibilidade, custo, facilidade de fabricação e adequação ao uso didático. A escolha desses materiais permitiu a construção de uma estrutura funcional, resistente e compatível com os objetivos do projeto.

5.2.1.1 Placa de MDF

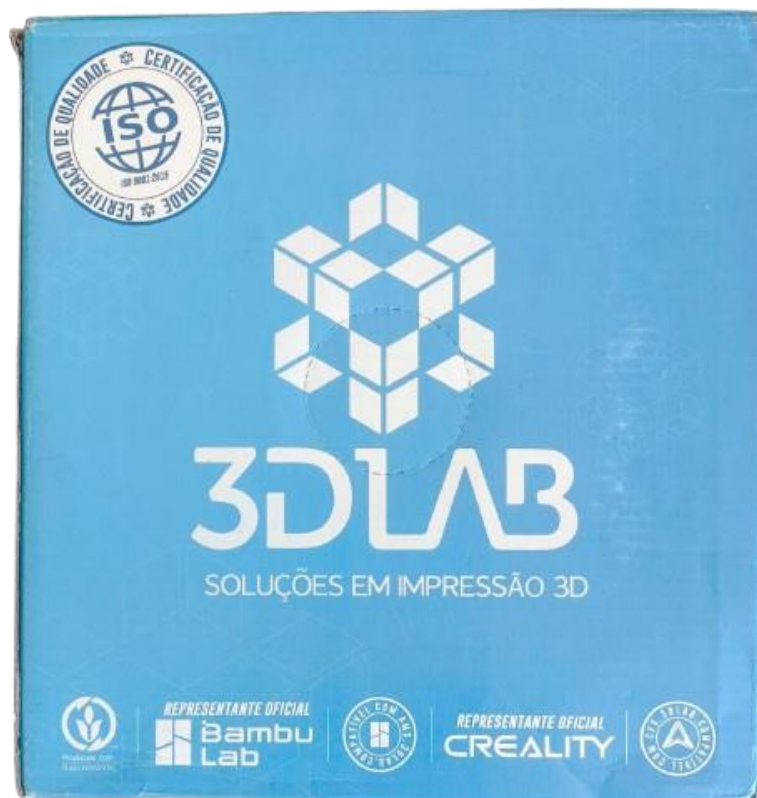
A estrutura base da bancada foi confeccionada em placa de MDF, material amplamente utilizado em aplicações estruturais leves devido à sua boa rigidez, facilidade de usinagem e baixo custo. A placa de MDF serviu como suporte para a fixação do diferencial automotivo e do sistema de travamento, garantindo estabilidade ao conjunto durante o funcionamento e os testes experimentais.

5.2.1.2 Filamento PLA e PETG

Os componentes do sistema de travamento e diversos suportes da bancada foram fabricados por meio de impressão 3D, utilizando filamentos de PLA e PETG (Figura 19). O PLA foi empregado principalmente devido à sua facilidade de impressão, bom acabamento

superficial e rigidez adequada para aplicações estruturais leves. Já o PETG foi utilizado em peças que exigem maior resistência mecânica, proporcionando maior durabilidade ao conjunto.

Figura 19 – Filamento



Fonte: O autor

5.2.2 Equipamentos e Ferramentas Utilizadas

Para o desenvolvimento e a construção da bancada didática, foram empregados equipamentos e ferramentas que possibilitaram desde a modelagem até a fabricação e montagem do protótipo.

5.2.2.1 Impressora 3D

A impressora 3D (Figura 20) foi utilizada para a fabricação dos componentes modelados em CAD, permitindo a produção de peças personalizadas com geometrias específicas para o sistema de travamento e fixação. O uso da manufatura aditiva possibilitou rápida prototipagem e ajustes no projeto sempre que necessário.

Figura 20 – Impressora 3d (Ender 3v3KE)



Fonte: O autor

5.2.2.2 Fatiador 3D

O software fatiador 3D (Figura 21) foi utilizado para converter os modelos tridimensionais em código G (G-code), compatível com a impressora 3D do tipo FDM. O processo de fatiamento consiste na divisão do modelo em camadas sucessivas no eixo Z, definindo as trajetórias de deposição do material e os parâmetros de fabricação.

Durante essa etapa, foram configurados parâmetros essenciais que influenciam diretamente a qualidade dimensional e a resistência mecânica das peças. A altura de camada foi ajustada para equilibrar acabamento superficial e tempo de impressão, visto que camadas menores proporcionam maior definição geométrica, porém aumentam o tempo de fabricação.

O percentual e o padrão de preenchimento (infill) foram definidos conforme a necessidade estrutural do protótipo, garantindo rigidez adequada sem excesso de material. Também foram configuradas a velocidade de impressão e a temperatura de extrusão,

parâmetros fundamentais para assegurar boa adesão entre camadas, evitar falhas estruturais e manter a estabilidade dimensional.

Adicionalmente, foram ajustadas a espessura das paredes externas, a retratação do filamento e a orientação da peça na mesa, considerando a anisotropia característica do processo FDM, a fim de otimizar a resistência mecânica nas direções de maior solicitação.

A correta parametrização do fatiador foi determinante para garantir qualidade, precisão de encaixe e desempenho estrutural satisfatório das peças impressa

Figura 21 – Fatiador 3d



Fonte: Creality Wiki (2020)

5.2.2.3 Software de Modelagem

A modelagem das peças da bancada, do sistema de travamento e dos suportes foi realizada no software de modelagem tridimensional Inventor (Figura 22). Esses programas permitiram a criação de modelos precisos, a verificação de encaixes e interferências, além de facilitar modificações no projeto antes da fabricação.

Figura 22 – Software de modelagem



Fonte: Autodesk (2026)

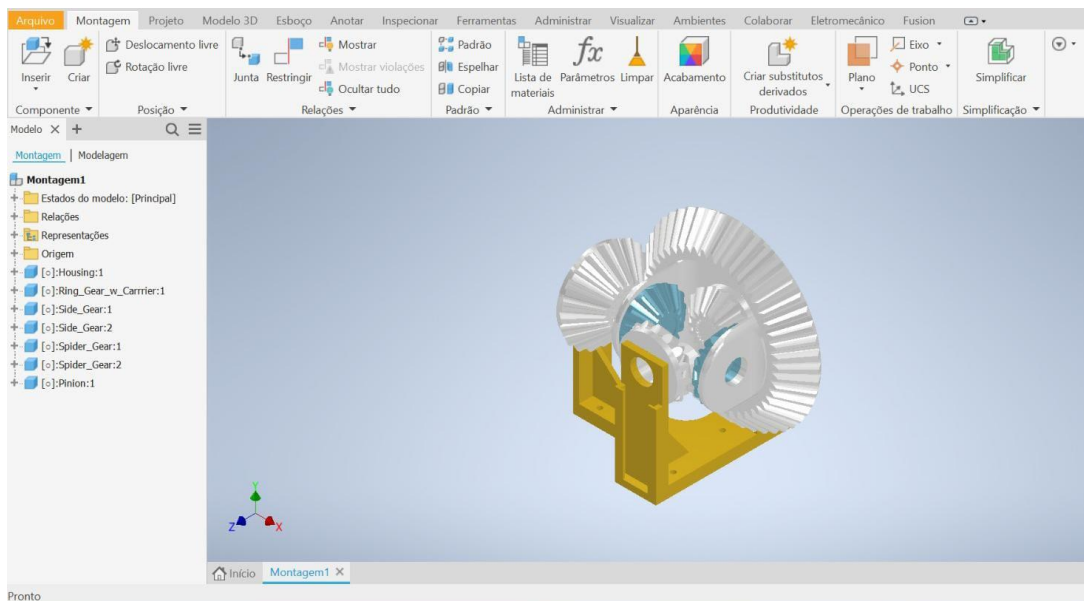
5.2.2.4 Ferramentas de Corte e Acabamento

Ferramentas manuais e elétricas de corte e acabamento foram utilizadas para ajustes na placa de MDF, fixação dos componentes e acabamento das peças impressas em 3D. Entre as ferramentas empregadas destacam-se: serra tico-tico, furadeira elétrica, parafusadeira, lixadeira orbital, lixas manuais de diferentes granulometrias, estilete, chaves de fenda e Phillips, chaves Allen, alicates, além de trena e esquadro metálico para medições e verificação de alinhamento.

5.3 Modelagem Tridimensional do Diferencial e do Sistema de Travamento

A modelagem tridimensional (Figura 23) do sistema e dos componentes auxiliares da bancada foi realizada com o auxílio de softwares CAD. Essa etapa permitiu a visualização completa do conjunto, definição das dimensões, análise de interferências e planejamento da montagem. A utilização da modelagem 3D foi fundamental para garantir a compatibilidade entre as peças impressas e o diferencial automotivo real utilizado no projeto.

Figura 23 - Modelagem tridimensional



Fonte: O autor

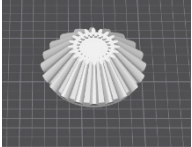
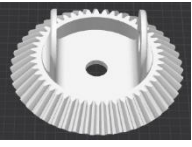
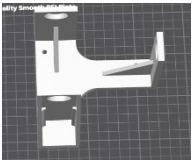
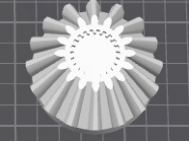

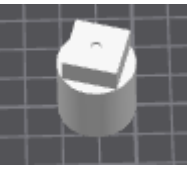
5.4 Fabricação das Peças

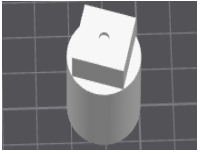
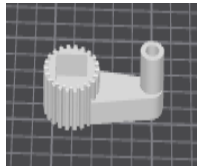
Após a modelagem, os arquivos digitais foram exportados para o software fatiador e, posteriormente, fabricados por meio de impressão 3D. As peças foram produzidas conforme os parâmetros definidos, respeitando as limitações do processo de manufatura aditiva e garantindo resistência mecânica adequada para o funcionamento da bancada.

5.4.1 Peças do Diferencial

As peças que compõem o diferencial automotivo, incluindo a engrenagem coroa, o pinhão, os satélites, os planetários e os eixos de apoio, foram fabricados por meio de impressão 3D. O processo de fabricação considerou a geometria das engrenagens, o correto perfil dos dentes e o alinhamento entre os componentes, fatores essenciais para o funcionamento adequado do conjunto.

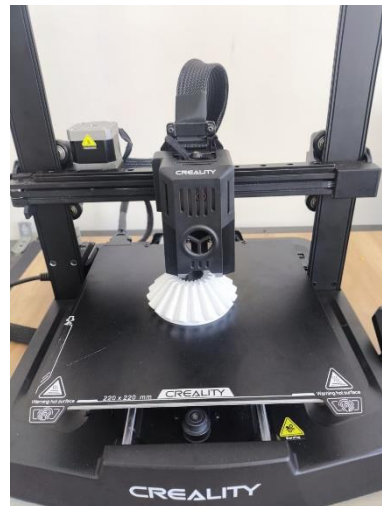
Tabela 1 – Componentes do Diferencial

Peça e dimensões	Temperatura e material	Preenchimento	Tolerância	Velocidade	Ilustração
Pinhão 87x87x29.75 mm	210°C PLA PLUS 63g	15% Retilíneo	0.049	200mm/s	
Coroa 173x173x78 mm	210°C PLA PLUS 256g	20% Retilíneo	0.049	150mm/s	
Base 119x136x114 mm	210°C PLA PLUS 302g	60% Retilíneo	0.049	150mm/s	
2 Satélites 63x63x23 mm	210°C PLA PLUS 55g	15% Retilíneo	0.049	200mm/s	
2 Planetárias 63x63x18 mm	210°C PLA PLUS 47g	15% Retilíneo	0.049	200mm/s	
2 Pinos Satélites 22x22x25 mm	210°C PLA PLUS 15g	20% Retilíneo	0.049	300mm/s	

2 Pinos Planetários 22x22x28 mm	210°C PLA PLUS 19g	20% Retilíneo	0.049	300mm/s	
Manivela 60x28x13 mm	210°C PLA PLUS 13g	40% Retilíneo	0.049	150mm/s	

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Figura 24 – Impressão da engrenagem



Fonte: O autor

Figura 25 – Diferencial impresso

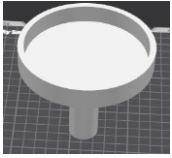
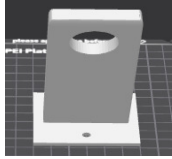
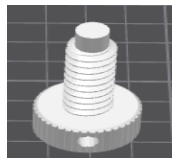
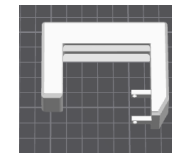
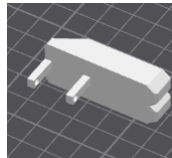
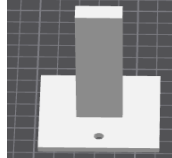


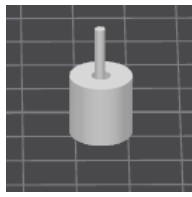
Fonte: O autor

5.4.2 Peças do Sistema de Travamento

As peças do sistema de travamento (Figura 26) do diferencial foram igualmente fabricadas por impressão 3D e projetadas com foco na funcionalidade e na facilidade de montagem e desmontagem. Esse conjunto incluiu elementos responsáveis pelo acoplamento mecânico entre os eixos, permitindo a simulação do travamento parcial.

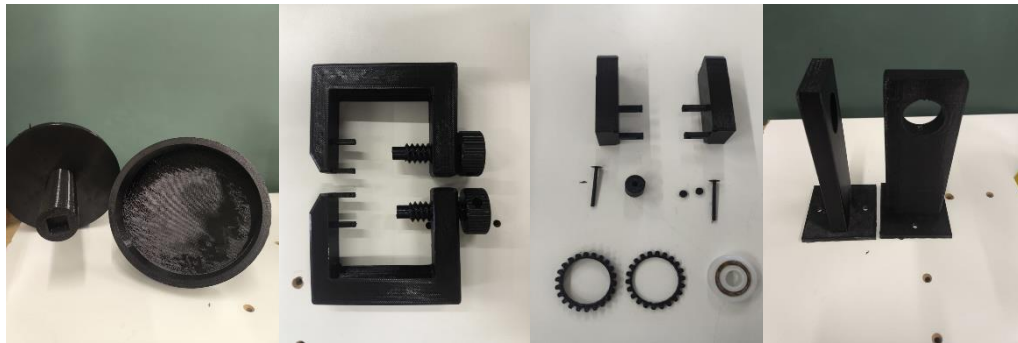
Tabela 2 – Componentes do Sistema de Travamento

Peça e dimensões	Temperatura e material	Preenchimento	Tolerância	Velocidade	Ilustração
2 Semi-eixos 110x110x115 mm	245°C PETG 259g	40% Retilíneo	0.049	150mm/s	
2 Suporte semi-eixos 60x60x128 mm	245°C PETG 141g	40% Retilíneo	0.049	250mm/s	
2 Parafusos da trava 26x26x49 mm	245°C PETG 25g	80% Retilíneo	0.049	150mm/s	
2 Travas 80x61x20 mm	245°C PETG 128g	80% Retilíneo	0.049	150mm/s	
2 Travas moveis 24x49x20 mm	245°C PETG 57g	80% Retilíneo	0.049	150mm/s	
2 Suportes para trava 60x60x93 mm	245°C PETG 107g	80% Retilíneo	0.049	150mm/s	

4 Roletes da trava 12x12x12 mm	245°C PETG 6,6g	80% Retilíneo	0.049	150mm/s	
--------------------------------------	-----------------------	---------------	-------	---------	---

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Figura 26 – Peças do sistema de travamento



Fonte: O autor

5.5 Montagem do Protótipo

A montagem do protótipo foi realizada de maneira gradual e sistemática, seguindo a sequência definida na etapa de projeto, com o objetivo de garantir o correto funcionamento do conjunto e a segurança durante a operação. Inicialmente, procedeu-se à fixação da placa de MDF, que constitui a base estrutural da bancada didática. Essa etapa foi fundamental para assegurar a estabilidade do sistema, uma vez que a base serve de suporte para todos os componentes mecânicos e deve resistir aos esforços gerados durante os ensaios experimentais.

Em seguida, realizou-se a instalação do diferencial automotivo sobre a base, utilizando-se elementos de fixação adequados e anéis de ajuste com a finalidade de eliminar folgas indesejadas em todas as conexões mecânicas. A utilização desses anéis mostrou-se essencial para garantir o correto posicionamento dos eixos e engrenagens, reduzindo vibrações, desalinhamentos e possíveis interferências durante o funcionamento do sistema.

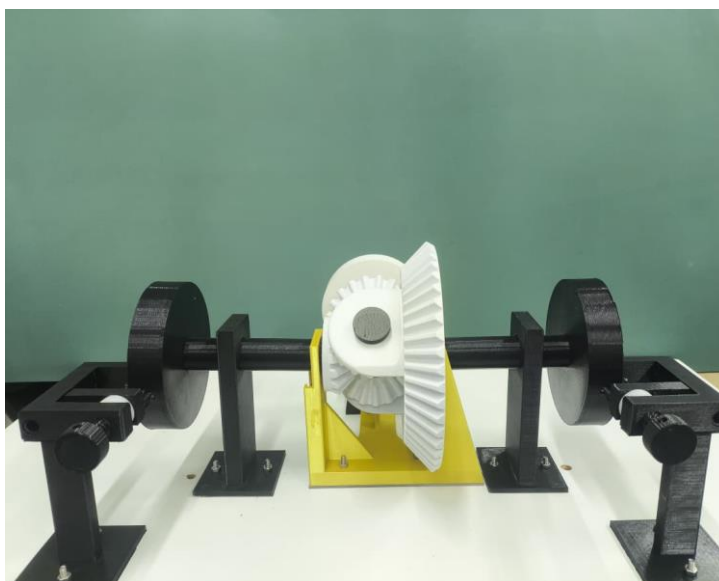
Posteriormente, foi efetuada a montagem do sistema de travamento do diferencial, etapa que exigiu maior precisão e cuidado. Para o correto funcionamento do mecanismo, tornou-se necessário o alinhamento rigoroso dos componentes em relação à bancada, de modo a evitar contatos inadequados entre as peças móveis, que poderiam comprometer o desempenho do

sistema ou ocasionar falhas mecânicas. Ajustes finos foram realizados durante essa fase, visando assegurar o engate e o desengate adequado do sistema de travamento.

As peças fabricadas por meio de impressão 3D foram então acopladas conforme o modelo tridimensional previamente desenvolvido, respeitando as tolerâncias dimensionais e o posicionamento estabelecido no projeto. Essa etapa permitiu verificar a compatibilidade entre os componentes impressos e o diferencial automotivo, bem como a estabilidade do conjunto montado.

Após a conclusão da montagem, a bancada didática (Figura 27) apresentou condições adequadas para a realização dos testes experimentais e das análises propostas neste trabalho, demonstrando robustez estrutural, bom alinhamento dos componentes e funcionamento satisfatório do sistema de travamento, atendendo aos objetivos estabelecidos para o protótipo.

Figura 27 – Bancada didática



Fonte: O autor

5.5.1 Testes e Avaliação do Funcionamento do Protótipo

Após a montagem do protótipo, foram realizados testes experimentais com o objetivo de verificar o funcionamento da bancada didática e avaliar o comportamento do diferencial automotivo em diferentes condições de operação. Os ensaios tiveram caráter qualitativo e visual, condizentes com a proposta didática do projeto.

Inicialmente, o sistema foi testado com o mecanismo de travamento desabilitado, permitindo observar o funcionamento do diferencial em condição livre. Nessa etapa, avaliou-

se a rotação igual entre as rodas, o alinhamento do conjunto, a estabilidade estrutural da bancada e a interação entre os componentes internos do diferencial.

Durante os primeiros testes, identificaram-se dificuldades relacionadas ao sistema de travamento, que não apresentou funcionamento adequado em sua configuração inicial. Foram observados problemas como folgas excessivas, interferências geométricas e travamento parcial indesejado. Em função disso, o mecanismo de travamento precisou ser remodelado e reimpresso diversas vezes, com ajustes sucessivos no projeto tridimensional até que fosse obtido um funcionamento satisfatório.

Após as modificações, novos testes foram realizados com o sistema de travamento acionado, possibilitando a análise comparativa entre os modos de operação livre e travado. Nessa fase, também foram observados ruídos, vibrações e o comportamento mecânico das peças produzidas por impressão 3D, verificando sua resistência para a aplicação proposta.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos a partir dos testes demonstraram que a bancada didática desenvolvida cumpre adequadamente sua função educacional, permitindo a visualização clara do funcionamento do diferencial automotivo e dos efeitos do sistema de travamento.

No modo de operação travado, foi possível observar a diferença de rotação entre as rodas, confirmando o princípio fundamental do diferencial, no qual as engrenagens internas permitem velocidades angulares distintas durante o movimento. Já no modo livre, o sistema passou a liberar essa diferença, fazendo com que os eixos girassem de forma solidária, evidenciando o funcionamento do diferencial aberto.

As dificuldades enfrentadas durante o desenvolvimento, especialmente no projeto do sistema de travamento, mostraram-se relevantes do ponto de vista acadêmico. A necessidade de remodelagem e ajustes sucessivos evidenciou a importância da etapa de prototipagem e validação prática, destacando limitações inerentes à impressão 3D, como tolerâncias dimensionais e resistência mecânica do material.

As peças fabricadas em PLA e PETG apresentaram desempenho satisfatório para os esforços envolvidos nos testes, não sendo observadas falhas estruturais durante a operação. Entretanto, verificou-se que o sistema apresenta limitações quanto à aplicação de cargas elevadas, o que reforça seu caráter didático e experimental.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho possibilitou o desenvolvimento de uma bancada didática funcional para o estudo do diferencial automotivo e de seu sistema de travamento, atendendo aos objetivos propostos. A utilização de ferramentas de modelagem tridimensional, aliadas à impressão 3D, permitiu a construção de um protótipo acessível, de baixo custo e adequado ao ambiente acadêmico.

As dificuldades encontradas ao longo do desenvolvimento, especialmente no projeto do sistema de travamento, contribuíram significativamente para o aprendizado prático, evidenciando a necessidade de iteração entre projeto, fabricação e testes. O fato de o sistema não ter funcionado adequadamente em sua primeira versão reforça a importância do processo de engenharia como um ciclo contínuo de melhoria.

Apesar das limitações dos materiais utilizados, o protótipo mostrou-se eficiente como ferramenta de apoio ao ensino, possibilitando a compreensão prática de conceitos relacionados à transmissão de potência, cinemática de engrenagens e funcionamento do diferencial automotivo.


Como trabalhos futuros, sugere-se a incorporação de sensores para medição de velocidade e torque, permitindo análises quantitativas, bem como o uso de materiais metálicos em componentes específicos, visando aumentar a robustez do sistema. A integração com sistemas eletrônicos também pode ampliar o escopo de estudo e aproximar o protótipo de aplicações industriais reais.

Conclui-se, portanto, que a bancada didática desenvolvida representa uma solução viável e eficaz para fins educacionais, promovendo a integração entre teoria e prática no ensino de Engenharia Mecânica.

8 REFERÊNCIAS

- AUTODESK. *Autodesk Inventor: visão geral*. Disponível em: <https://www.autodesk.com/br/products/inventor/overview>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- CEARÁ. Secretaria da Educação. *Manutenção automotiva: sistema de transmissão mecânica*. Fortaleza: SEDUC, 2011. Disponível em: https://www.seduc.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2011/10/manutencao_automotiva_sistema_de_transmissao_mecanica.pdf. Acesso em: 15 jan. 2026.
- CREALITY. *Creality software*. Disponível em: <https://wiki.creality.com/en/software>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- CROLA, D. A. *Automotive Engineering: Powertrain, Chassis System and Vehicle Body*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2009.
- DANA. *O que é o bloqueio do eixo diferencial?* Disponível em: <https://dana.com.br/o-que-e-o-bloqueio-do-eixo-diferencial/>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- DANA. *Posso trocar somente a coroa ou o pinhão?* Disponível em: <https://dana.com.br/posso-trocar-somente-a-coroa-ou-o-pinhao/>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- ENGRENAR JR. *Karl Benz: a história do inventor do automóvel*. Disponível em: <https://engrenarjr.com.br/blog/especial-grandes-inventores-karl-benz/>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- FLICKR. *Metalurgia do pó – imagens técnicas*. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/metalurgiadopo/7376798784/>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- FREMAR FUNDIÇÃO. *Fundição em areia verde*. Disponível em: <https://www.fremar.com.br/fundicao-areia-verde.html>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- FREMAR FUNDIÇÃO. *Fundição por coquilha*. Disponível em: <https://www.fremar.com.br/fundicao-coquilha.html>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- GROOVER, M. P. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.
- HEISLER, H. *Advanced Vehicle Technology*. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.
- JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. *Fundamentals of Machine Component Design*. 5. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.
- KMP DRIVETRAIN. *Plated limited slip differential explained*. Disponível em: <https://www.kmpdrivetrain.com/differentials/plated-limited-slip-differential-explained>. Acesso em: 15 jan. 2026.

- KMP DRIVETRAIN. *Torsen vs plated limited slip differential*. Disponível em: <https://www.kmpdrivetrain.com/differentials/torsen-vs-plated-limited-slip-differential/>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- MATHWORKS. *Limited Slip Differential*. Disponível em: <https://la.mathworks.com/help/sdl/ref/limitedslipdifferential.html>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- MATHWORKS. *Open Differential Model*. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/vdynblks/ref/opendifferential.html>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- PECQUEUR MOTORISTS. *Différentiel Pecqueur – le génie mécanique à votre poignet*. Disponível em: <https://www.pecqueurmotorists.com/differentiel-pecqueur-le-genie-mecanique-a-votre-poignet/>. Acesso em: 3 fev. 2026.
- QUADRATEC. *Clutch system basics and operation*. Disponível em: <https://www.quadratec.com/c/reference/clutch-system-basics-and-operation>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- SANDVIK COROMANT. *InvoMilling*. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/tools/digital-machining/coroplus-tool-path/invomilling>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. *Mechanical Engineering Design*. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2005.
- THE ENGINEERS POST. *Manual transmission*. Disponível em: <https://www.theengineerspost.com/manual-transmission/>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- TOYODA DO BRASIL. *O que é Power Skiving?* Disponível em: <https://www.toyoda.com.br/o-que-e-power-skiving/>. Acesso em: 15 jan. 2026.

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850
	Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, João Pessoa (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Trabalho de Conclusão de curso - TCC

Assunto:	Trabalho de Conclusão de curso - TCC
Assinado por:	Michelline Nery
Tipo do Documento:	Anexo
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Documento Original

Documento assinado eletronicamente por:

- **Michelline Nery Azevedo Lima, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - CCSBEM-JP**, em 28/04/2026 16:24:38.

Este documento foi armazenado no SUAP em 28/04/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1847173

Código de Autenticação: da92b0360f

