

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

**INGO ANTONIOLLI CECCAGNO**

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE CILINDRO  
MESTRE DE EMBREAGEM PARA VEÍCULOS COMERCIAIS**

**CAXIAS DO SUL**

**2023**

**INGO ANTONIOLLI CECCAGNO**

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE CILINDRO  
MESTRE DE EMBREAGEM PARA VEÍCULOS COMERCIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Automotiva da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientador Prof. Me Adelair Lino Colombo

**CAXIAS DO SUL**

**2023**

**INGO ANTONIOLLI CECCAGNO**

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE CILINDRO  
MESTRE DE EMBREAGEM PARA VEÍCULOS COMERCIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Automotiva da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Automotiva.

**Aprovado em 05/12/2023**

**Banca Examinadora**

---

Prof. Me Adelair Lino Colombo  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof. Dr. Vagner do Nascimento  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof. Me Paulo Roberto Linzmaier  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

## RESUMO

Este trabalho teve como estudo o desenvolvimento e validação de um cilindro mestre de embreagem para veículos comerciais. O produto foi projetado para ser capaz de substituir um modelo já existente no mercado que seria descontinuado. Através da utilização da metodologia de elementos finitos foi possível otimizar o projeto da carcaça do cilindro e reduzir a sua massa em 51%. O projeto também contou com a fabricação e instalação de protótipos em um veículo de seu quadro de aplicações para realização de testes funcionais. Com o auxílio de instrumentação foi possível coletar dados importantes para analisar o funcionamento do sistema como pressão hidráulica, deslocamento do garfo da embreagem, força no pedal e curso do pedal. Os valores dos parâmetros coletados e o funcionamento do cilindro atenderam aos requisitos do projeto. Para a validação da durabilidade do protótipo foi desenvolvida uma bancada de testes cíclicos. Os dados coletados em veículos foram utilizados na calibração da bancada, ajudando a alcançar um comportamento fiel à condição real. As primeiras amostras testadas suportavam uma baixa ciclagem, e após alguns ajustes finos, a melhor amostra chegou à marca de 320 mil ciclos. Embora o requisito de validação de durabilidade para o mercado OEM seja de 4 milhões de ciclos, foi possível avançar muito com o projeto e nortear os próximos passos.

**Palavras-chave:** engenharia Automotiva, cilindro mestre de embreagem, desenvolvimento, projeto.

## **ABSTRACT**

This work studied the development and validation of a clutch master cylinder for commercial vehicles. The product was designed to be able to replace a model already on the market that would be discontinued. Using finite element methodology, it was possible to optimize the design of the cylinder housing and reduce its mass by 51%. The project also involves manufacturing and installing prototypes in a vehicle from its application framework to carry out functional tests. With the aid of instrumentation, it was possible to collect important data to analyze the functioning of the system, such as hydraulic pressure, clutch fork stroke, pedal force and pedal travel. The collected parameter values and cylinder operation met the project requirements. To validate the durability of the prototype, a cyclic test bench was developed. Data collected in vehicles was used on the bench, helping to achieve true-to-real-condition behavior. The first samples tested supported low cycling, and after some fine adjustments, the best sample reached the mark of 320 thousand cycles. Although the durability validation requirement for the OEM market is 4 million cycles, it was possible to make great progress with the project and guide the next steps.

**Keywords: Automotive engineering, clutch master cylinder, development, design.**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de sistema de embreagem automotiva e seus componentes .....	14
Figura 2 - Embreagem acoplada vs. Desacoplada.....	15
Figura 3 - Transmissão de força em um sistema de embreagem.....	16
Figura 4 - Curva de acionamento de um platô convencional .....	17
Figura 5 - Sistema SAC da LuK.....	18
Figura 6 - Sistema de platô ajustável de outra fabricante.....	19
Figura 7 - Comparativo do esforço de acionamento entre platô convencional e platô autoajustável.....	19
Figura 8 - Sistema de atuação de embreagem por cabo mecânico com platô empurrado. ....	20
Figura 9 - Sistema Hidráulico de Atuação de Embreagem com platô empurrado. ....	21
Figura 10 - Sistema de cilindro escravo com auxílio pneumático.....	22
Figura 11 - Sistema de cilindro mestre hidráulico.....	23
Figura 12 - Bancada de eficiência .....	25
Figura 13 - Bancada de durabilidade e câmaras de temperatura .....	25
Figura 14 - Trajetórias que podem ser seguidas na solução de cálculos estruturais .....	26
Figura 15- Exemplos de geometria, elemento e malhas de elemento finitos. ....	27
Figura 16 - Tipos de elementos finitos .....	28
Figura 17- Fluxograma de trabalho .....	30
Figura 18 - Corpo do cilindro mestre de embreagem benchmark. ....	32
Figura 19 - Corpo de prova para caracterização do material proposto Al305.....	33
Figura 20 - Pedal da embreagem de VW 17230 OD.....	34
Figura 21 - Carregamentos aplicados no modelo. ....	35
Figura 22 - Modelo com as restrições impostas .....	35
Figura 23 - Malha .....	36
Figura 24 - Bancada do teste Burst.....	37
Figura 25- Cilindros testados no veículo. benchmark à esquerda e Protótipo à direita .....	38
Figura 26 - Veículo usado na coleta de dados .....	38
Figura 27 - Pontos de coleta de dados .....	39
Figura 28 - Sistema de servo com auxílio pneumático.....	40
Figura 29 - Bancada de validação.....	41
Figura 30 - Tensão x Deformação da carcaça de FoFo Benchmark.....	42
Figura 31 - Tensão x Deformação da Carcaça proposta em alumínio 305.....	43

Figura 32 - Resultados da análise estática .....	44
Figura 33 - Resultados de deslocamentos.....	45
Figura 34 - Comparativo carcaça Benchmark (FoFo) e proposta (AI 305).....	46
Figura 35 - Brunimento de cilindro .....	47
Figura 36 - Gaxeta folgada no êmbolo .....	47
Figura 37 - Protótipo em vista explodida .....	48
Figura 38 - Sucesso na redução de peso .....	48
Figura 39 - Resultados da coleta de dados .....	50
Figura 40 - Resultados da bancada de validação .....	51
Figura 41 - Êmbolo desmontado e Protótipo após falhar no teste de durabilidade.....	52

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro de aplicações do cilindro mestre em desenvolvimento .....	31
--	----

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CMC	Clutch Master Cylinder (cilindro mestre de embreagem)
CSC	Concentric Slave Cylinder (cilindro escravo concentrico)
rpm	Rotações por minuto
SAC	Self Adjusting Clutch (embreagem auto-ajustável)
SAT	Self Adjusting Tecnology (tecnologia de autoajuste)
IATF	International Automotive Task Force
CAE	Computer-Aided Engineering
MEF	Método dos Elementos Finitos
OEM	Original Equipment Manufacturer (Fabricante Original do Equipamento)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	12
1.2	OBJETIVOS .....	12
1.2.1	Objetivo geral .....	12
1.2.2	Objetivos específicos .....	12
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>14</b>
2.1	SISTEMAS DE EMBREAGEM .....	14
2.1.2	Platô e disco convencionais .....	15
2.1.3	Desgaste do material de atrito da embreagem .....	17
2.1.4	Mecanismos de compensação de desgaste da embreagem .....	18
2.2	SISTEMAS DE ATUAÇÃO .....	20
2.2.1	Sistema de atuação de embreagem por cabo mecânico .....	20
2.2.2	Sistema hidráulico de atuação de embreagem .....	21
2.2.3	Servo de embreagem com auxílio pneumático .....	22
2.3	PRESSÃO.....	22
2.4	FLUÍDOS DOT .....	23
2.5	BANCADAS DE VALIDAÇÃO DE PRODUTOS.....	24
2.6	ANÁLISES DE CAE.....	26
2.6.1	Malha .....	26
2.6.2	Condições de contorno .....	27
2.6.3	Tipos de elementos .....	28
2.6.4	Tipos de análise .....	29
2.6.4.1	Análise linear .....	29
<b>3</b>	<b>PROPOSTA DE TRABALHO .....</b>	<b>30</b>
3.1	DETALHAMENTO DO OBJETO DE ESTUDO .....	30
3.2	BENCHMARKING.....	31
3.3	PROJETO 3D E 2D.....	31
3.3.1	Análise de CAE .....	33
3.4	FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO.....	36
3.5	TESTE DE BURST.....	36

3.6	COLETA DE DADOS EM VEÍCULO.....	37
3.6.1	Pontos instrumentados.....	38
3.7	BANCADA DE VALIDAÇÃO .....	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>42</b>
4.1	ANÁLISE DE CAE.....	42
4.1.1	Características dos materiais .....	42
4.1.2	Análise estrutural estática e de deslocamentos.....	43
4.2	PREPARAÇÃO DO PROTÓTIPO .....	46
4.3	RESULTADOS DO TESTE DE BURST .....	49
4.4	RESULTADOS DA COLETA DE DADOS EM VEÍCULO .....	49
4.5	RESULTADOS DA CICLAGEM EM BANCADA DE TESTES .....	51
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>54</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde a chegada dos automóveis à sua concepção moderna, por volta de 1886, o homem vem aprimorando e adaptando esta invenção, que viria a se tornar um dos artifícios mais importantes no desenvolvimento da humanidade. Foram muitas as versões e adaptações feitas para atender as necessidades da sociedade, e cada vez mais o veículo automotor foi se fazendo presente em nossas vidas, tornando-se algo indispensável.

O transporte de cargas por meio de veículos comerciais é um processo de grande importância na cadeia produtiva das organizações. Seja para receber matéria-prima ou para entregar o produto final ao consumidor, as empresas são altamente dependentes das transportadoras e dos veículos de carga, principalmente quando se trata de um país como o Brasil, onde este processo ocorre essencialmente através das rodovias. Este é o principal meio que o brasileiro utiliza para conectar suas riquezas de norte a sul, gerando a prosperidade e oportunidades que são essenciais para o país continuar crescendo.

Dentre os diversos sistemas do automóvel, seja motor, suspensão, freios e chassis, podemos citar a transmissão como um dos que tem maior influência para a versatilidade dos veículos. Isso por que é ela que otimiza o aproveitamento da força gerada pelo propulsor, possibilitando que o conjunto todo consiga se locomover adequadamente desde velocidades mais lentas à mais rápidas, e também superar obstáculos que exijam uma determinada faixa de torque do motor. Isto é possível por conta da troca de marchas, que num sistema de câmbio manual com auxílio de uma embreagem, ocorre com o desacoplamento entre o sistema motriz e as rodas, e por consequente seleção de outra engrenagem de escolha do motorista, através de uma manopla de câmbio no interior da cabine.

O acionamento da embreagem é um aspecto importante quando se avalia o conforto ao dirigir um veículo de câmbio manual, principalmente quando se trata de aplicações em veículos comerciais médios e pesados, nos quais é necessária uma grande força para desacoplar o sistema que tem peças maiores e mais pesadas. Atualmente a atuação da embreagem pode ser feita de duas maneiras: por cabo, que desacopla a embreagem quando o motorista pisa do pedal, ou por meio de um Cilindro Mestre, que converte a força exercida no pedal em pressão hidráulica para desacoplar o sistema.

O Cilindro Mestre de Embreagem, cuja abreviatura *CMC*, derivada do inglês “clutch master cylinder”, é um conceito que ganhou força no mercado de veículos leves nos últimos anos, mas é indispensável nos pesados há muito tempo. Sem um destes, a operação de determinados tipos de veículos por longas jornadas seria impraticável atualmente. Um sistema

de desacoplamento atuado hidráulicamente deixa o pedal mais leve que o caso do clássico acionamento por cabo, além de proporcionar maior controle e precisão do movimento. A repetida execução do movimento de pisar na embreagem, tendo que exercer uma força muito alta, faz com que o trabalho do motorista seja muito mais exaustivo.

O desenvolvimento e validação de autopeças, como um cilindro mestre de embreagem, é um processo que envolve diversas etapas e pode ser demorado para se conseguir alcançar o objetivo. Projetar, fabricar e montar um protótipo e testar é o caminho natural para se validar um sistema, para assim verificar sua eficiência com relação à performance esperada.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A busca por ampliação de portfólio de componentes é um fator importante para o desenvolvimento das empresas que visam abranger novos mercados e custear seus investimentos. Estas oportunidades podem surgir de diversas maneiras, seja por inovação ou para suprir alguma demanda existente. Quando um fornecedor deixa de fornecer determinado produto, e outra empresa tem a possibilidade de desenvolvê-lo e começar a fornecer no lugar deste, aí está uma oportunidade de mercado.

O mercado OEM tem como característica buscar por fornecedores que possam atender a requisitos mais elevados. Com isto vem uma maior dificuldade, não só de validar estes produtos, mas também de manter o fornecimento com qualidade assegurada.

Com base neste cenário, à Master Sistemas Automotivos, empresa líder no mercado de freios na América Latina e localizada em Caxias do Sul - RS, objetiva desenvolver um sistema de cilindro mestre para atender a demanda de mercado.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo do trabalho é desenvolver e validar um sistema de cilindro mestre de embreagem aplicado em veículos comerciais.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Do objetivo geral derivam-se os específicos como sendo:

- a) Revisar o funcionamento e conceito de cilindro mestre de embreagem;

- b) Projetar o cilindro mestre de embreagem;
- c) Simular a carcaça do cilindro mestre através do software de elementos finitos;
- d) Montar protótipo do cilindro mestre de embreagem e testar experimentalmente com auxílio de uma bancada de testes.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como finalidade introduzir conceitos necessários para a compreensão deste trabalho. Como a proposta é o desenvolvimento de um componente de embreagem, além de compreender seu funcionamento, será necessário abranger os demais componentes do sistema e suas possíveis variações, que serão tratados a seguir.

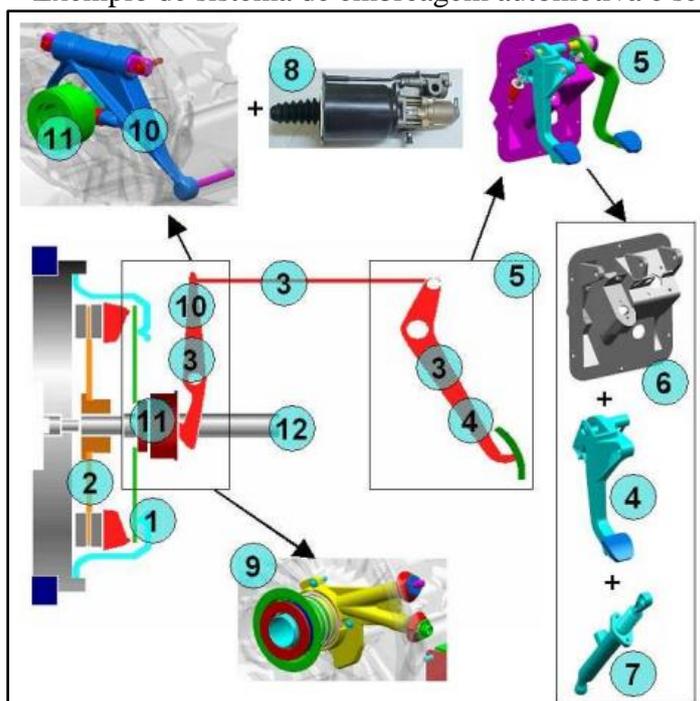
### 2.1 SISTEMAS DE EMBREAGEM

Segundo Santos (2006), a função elementar de um sistema de embreagem é desacoplar o motor do conjunto da transmissão para possibilitar a troca de marchas. Em um câmbio manual, o sistema de embreagem é composto por platô, disco de embreagem, mancal e rolamento, pedal e sistema de acionamento, que pode ser mecânico, hidráulico, pneumático ou a combinação de ambos). No sistema de câmbio convencional sincronizado, a embreagem é acionada em todas as trocas.

Em câmbios automáticos, o uso do pedal é dispensado e a troca é feita por um sistema de controle eletrônico que determina a melhor condição para a troca de marchas sem comprometer o conforto dos ocupantes e a durabilidade do conjunto.

Para compreender do funcionamento do sistema, é necessário conhecer seus componentes. Na Figura 1 podemos ter uma visão geral do sistema e suas partes listadas abaixo:

Figura 1 – Exemplo de sistema de embreagem automotiva e seus componentes



Fonte: (MOMISSO,2004).

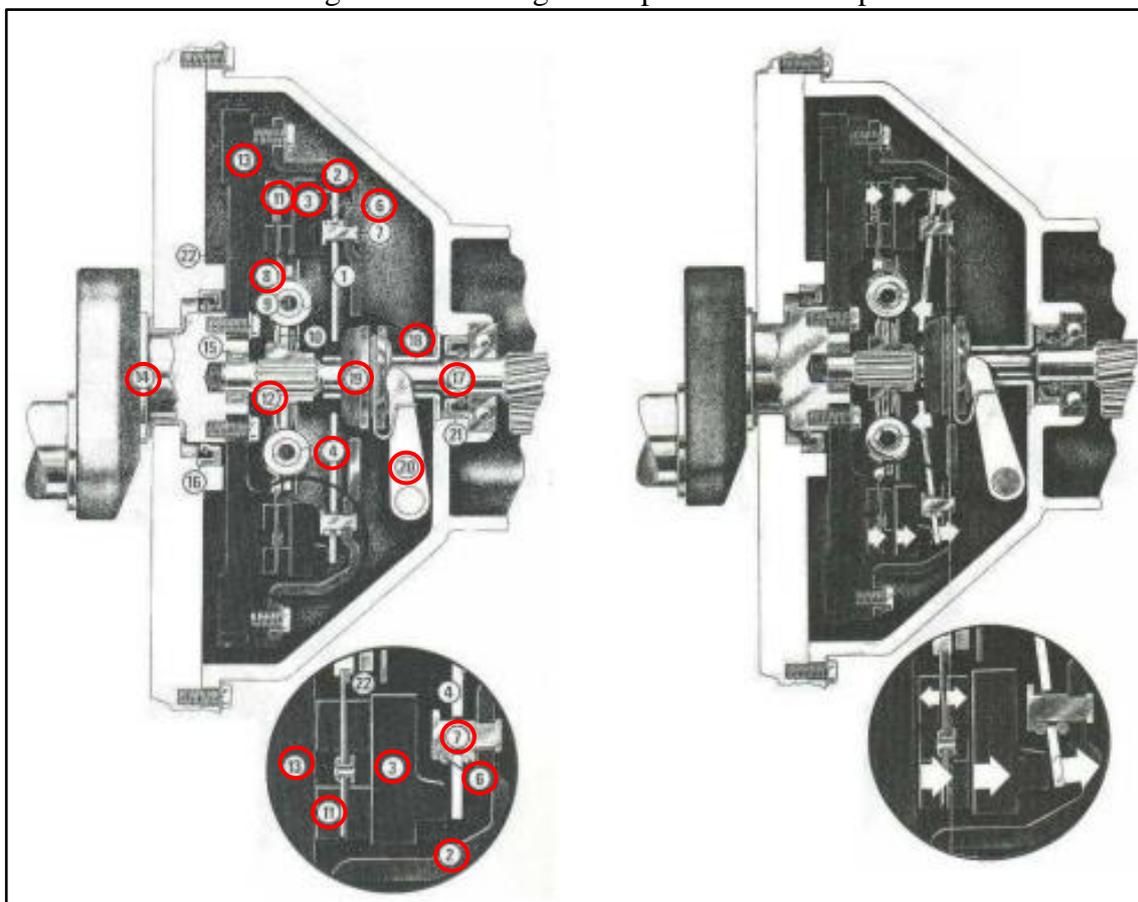
1 – Platô de Embreagem; 2 – Disco de Embreagem; 3 – Sistema de Acionamento; 4 – Alavanca Pedal; 5 – Pedaleira; 6 – Cavalete de Fixação; 7 – Cilindro Mestre; 8 – Cilindro Auxiliar ou servo de embreagem; 9 – CSC (Cilindro Escravo Concêntrico); 10 – Garfo de Embreagem; 11 – Mancal; 12 – Eixo Piloto.

Visto isso, sabe-se que o acionamento da embreagem através do pedal de embreagem, permite a interrupção da comunicação entre rotação do motor e eixo piloto da caixa de câmbio. Mais detalhes sobre o sistema de acionamento serão tratados nos próximos capítulos.

### 2.1.2 Platô e disco convencionais

Ainda sobre o funcionamento de um sistema de embreagem automotivo, é importante que se compreenda como a força do motor é transmitida pela embreagem para o restante da transmissão. A Figura 2 auxilia nesta compreensão mostrando a movimentação dos componentes listados em cada condição de embreagem: acoplada ou desacoplada.

Figura 2 - Embreagem acoplada vs. Desacoplada



Fonte: adaptado de SHAVER, 1997

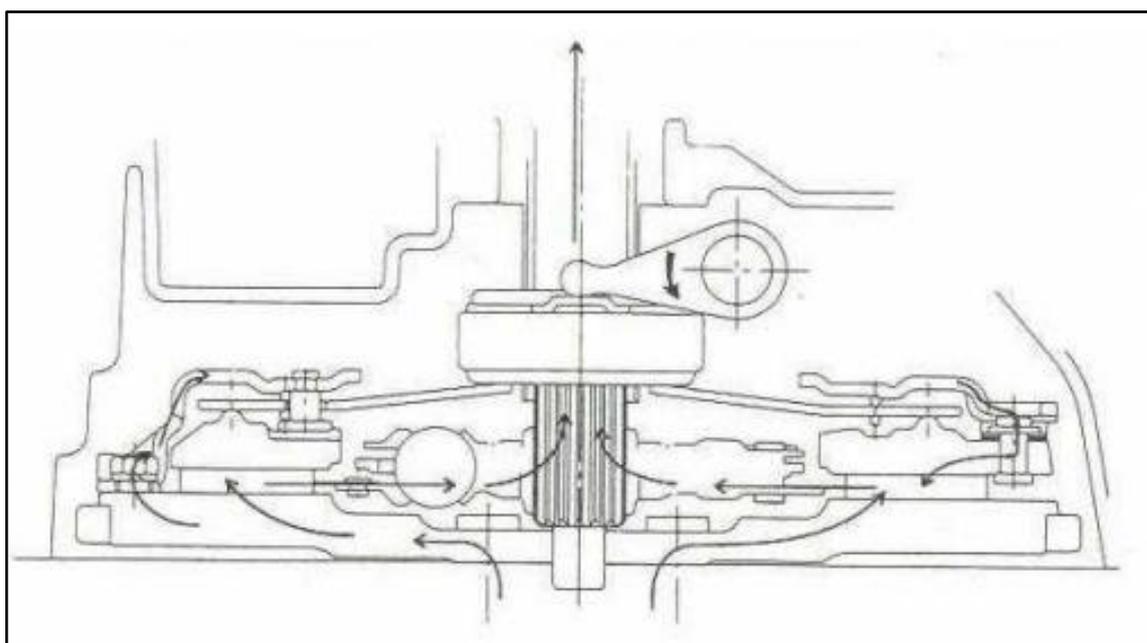
2 - Carcaça do Platô de Embreagem; 3 - Placa de Pressão; 4 - Mola Membrana; 6 - Anel de Apoio; 8 - Chapa de Condução; 11 - Material de atrito / lona; 12 - Cubo do Disco de Embreagem; 13 – Volante; 14 – Virabrequim; 17 - Eixo Piloto do Câmbio; 18. Tubo Guia do Mancal; 19. Mancal e Rolamento de Acionamento do Platô; 20. Garfo de Acionamento

Santos (2006) explica que três componentes determinam o trabalho da embreagem: disco, platô e volante. O platô de embreagem é solidário ao volante do motor, enquanto o disco de embreagem é solidário ao eixo piloto do câmbio. Na condição desacoplada, volante e platô giram em função da rpm do motor, enquanto o eixo piloto tem rotação dependente das rodas do veículo.

Ao pisar no pedal da embreagem, o motorista desacopla o sistema, permitindo a troca de marchas, ou engrenagens. Assim que ele soltar o pedal da embreagem, a mola membrana pressionará a placa de pressão do platô contra o volante e assim, todos estes componentes passam a girar juntos, transmitindo o torque ao eixo piloto e por consequência às rodas, passando à condição acoplada.

Na Figura 3, há uma representação da transmissão do torque do motor para o câmbio, passando pelo volante do motor, corpo do platô, placa de pressão e chegando ao material de atrito, que por sua vez transmitem o torque para o cubo do disco e por fim eixo piloto do câmbio.

Figura 3 - Transmissão de força em um sistema de embreagem



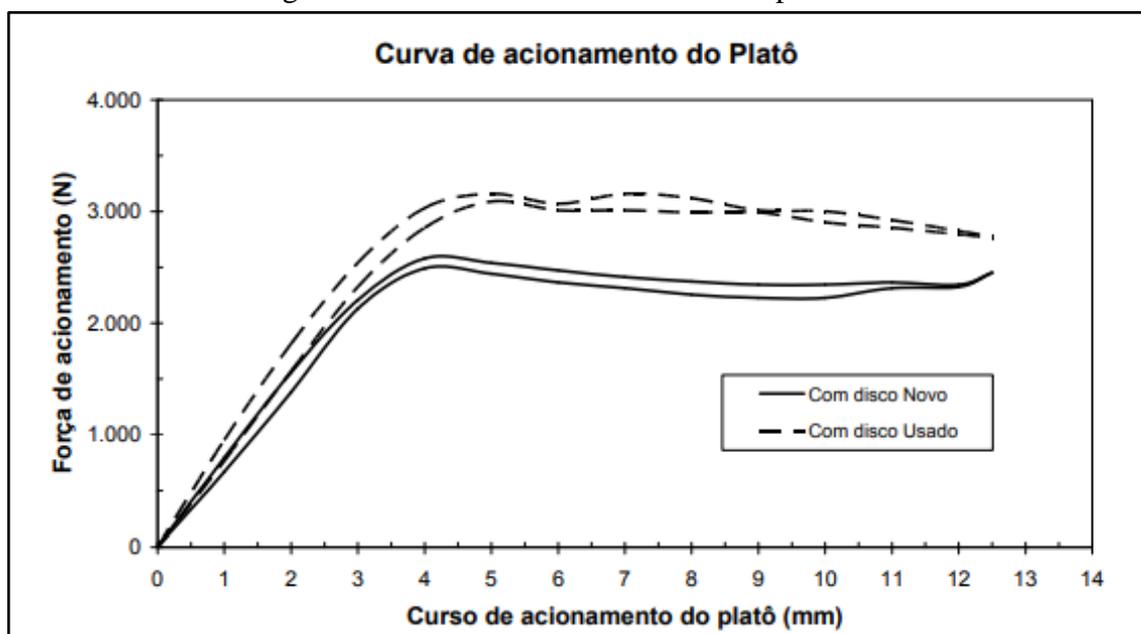
Fonte: (SHAVER, 1997).

### 2.1.3 Desgaste do material de atrito da embreagem

Sabemos que o contato entre o conjunto de embreagem e o volante do motor é feito pelo material de atrito presente na placa de pressão, também conhecido como lona. A cada novo acoplamento com o veículo em movimento ocorre um pequeno desgaste. Isto ocorre por que os componentes estão girando em velocidades diferentes no momento em que se tocam, e até que se acoplem totalmente e igualem as velocidades, a lona está submetida à fricção contra o volante. Uma embreagem usada adequadamente deve durar mais de 100 mil quilômetros, mas o desgaste pode ser acentuado de acordo com a conduta do motorista.

Sobre o desgaste do material de atrito da embreagem, Santos afirma que quanto maior o desgaste, maior o esforço de acionamento, podendo aumentar em até 30%. Esta variação precisa ser levada em conta ao projetar um sistema de acionamento hidráulico, pois pode ser que o projeto atenda ao requisito na condição “novo”, mas não na condição “usado”. Na Figura 4 é possível observar a diferença no comportamento com disco novo e disco usado. (2006)

Figura 4 - Curva de acionamento de um platô convencional



Fonte: (SANTOS, 2006)

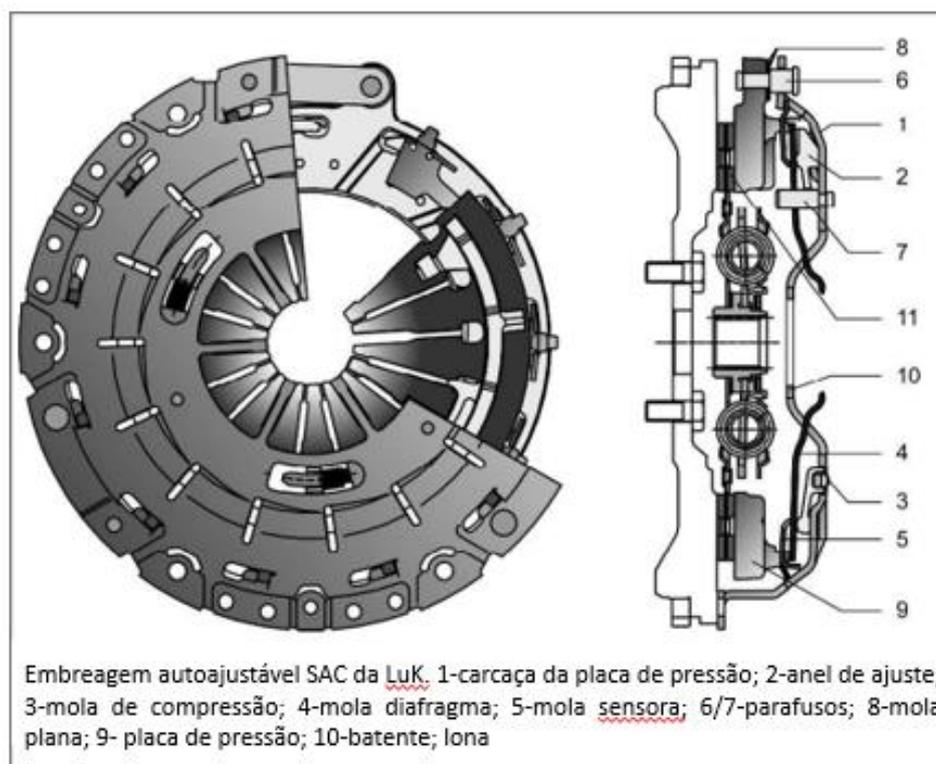
Isto ocorre, pois, a mola diafragma compensa o desgaste da lona, avançando mais. Essa distância se traduz no pedal de embreagem e pode ser sentida pelo motorista. Essa característica pode ser solucionada com o uso de um platô autoajustável, que será abordado no próximo capítulo.

### 2.1.4 Mecanismos de compensação de desgaste da embreagem

Segundo Naunheimer et al. (1999), a maior quantidade de desgaste em embreagens de fricção de funcionamento a seco ocorre no material de atrito do disco da embreagem. O volante do motor e a placa de pressão quase não sofrem desgaste. Para garantir uma força de atuação constante - força de liberação - ao longo da vida útil, hoje alguns mecanismos de ajuste são integrados na placa de pressão, fazendo ajustes automáticos após cada atuação da placa de pressão. Desta forma, o desgaste da lona é independente do movimento da mola diafragma. O mecanismo de desgaste registra o desgaste do revestimento e compensa a distância girando o anel de ajuste.

Esses mecanismos automáticos de compensação de desgaste são conhecidos, por exemplo, pelos nomes dos produtos SAC (Self-Adjusting Clutch, ou embreagem autoajustável, em português) da LuK, XTend da ZF Sachs ou SAT (Self-Adjusting Technology, ou tecnologia de autoajuste) da Valeo. A Figura 5 mostra uma embreagem autoajustável representativa da empresa LuK. Na embreagem mostrada, a montagem da mola diafragma 4 é suportada por uma mola sensora 5 no alojamento da placa de pressão, possuindo um curso suficientemente longo com força quase constante.

Figura 5 - Sistema SAC da LuK.



Fonte: Naunheimer et al. (1999)

Se a força de liberação for menor que a força de retenção da mola do sensor, o suporte pivô da mola do diafragma fica no mesmo lugar quando a embreagem é solta. Como a força de liberação aumenta quando os revestimentos da embreagem se desgastam, a força contrária da mola do sensor é excedida e a montagem do pivô desvia na direção do volante até que a força de liberação volte ao nível da força do sensor. Quando a mola do sensor oscila, aparece uma folga entre a montagem do pivô da mola de diafragma e a carcaça da placa de pressão que preenche o espaço entre o mancal da mola do diafragma e o alojamento da placa de pressão girando o anel de ajuste 2. O próprio anel de ajuste se move em rampas opostas na carcaça da placa de pressão e é pré-carregado por pequenas molas de compressão 3 na direção da circunferência. Outro sistema de embreagem autoajustável pode ser visto abaixo, na Figura 6.

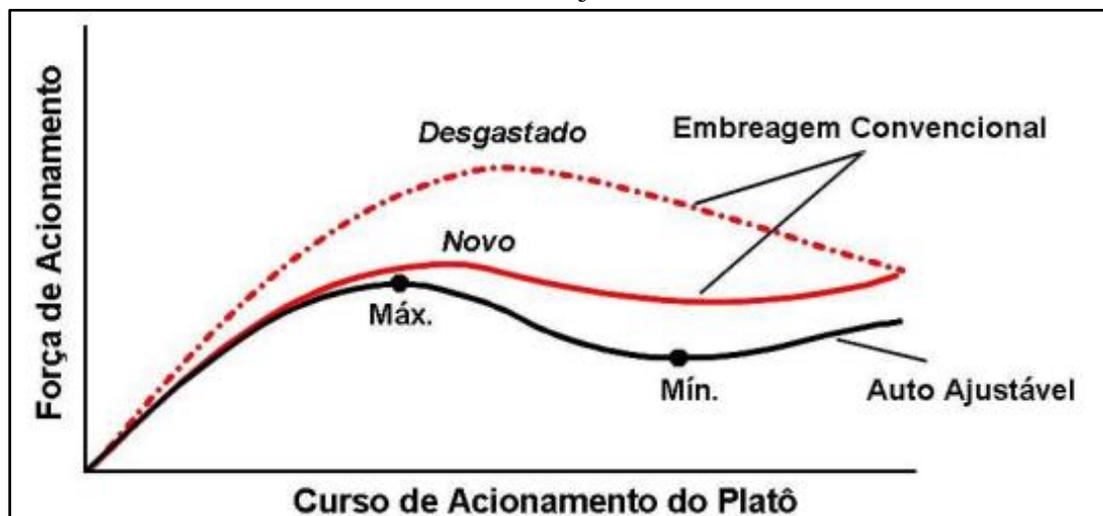
Figura 6 - Sistema de platô ajustável de outra fabricante



Fonte: (VALEO, 2004)

No gráfico da Figura 7 é possível comparar o comportamento da força de acionamento de um platô autoajustável e um platô convencional nas condições “novo” e “desgastado”.

Figura 7 - Comparativo do esforço de acionamento entre platô convencional e platô autoajustável



Fonte: (SCHAEFFLER, 2006)

## 2.2 SISTEMAS DE ATUAÇÃO

Os sistemas de atuação se referem a todos componentes que são responsáveis por realizar o movimento de acionamento do conjunto. O CMC se enquadra neste grupo de sistemas da embreagem.

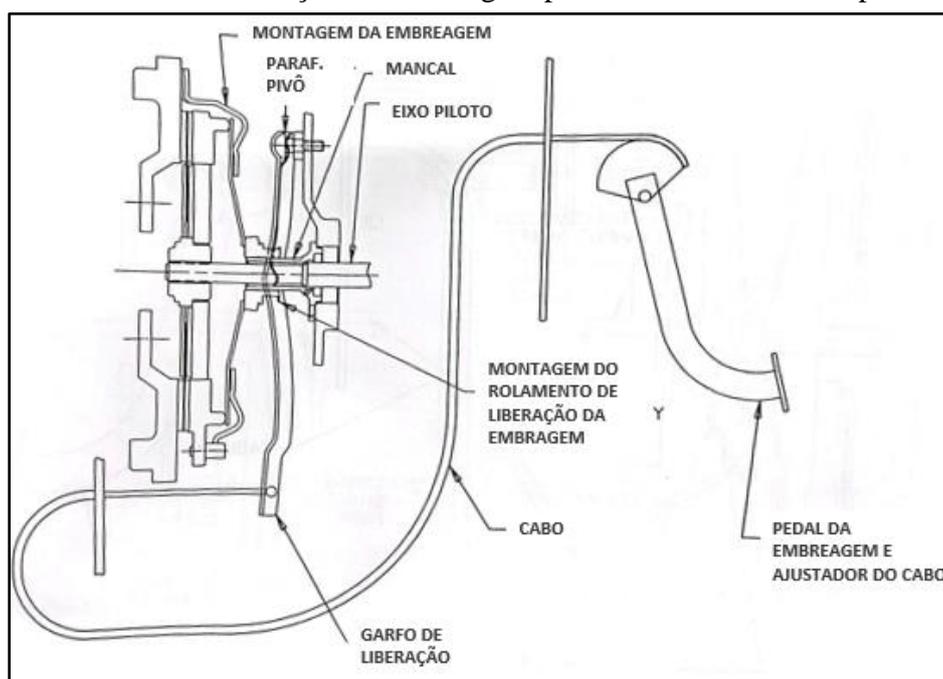
### 2.2.1 Sistema de atuação de embreagem por cabo mecânico

De acordo com Shaver (1997), um sistema básico de atuação de embreagem por cabo mecânico consiste em pedal, ajustador de cabo, cabo, garfo de liberação, pino pivô, rolamento/mancal e eixo piloto para o mancal deslizar (ver Figura 8).

A força e curso do pedal são convertidas em curso e força agindo no cabo. O cabo transmite o curso e força para o garfo de liberação. O garfo rotaciona do pino pivô, convertendo a força e curso do cabo em curso e força agindo no rolamento/mancal, que por sua vez desliza no eixo piloto, pressionando a mola diafragma da embreagem e desacoplando ou acoplando o sistema.

A posição inicial do sistema muda de acordo com o desgaste do material de atrito da embreagem. O sistema de atuação precisa compensar essa mudança para manter o bom funcionamento da embreagem. O ajustador de cabo, normalmente localizado próximo à alavanca do pedal, faz essa compensação, mudando o curso efetivo do cabo.

Figura 8 - Sistema de atuação de embreagem por cabo mecânico com platô empurrado.



Fonte: adaptado de SHAVER, 1997.

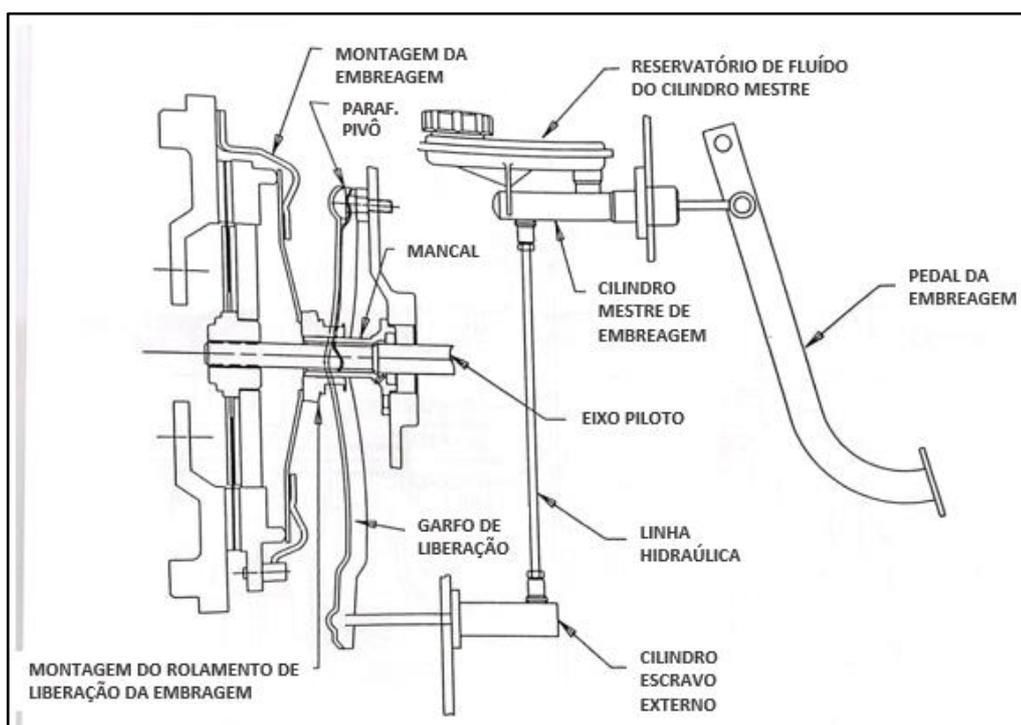
## 2.2.2 Sistema hidráulico de atuação de embreagem

Segundo Shaver (1997), um sistema básico de atuação de embreagem hidráulico consiste em pedal de embreagem, cilindro mestre de embreagem, linha hidráulica, cilindro escravo (montado externamente à capa seca da embreagem), garfo de liberação, rolamento/mancal, pino pivô e eixo piloto para o mancal deslizar (ver Figura 9)

Esse sistema usa pressão hidráulica em vez do cabo visto na versão de atuação mecânica. O curso e força do pedal de embreagem transmitidos à haste do cilindro mestre são convertidos em pressão e movimento do fluido pelo cilindro mestre. A linha hidráulica transmite o fluido pressurizado para o cilindro escravo, que por sua vez converte em curso e força transmitidos ao garfo de liberação pela haste do cilindro escravo. O pino pivô permite a rotação do garfo, e a partir daí, o funcionamento é idêntico ao sistema de acionamento mecânico, permitindo liberar ou acoplar a embreagem.

A posição inicial do sistema muda de acordo com o desgaste do material de atrito. Essa mudança é transmitida à haste do cilindro escravo através da alavanca de acionamento, alterando seu volume interno. Essa mudança de volume faz com que um pouco do fluido retorne para o reservatório através da linha hidráulica e do cilindro mestre, acomodando as mudanças na posição inicial do sistema.

Figura 9 - Sistema Hidráulico de Atuação de Embreagem com platô empurrado.

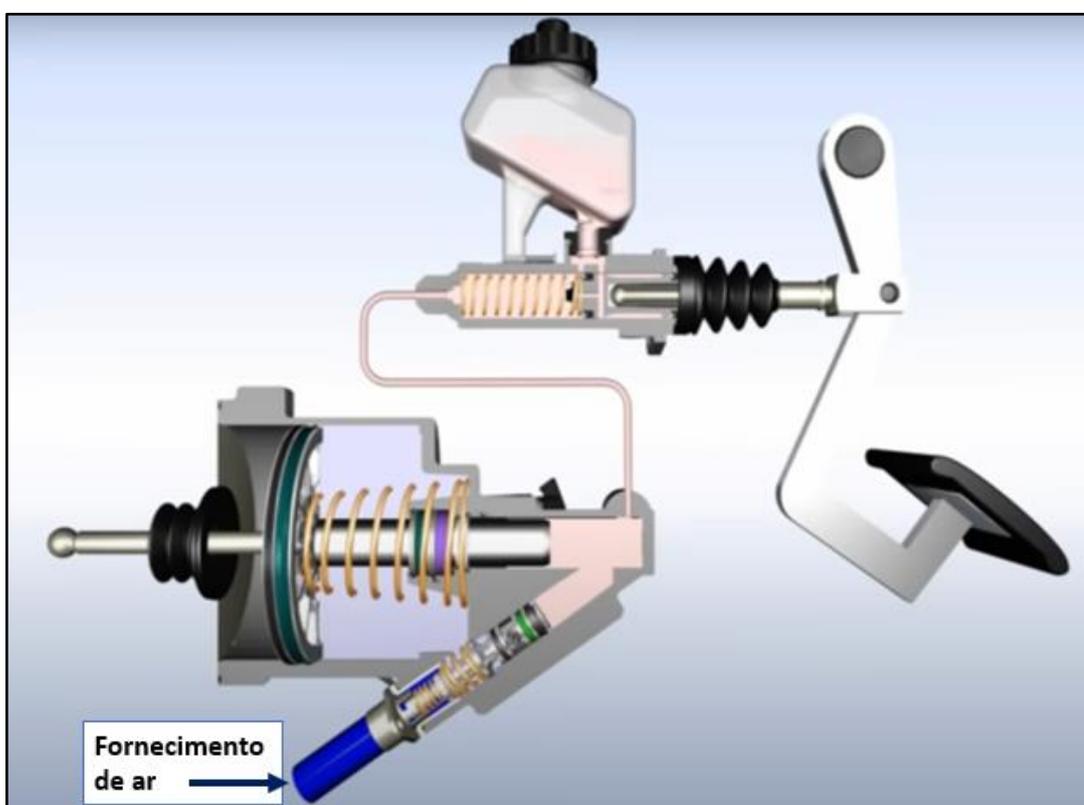


Fonte: adaptado de SHAVER, 1997.

### 2.2.3 Servo de embreagem com auxílio pneumático

A função do servo de embreagem, também conhecido como cilindro escavo, é transmitir curso e força de sua haste para acionar o garfo de liberação da embreagem. Em veículos pesados é comum existir um auxílio pneumático neste componente, que entra em ação após uma determinada pressão hidráulica ser atingida. Isso é feito através de um êmbolo que, quando acionado pela pressão hidráulica, permite a entrada de ar pressurizado que ajuda a pressionar o pistão que aciona a haste do servo, tornando o pedal mais leve para o motorista. O dispositivo pode ser visto na Figura 10 abaixo.

Figura 10 - Sistema de cilindro escravo com auxílio pneumático.



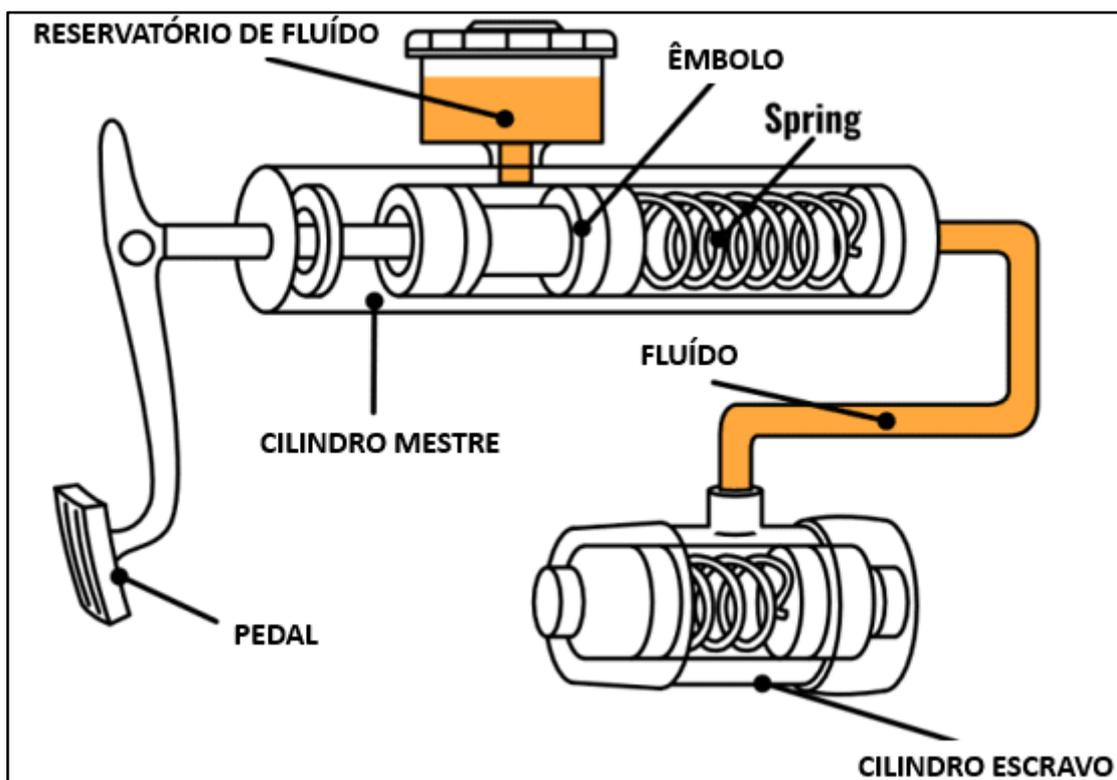
Fonte: adaptado de vídeo da Knorr-Bremse

### 2.3 PRESSÃO

Como o CMC é um componente que utiliza a mecânica dos fluídos como princípio, é importante revermos a Lei de Pascal. Esta lei diz que a pressão aplicada em um fluído em equilíbrio é distribuída de maneira uniforme em todos os pontos do fluído, incluindo as paredes do recipiente em que ele está contido.

Esta lei explica como o cilindro consegue realizar a conversão da força mecânica exercida no pedal em força hidráulica, resultando no acionamento do cilindro escravo e consequentemente do garfo de liberação da embreagem. Na Figura 11 abaixo vemos um sistema de cilindro mestre hidráulico e seus componentes:

Figura 11 - Sistema de cilindro mestre hidráulico.



Fonte: adaptado do site General Transmission.

## 2.4 FLUÍDOS DOT

Cada fabricante de cilindro mestre especifica o tipo de fluido que deve ser utilizado. É importante utilizar o fluido correto para não afetar os componentes internos, desempenho e durabilidade do conjunto. Os fluidos utilizados em cilindros de embreagem costumam ser os mesmos de freios de linha automotiva, classificados geralmente de acordo com a norma DOT.

A norma DOT está diretamente relacionada à capacidade e ponto de ebulição do fluido. O fluido originalmente utilizado no componente a ser desenvolvido é DOT 4, e para não afetar os veículos que já o aplicam, o produto precisa ser desenvolvido considerando a utilização deste mesmo fluido.

As principais características deste fluido são incompressibilidade independente da temperatura, evitar corrosão, não agredir borrachas do sistema, base de óleo + glicol, ponto de ebulição à 230 °C.

## 2.5 BANCADAS DE VALIDAÇÃO DE PRODUTOS

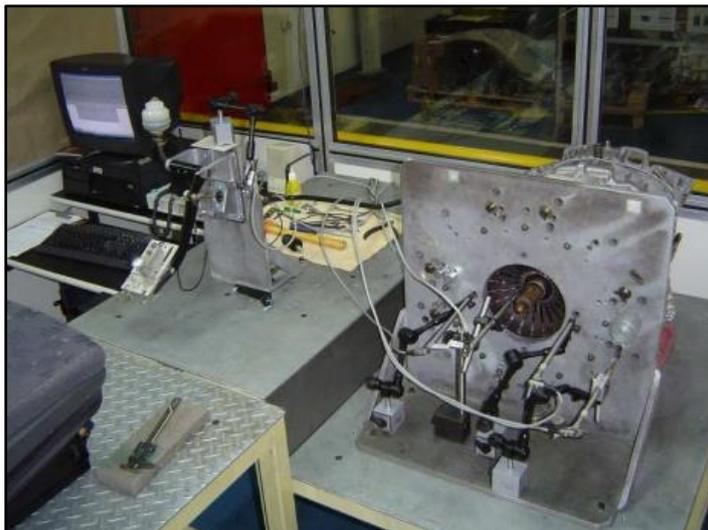
De acordo com Santos (2006), os sistemas de acionamento de embreagem comerciais estão cada vez sujeitos a esforços maiores, por conta das legislações de emissões de gases, que fazem com que os motores gerem curvas de torque menos favoráveis para a vida da embreagem, solicitando maior quantidade de trocas de marchas. As aplicações mais severas como lixeiro e ônibus urbano, chegam a realizar 23 trocas por quilômetro. Por conta da severidade à que o produto está submetido, se fazem necessários testes de validação bastante robustos.

O teste de durabilidade mais confiável é o de rodagem em veículo, pois sujeita os componentes à condição real de aplicação. Apesar de muito desejado pelos engenheiros de desenvolvimento, este teste é o mais caro e demorado, por isso se torna impraticável em alguns projetos deste tipo. Nestes casos, são realizados cálculos e testes em bancadas que simulam a aplicação real do produto, submetendo-o às condições que tangem à realidade.

Estes testes de laboratório simulam o ambiente de aplicação do produto, podendo ser mais acelerados para verificar a ação do tempo sobre as peças. Os procedimentos de testes de validação são acordados entre desenvolvedor do projeto e a montadora do veículo no qual será aplicado o cilindro mestre. Valores comumente citados são frequência de ciclagem, extremos de temperatura de operação, vibração, limites de desgaste e a severidade do teste como um todo.

Para validação de cilindros mestres de embreagem costumam ser construídas duas bancadas: de eficiência e de durabilidade. A primeira, tem por objetivo reproduzir a transmissão completa, desde o sistema de acionamento até a embreagem, platô e caixa de câmbio, conforme visto na Figura 12. Nesta bancada os testes são realizados sem rotação dos componentes.

Figura 12 - Bancada de eficiência



Fonte: Santos (2006)

Esta bancada é acionada por cilindro hidráulico que aciona o pedal da embreagem, submetendo o sistema à quantidade de ciclos desejada. A linha hidráulica utiliza a pressão de trabalho normal do veículo, com alguns ciclos em pressão mais elevada para simular uma falha no sistema de auxílio pneumático (quando presente), que afinal, pode aumentar a pressão do sistema em até 12 vezes.

Já a bancada de durabilidade é mais simples, mas também submete o conjunto às condições reais de pressão, esforço e curso. Pode ser alocada em câmara quente, fria ou câmara de pó para verificar a eficiência das vedações do CMC contra as partículas do ambiente, conforme Figura 13

Figura 13 - Bancada de durabilidade e câmaras de temperatura

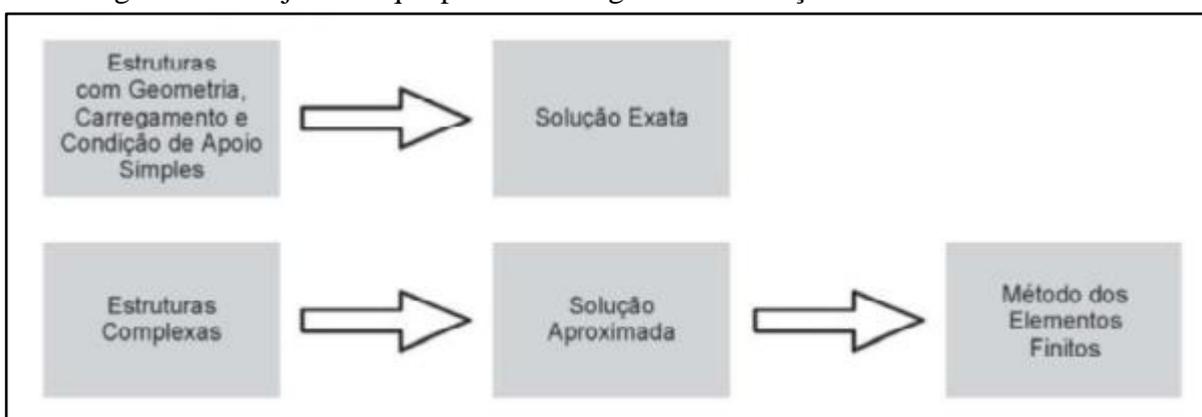


Fonte: Santos (2006)

## 2.6 ANÁLISES DE CAE

Sobre CAE (Computer-Aided Engineering), Alves Filho (2012) explica que os métodos analíticos clássicos, apesar de serem capazes de calcular com precisão as respostas exatas de deslocamentos, deformações e tensões em estruturais, são limitados a casos específicos e raramente se adequam às aplicações práticas comuns. Assim, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é necessário, pois permite prever e analisar o comportamento estrutural em diversas condições de operação e para componentes complexos, independente de sua forma e condições de carregamento. A Figura 14 mostra duas abordagens que podem ser tomadas para resolver problemas que envolvem cálculos estruturais.

Figura 14 - Trajetórias que podem ser seguidas na solução de cálculos estruturais



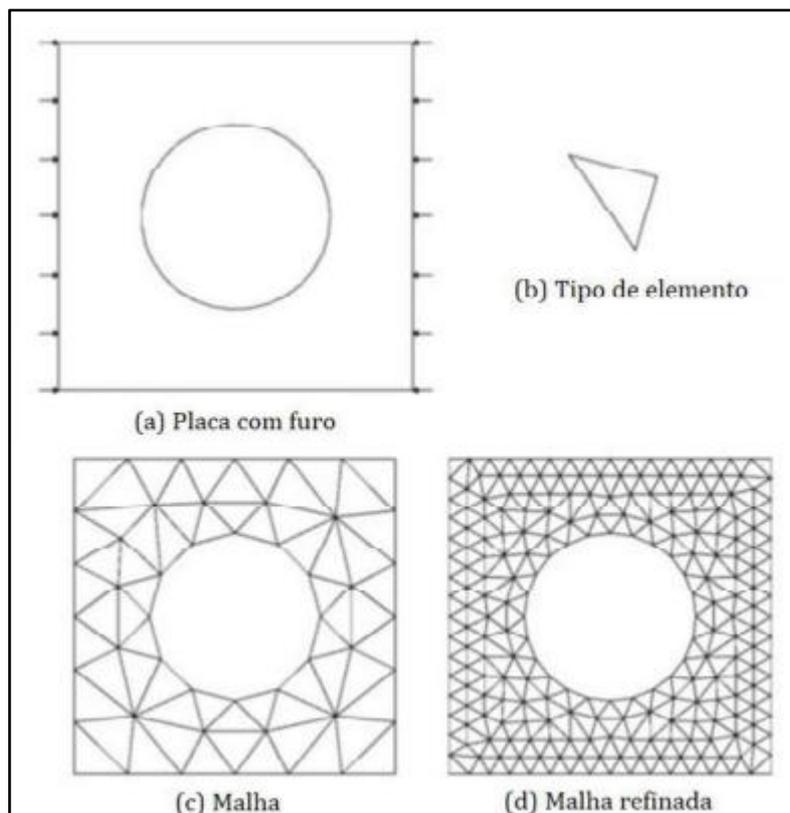
Fonte: Alves Filho (2013)

### 2.6.1 Malha

Ao elaborar uma malha, é feita uma discretização de um sistema contínuo em vários elementos de tamanho finito, com o objetivo de estudar cada elemento para obter o comportamento do sistema como um todo. Por funcionar desta forma, o método fornece um resultado aproximado e possui uma margem de diferença em relação à solução exata. Mas quanto maior for o número de elementos e nós usados, mais próximo do valor real será o resultado obtido (KIM E SANKAR, 2011).

Na Figura 15 podem ser vistos exemplos de geometria, tipos de elementos e malhas. A parte (a) mostra uma placa com um furo sendo submetida à carregamentos laterais. A parte (b) mostra o tipo de elemento que compõe a malha, já a parte (c) representa a malha inicial e a (d) a malha final refinada, buscando um resultado mais próximo da realidade.

Figura 15- Exemplos de geometria, elemento e malhas de elemento finitos.



Fonte: Adaptado de Fish e Belytschko (2009).

### 2.6.2 Condições de contorno e carregamento

É importante estabelecer apropriadamente as condições de contorno no Método dos Elementos Finitos (MEF) de modo a representar realisticamente as restrições do componente estudado e suas conexões físicas caso seja uma montagem. Também é fundamental aplicar as restrições externas ao modelo para alcançar o estado de equilíbrio estático, eliminando qualquer grau de liberdade. (NORTON, 2004)

De acordo com Chandrupatla e Belegundu (2014), os carregamentos que agem sobre um corpo podem ser classificados em: força de corpo, força de superfície ou carga pontual. O primeiro atua distribuindo-se ao longo do volume do corpo, como por exemplo o peso do próprio corpo por conta da gravidade. A força de superfície atua de forma distribuída, mas sobre uma área do corpo, como é o caso de uma força de atrito do corpo com uma superfície. A última forma de carga ocorre quando forças externas atuam sobre o corpo de forma concentrada.

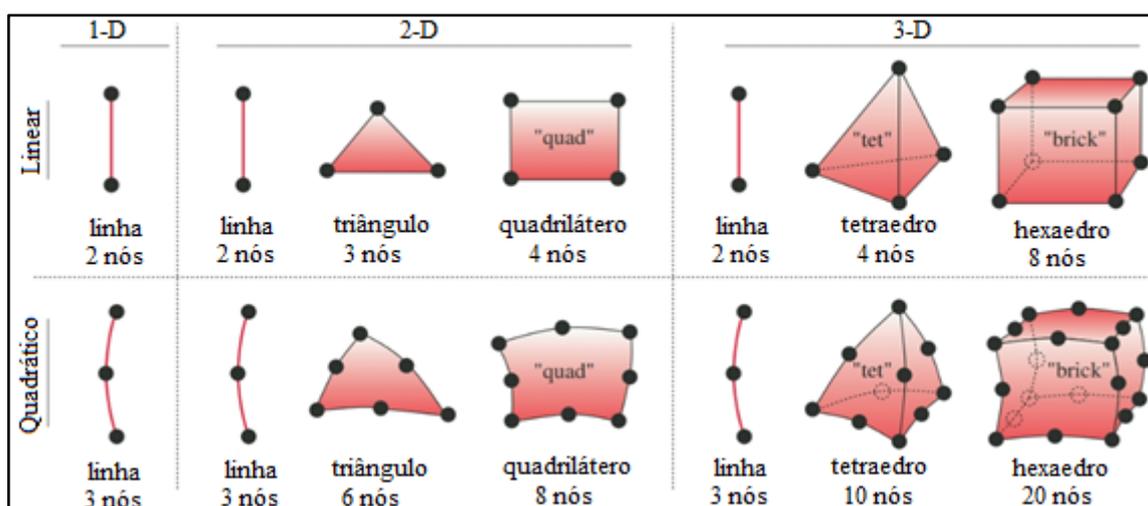
Conforme Alves Filho (2005) explica, os deslocamentos dos nós nos elementos de uma estrutura dependem dos graus de liberdade do nó. Sendo assim, os deslocamentos podem ocorrer tanto em uma única direção como em todas as direções de translação e rotação. A

restrição do movimento é determinada por suas condições de apoio e fixação. Ao especificar estas condições, os graus de liberdade em cada seção e nó são obtidos.

### 2.6.3 Tipos de elementos

Norton (2004) explica que os elementos podem ter uma, duas ou três dimensões e sua ordem, fator importante para sua caracterização, é geralmente representada por um polinômio interpolador que calcula os deslocamentos dentro do elemento. Os graus de liberdade em cada nó do elemento estão relacionados com sua definição em 1D, 2D ou 3D possuindo representação por barras, superfície ou sólido respectivamente. Estruturas com geometrias complexas e sob efeito de diversos carregamentos costumam requerer o uso de elementos 3D. Diversos tipos de elementos estão representados na Figura 16.

Figura 16 - Tipos de elementos finitos



Fonte: Norton (2004)

Os elementos tridimensionais podem ser divididos em duas classes: hexaédricos e tetraédricos, que se assemelham à quadrados e triângulos, respectivamente (FISH; BELYTSCHKO, 2009).

Alves Filho (2013) explica que os elementos hexaédricos têm formato de paralelepípedos e possuem a vantagem de variarem linearmente dentro do elemento quando analisados individualmente, evitando falhas na análise. Devem ser usados com cautela devido à sua disposição à gerar defeitos na malha.

Já os elementos tetraédricos lineares conseguem representar qualquer corpo contínuo devido à sua versátil geometria. Cada nó possui três graus de liberdade, totalizando 24 graus de

liberdade. Para uma maior precisão dos resultados, é possível usar modelos de tetraedros parabólicos onde o elemento passa a ter 10 nós, resultando em 30 graus de liberdade.

#### **2.6.4 Tipos de análise**

De acordo com Azevedo (2003), ao analisar uma estrutura utilizando MEF, o primeiro passo é classificar o componente de acordo com sua geometria, materiais e carregamentos. Cada problema deve ser abordado separadamente, elaborando um modelo e aplicando as simplificações necessárias. Em seguida, devem ser considerados os aspectos relacionados à carregamentos antes de iniciar a análise estrutural.

##### **2.6.4.1 Análise linear**

Azevedo (2003) cita que, ao analisar uma estrutura, existem casos onde os deslocamentos causados pelas forças externas são tão pequenos em relação ao tamanho da estrutura estudada que podem ser desconsiderados. Estes cenários permitem a utilização de uma análise linear.

Segundo Alves Filho (2012), estruturas analisadas tanto dinâmica quanto estaticamente geralmente podem ser resolvidas por meio de cálculos lineares. Para isso, são elaborados sistemas com equações algébricas lineares e equações diferenciais lineares respectivamente. Os cálculos passam por simplificações e se baseiam nos princípios da estática e dinâmica analítica, onde se assume uma relação proporcional direta entre os efeitos e as causas no sistema.

### 3 PROPOSTA DE TRABALHO

Este capítulo destina-se a aprofundar as etapas de desenvolvimento, projeto, fabricação e testes do protótipo de um cilindro mestre de embreagem de material em alumínio com o objetivo de atender as especificações e requisitos definidos pelo cliente, uma montadora de veículos. Para uma melhor delimitação do estudo, inicialmente é detalhado o objeto de estudo e os veículos que o aplicam.

A seguir, na Figura 17 é apresentado o fluxograma das atividades macro realizadas neste trabalho.

Figura 17- Fluxograma de trabalho



Fonte: o Autor

#### 3.1 DETALHAMENTO DO OBJETO DE ESTUDO

O cilindro mestre de diâmetro interno de 22mm, aplicado em veículos comerciais é o objeto de estudo deste trabalho. Conforme anteriormente citado é uma peça imprescindível para

o funcionamento do veículo, uma vez que uma falha neste componente pode comprometer completamente a capacidade de deslocamento do veículo.

A gama de veículos que aplica este componente é ampla, sendo um total de 16 veículos e suas configurações, desde EURO II até a mais moderna EURO VI, legislação esta que regulamenta normas para homologação de veículos, principalmente no que diz respeito a emissões. Abaixo, ao Quadro 1 de aplicações afetadas por este componente:

Quadro 1 – Quadro de aplicações do cilindro mestre em desenvolvimento

EURO VI	EURO V	EURO III	EURO II
3,5.160	3,5.150	15.190 E OD	17.210 OD
4.170	4.150	17.230 E OD	
6.170	6.160	18.320 E OT	
9.180	9.170		
9.180 OD	18.330 E OT		
11.180			
11.180 OD			

Fonte: o Autor

Para os testes, consideramos o VW 9.170, cujas especificações técnicas estão detalhadas no item 3.6 – Coleta de dados em veículo.

### 3.2 BENCHMARKING

Como o cilindro desenvolvido tem a finalidade de substituir uma peça já existente, o primeiro passo foi realizar o benchmarking desta peça. Por este fato, algumas especificações não podem ser alteradas, como o volume interno, que está diretamente ligado ao deslocamento do garfo de liberação da embreagem, e a interface de montagem, que precisa atender ao espaço disponível nas aplicações já existentes e suas furações de fixação.

### 3.3 PROJETO 3D E 2D

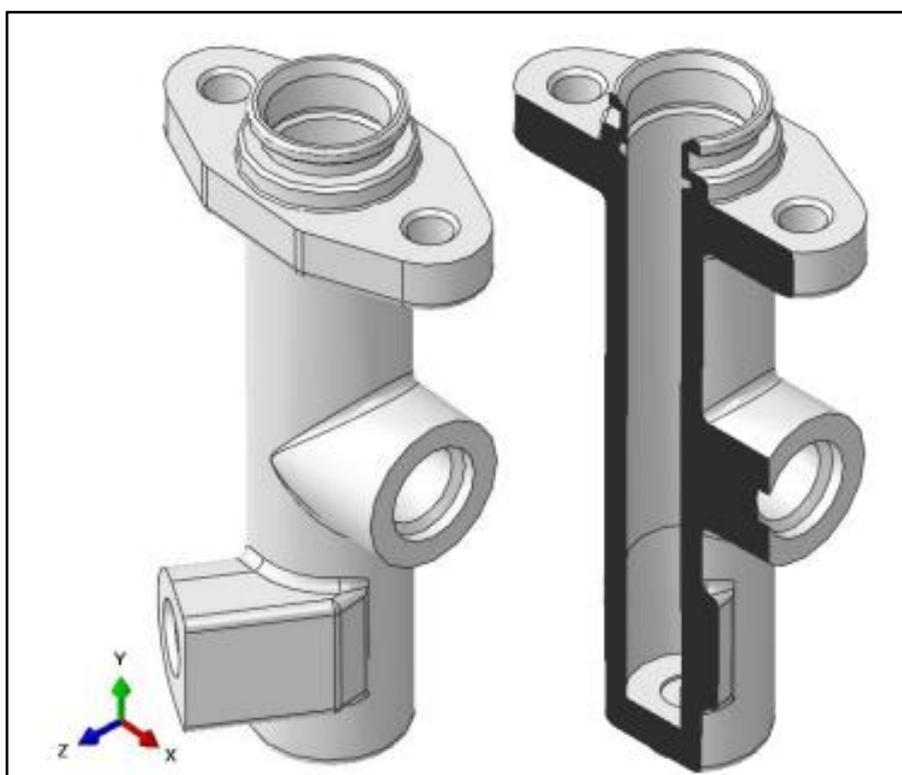
O projeto começa, de fato, a ganhar vida na etapa de modelagem 3D, onde pode-se ter uma representação tridimensional da peça estudada a partir de medidas utilizadas em conjunto com os recursos do software. Como citado do capítulo anterior, as medidas vitais da peça, ou seja, todas aquelas que afetam o volume interno do cilindro, deslocamento do êmbolo, interfaces de montagem e volume ocupado no cofre do motor pela peça precisaram ser mantidas.

O conceito de funcionamento do cilindro mestre foi mantido o mesmo, portanto todas as peças do benchmarking foram desenhadas para análise. A maioria das medidas puderam ser aferidas com o auxílio de um paquímetro e para alguns detalhes mais difíceis de alcançar fora utilizado uma tridimensional da marca Mitutoyo.

O Software utilizado para a modelagem 3D e 2D foi o software NX. Este recurso é indispensável para a Engenharia do produto, pois é uma forma bastante prática de desenhar o projeto, visualizar todos os detalhes e principalmente passar para o fornecedor ou para o processo todas as especificações desejadas.

O primeiro modelo foi desenhado de forma similar com a peça de benchmarking, com o objetivo de realizar análises de CAE e tirar as conclusões necessárias sobre o comportamento da carcaça, cujo material foi trocado de ferro fundido para alumínio. Também foi possível tirar mais conclusões sobre o comportamento das peças com relação ao funcionamento do êmbolo desde o repouso até o fim do curso com utilização de vistas em corte. O modelo obtido foi o da Figura 18 abaixo:

Figura 18 - Corpo do cilindro mestre de embreagem benchmark.



Fonte: Master

### 3.3.1 Análise de CAE

Como a proposta envolve a troca do material da carcaça, que é o principal componente estrutural do cilindro, foi necessário um estudo mais detalhado sobre este componente. Essa importante alteração se deu através da solicitação do cliente por um componente mais leve. A saída foi seguir com uma proposta em alumínio, que além de ser bem mais leve, tem a possibilidade de ser manufaturado “em casa” visto que a empresa possui uma fundição e injeção de alumínio, permitindo melhor controle do processo e redução de custos. Para possibilitar esta alteração de material, foi necessária uma análise utilizando o método de elementos finitos, conduzida pelo setor de CAE da empresa.

Para isso, foram realizados ensaios de tração com extensometria a fim de identificar as características monotônicas e propriedades do material benchmark e do material da alternativa proposta. O corpo de prova para o ensaio do material benchmark foi retirado de uma amostra de carcaça, e o do Alumínio proposto foi fornecido pela fundição que será responsável pela confecção das carcaças de alumínio no futuro. Os corpos de prova preparados com o material proposto em Al305 injetado podem ser vistos na Figura 19:

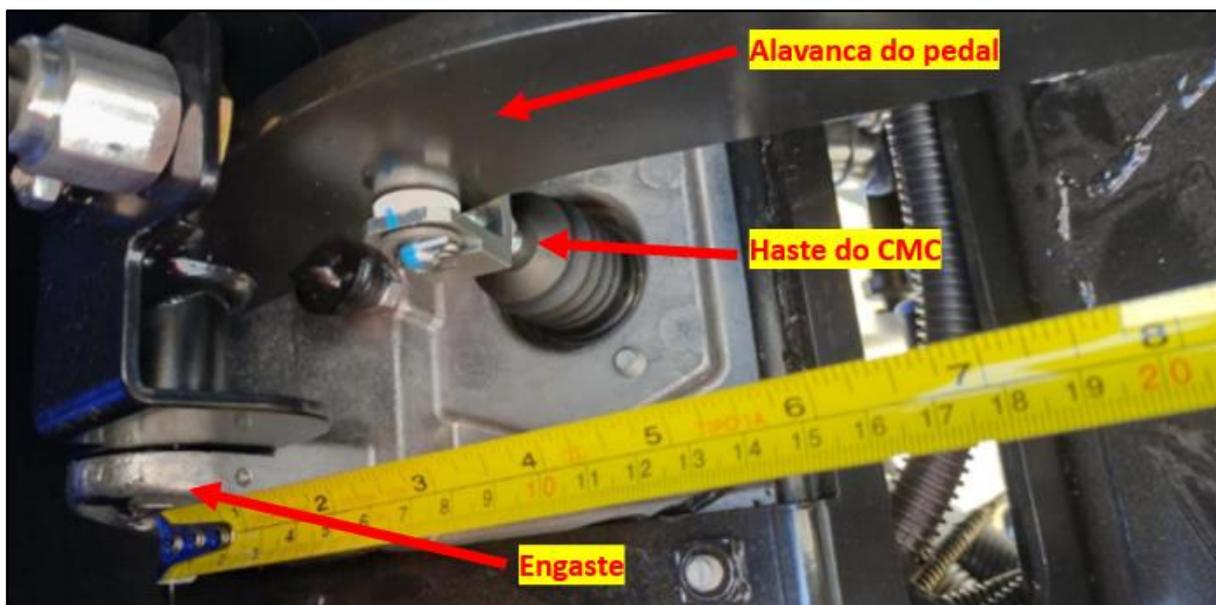
Figura 19 - Corpo de prova para caracterização do material proposto Al305 injetado



Fonte: o Autor

Para a análise estática foi necessário averiguar as dimensões das articulações do sistema de acionamento do pedal do veículo em conjunto com as forças exercidas durante o acionamento. A partir destes dados retirados de um veículo de aplicação, foi possível decompor os esforços presentes no sistema. O conjunto do pedal pode ser visto na Figura 20:

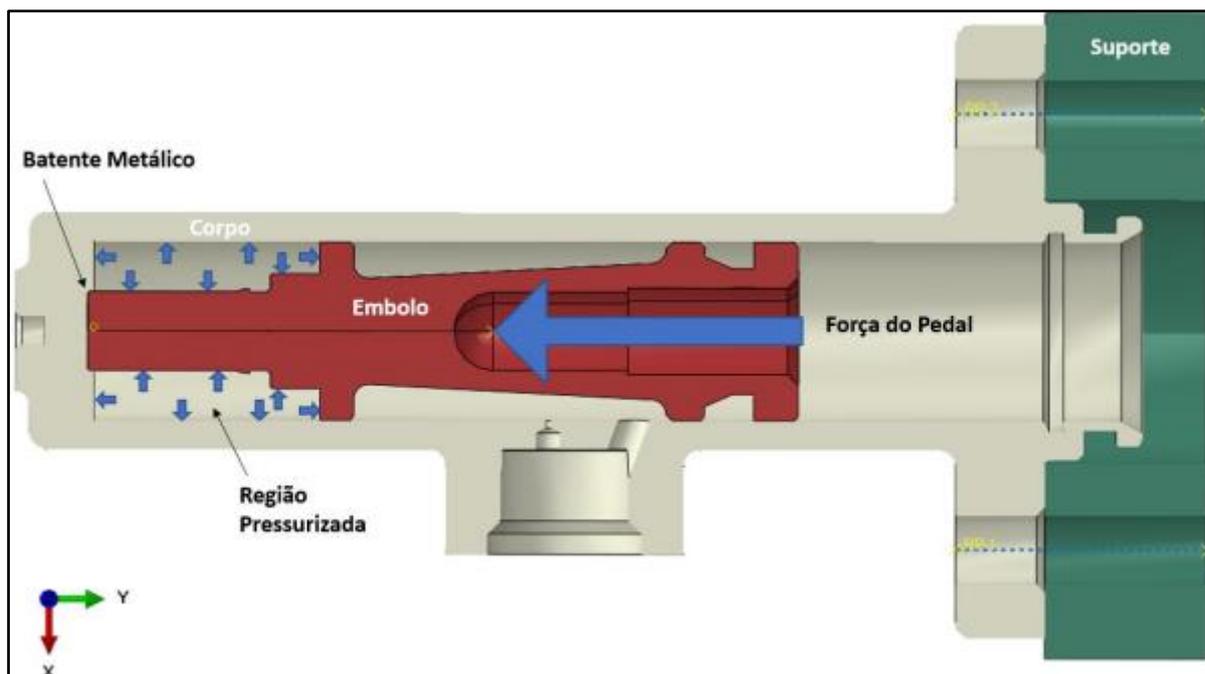
Figura 20 - Pedal da embreagem de VW 17230 OD



Fonte: o Autor

Depois do levantamento dos dados do material, articulações e esforços presentes no sistema, foi possível seguir para a representação da montagem da peça para a análise do software ABAQUS. Porém, algumas restrições tiveram de ser seguidas para uma melhor semelhança à realidade da aplicação do produto. A montagem foi simulada com condição de carregamento máximo, para averiguar qual é de fato a condição de funcionamento mais severa que o produto precisa atender. Para isso, o êmbolo foi posicionado em fim de curso, em batente metálico com o fundo do corpo do cilindro. Embora o batente metálico deva ser evitado quando da montagem do produto real, é algo que pode acontecer caso um mecânico pouco experiente não faça a regulagem correta, portanto precisa ser considerado. Nessa condição, os esforços provenientes do pé no pedal são também transferidos para a carcaça do cilindro, aumentando a carga exercida sobre ela. Os carregamentos aplicados podem ser vistos na Figura 21.

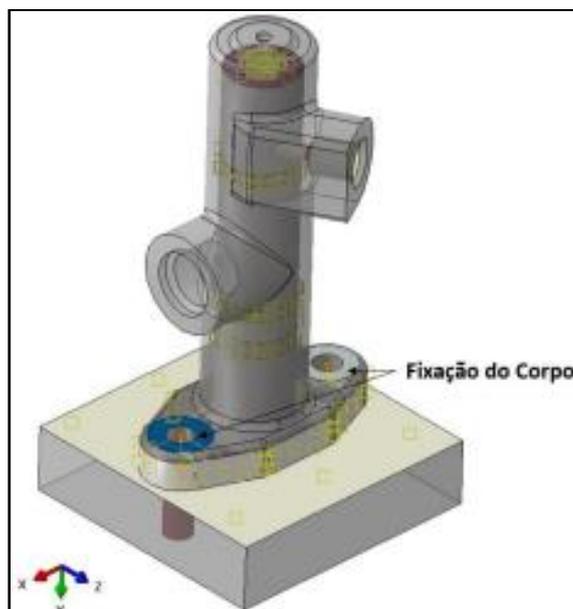
Figura 21 - Carregamentos aplicados no modelo.



Fonte: Master

O modelo fica restrito a rotações e deslocamentos, sendo montado por meio de elementos de fixação em suporte. Também foi aplicada a condição de atrito entre componentes que se movem e as curvas de tensão dos materiais obtidas com os ensaios de extensometria foram aplicadas. A Figura 22 mostra o modelo já fixado e restringido conforme as especificações mencionadas.

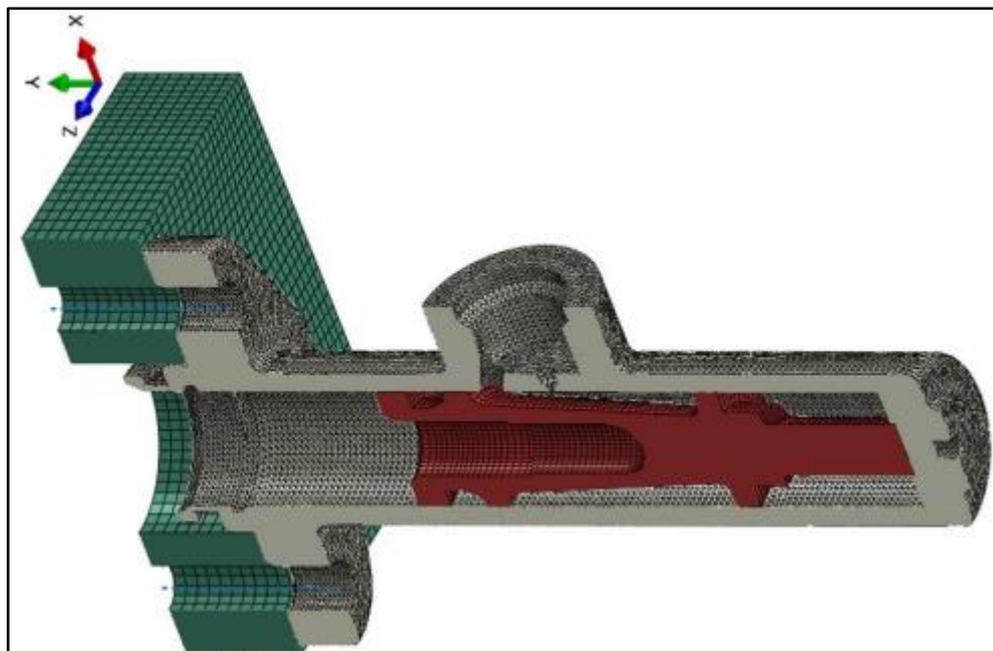
Figura 22 - Modelo com as restrições impostas



Fonte: Master

A malha foi criada usando elementos tetraédricos de segunda ordem para modelar a carcaça do cilindro, enquanto para o suporte e o êmbolo, optou-se por uma malha hexaédrica. A representação visual da geometria da malha de referência pode ser observada na Figura 23.

Figura 23 - Malha



Fonte: Master

### 3.4 FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO

Com todos os componentes projetados, e demais especificações pré-definidas, inicia-se as tratativas com fornecedores. A busca leva em conta diversos critérios, tanto comerciais como técnicos, buscando preços mais competitivos bem como fornecedores que tenham capacidade e know how dos componentes, além de certificações de qualidade como IATF.

### 3.5 TESTE BURST

Depois de obtido e montado o protótipo físico, o primeiro teste realizado é estrutural. O teste de Burst realizado no laboratório de testes da própria empresa desenvolvedora do projeto consiste em aplicar pressão no interior do cilindro até ocorrer a falha de algum dos componentes, com objetivo de ver se o fator de segurança é aceitável, sabendo que a pressão de trabalho do componente original já é conhecida.

A unidade aplica pressão hidráulica no componente que vai ligado numa mangueira ao circuito hidráulico da bancada. O operador da bancada controla a pressão desejada através

de uma manivela que, ao ser acionada, cria pressão em um cilindro hidráulico, enviando o óleo pela mangueira. A pressão pode ser monitorada por um manômetro, chegando até o limite da bancada em 100 bar e o óleo utilizado é industrial comum não compressível. A bancada com o protótipo montado pode ser vista na Figura 24.

Figura 24 - Bancada do teste Burst



Fonte: o Autor

O momento onde ocorre o pico de pressão na aplicação real é o final de curso. Para conseguir uma melhor verossimilhança, tanto no cilindro benchmark como no protótipo testados, o êmbolo foi avançado até o final com uso de espaçadores, concentrando a pressão na porção do fundo do cilindro.

### 3.6 COLETA DE DADOS EM VEÍCULO

A validação prática do funcionamento do sistema e identificação de qualquer comportamento anormal é feita durante os testes em veículo. Consiste em instalar o cilindro mestre em um veículo da planilha de aplicações, permitindo identificar qualquer problema com a interface de montagem, possíveis vazamentos, funcionamento geral, comportamento durante a rodagem e o principal, coletar dados com uso de instrumentação. Para isso, foram feitas medições em pontos específicos do sistema durante situações estratégicas de aplicação em rodagem ou testes estáticos. A locação, realização dos testes, montagem dos componentes e instrumentação foram realizados no CTR, enquanto as solicitações foram feitas pela Master.

Os ensaios foram especificados de forma a abranger as condições mais críticas para a aplicação do CMC e todos ensaios foram realizados em ambos cilindros (benchmark e protótipo), mostrados na Figura 25.

Figura 25- Cilindros testados no veículo. Benchmark à esquerda e Protótipo à direita



Fonte: relatório interno

O veículo utilizado foi um VW Delivery 9.170, contando com 135.588 km no momento dos ensaios. O mesmo pode ser visto na Figura 26.

Figura 26 - Veículo usado na coleta de dados

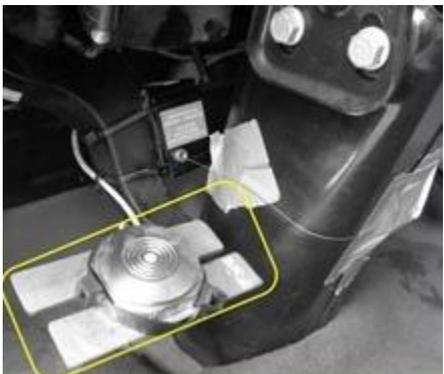
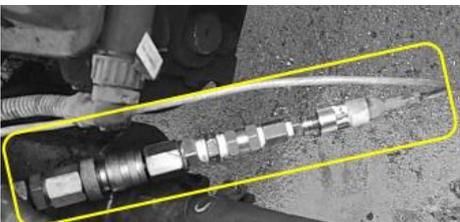


Fonte: relatório interno

### 3.6.1 Pontos instrumentados

Os pontos instrumentados desejados foram solicitados ao Centro Tecnológico Randon, que por sua vez disponibiliza dos sensores. Os mesmos podem ser vistos na Figura 27 abaixo:

Figura 27 - Pontos de coleta de dados

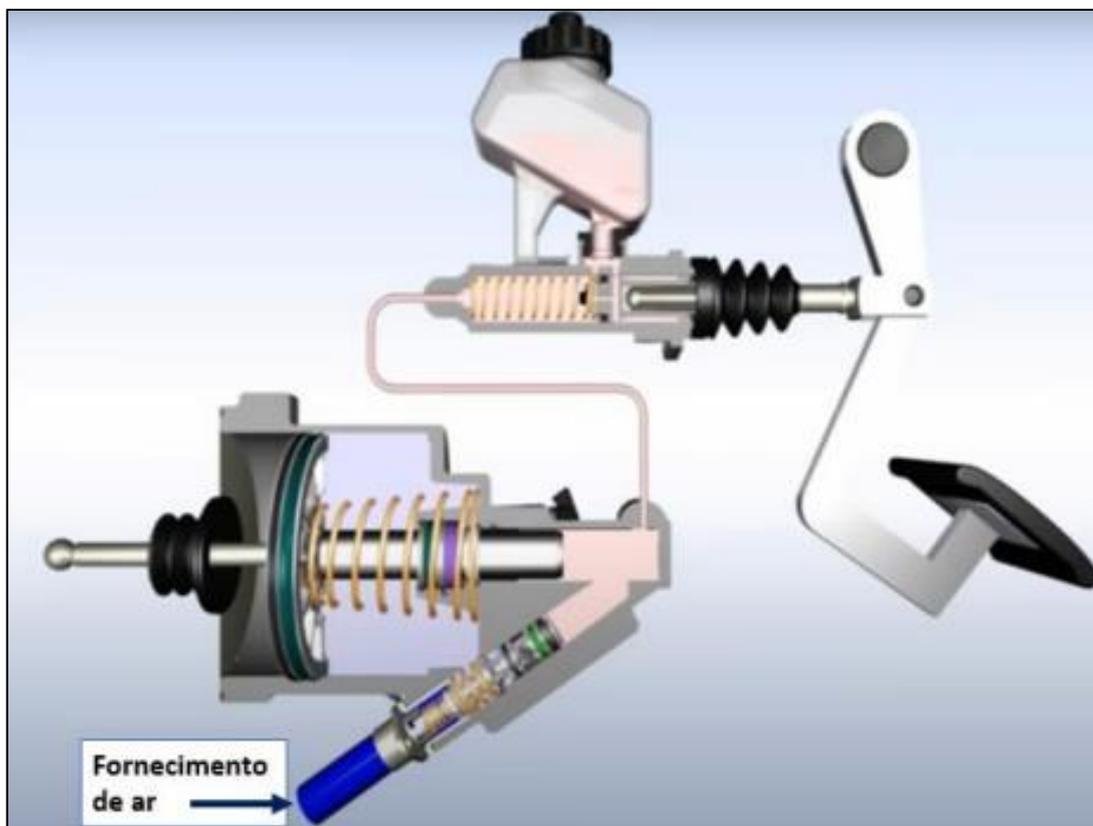
Local instrumentado	Sensor	Sinais coletados
	Transdutor de deslocamento (Draw-Wire) Micro-Epsilon WDS 1000 P60 CR-R	Curso do pedal
	Célula de carga HBM	Força no pedal
	Transdutor de pressão P&AP	Pressão no cilindro e linha hidráulica
	Transdutor de deslocamento (Draw-Wire) Micro-Epsilon WDS 1000 P60 CR-R	Deslocamento do garfo da embreagem

Fonte: relatório interno

É importante citar que, além da atuação hidráulica, este caminhão conta com mais um auxílio pneumático no servo de embreagem, localizado na caixa de câmbio, que também tem a função de tornar o pedal mais leve, conforme representação na Figura 28. Portanto, sem este auxílio, a força no pedal se torna muito maior, bem como a pressão interna do cilindro e linha

de fluido, por isso é preciso considerar nos testes uma falha no sistema de auxílio. Esta simulação de falha foi feita desconectando a mangueira de alimentação de ar que vai no servo.

Figura 28 - Sistema de servo com auxílio pneumático



Fonte: adaptado de vídeo da Knorr-Bremse

Visto isso, os pontos de coleta de dados foram os mesmos em ambos os cilindros nas mesmas condições estratégicas de aplicação, citadas abaixo:

- Aplicação estática com auxílio pneumático do servo
- Aplicação estática com simulação de falha no auxílio do servo
- Arrancada em pista inclinada 12% com atuação do servo
- Aplicação dinâmica em pista de alta velocidade com atuação do servo
- Aplicação dinâmica em pista de alta velocidade com simulação de falha no auxílio do servo

### 3.7 BANCADA DE VALIDAÇÃO

Nesta etapa, o responsável pelo projeto e construção da bancada é o CTR, mas as especificação e solicitações são feitas pela Master.

A construção de uma bancada de testes visa validar o conceito construído, principalmente no sentido de durabilidade. Permite submeter o produto à uma grande quantidade de ciclos sem necessidade de instalar em um veículo e realizar rodagem (1 ciclo equivale a uma atuação da embreagem, ou uma pisada no pedal da embreagem). A possibilidade de rodar diversos cilindros simultaneamente também é um atrativo por conta do tempo economizado.

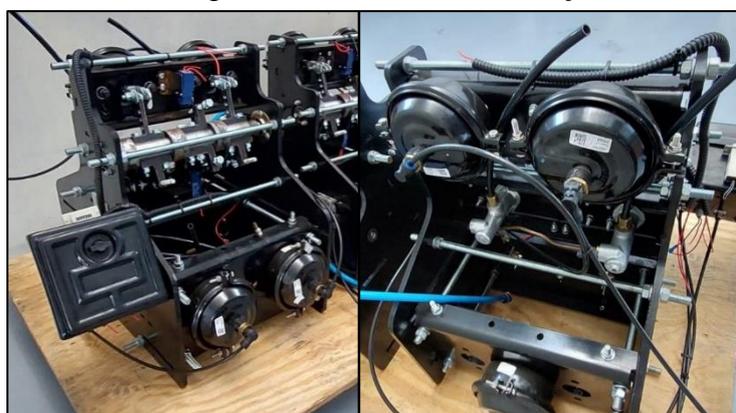
Para que o teste seja confiável, é preciso que as condições de teste sejam coerentes à realidade, portanto são utilizados os dados coletados nos testes em veículo mencionado no capítulo anterior para regular a bancada.

As solicitações iniciais foram:

- Pressão hidráulica controlada e com valor igual à coleta de dados;
- Atuação com força similar à real aplicada no pedal de embreagem;
- Interface de montagem do cilindro igual ao veículo;
- Posicionamento do “pedal” igual ao veículo;
- Possibilidade de ciclar pelo menos 3 CMC ao mesmo tempo;
- Contador de ciclos;
- Dimensões reduzidas para permitir futura ciclagem em câmaras de alta e baixa temperatura;
- Sistema de sangria para o fluido.

A bancada obtida foi a da Figura 29 abaixo.

Figura 29 - bancada de validação



Fonte: o Autor

A partir daí, a bancada evoluiu e passou por horas de regulagens e alterações no setup para garantir maior confiabilidade e funcionamento mais refinado.

## 4 RESULTADOS

O propósito deste capítulo consiste em exibir e comentar os resultados alcançados com base no que foi sugerido na seção anterior.

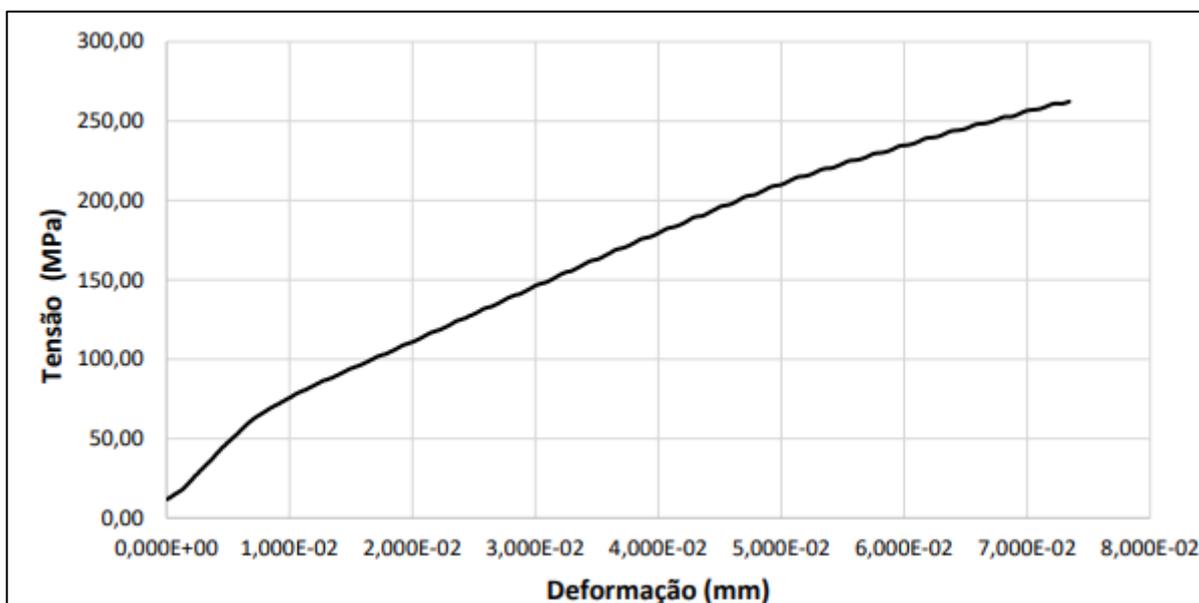
### 4.1 ANÁLISE DE CAE

Neste capítulo são abordados os aspectos relacionados à análise de CAE. Novamente, é importante lembrar que a maior diferença quando comparados o CMC benchmark com o novo produto desenvolvido é a troca do material da carcaça para alumínio e as demais alterações decorrentes desta mudança.

#### 4.1.1 Características dos materiais

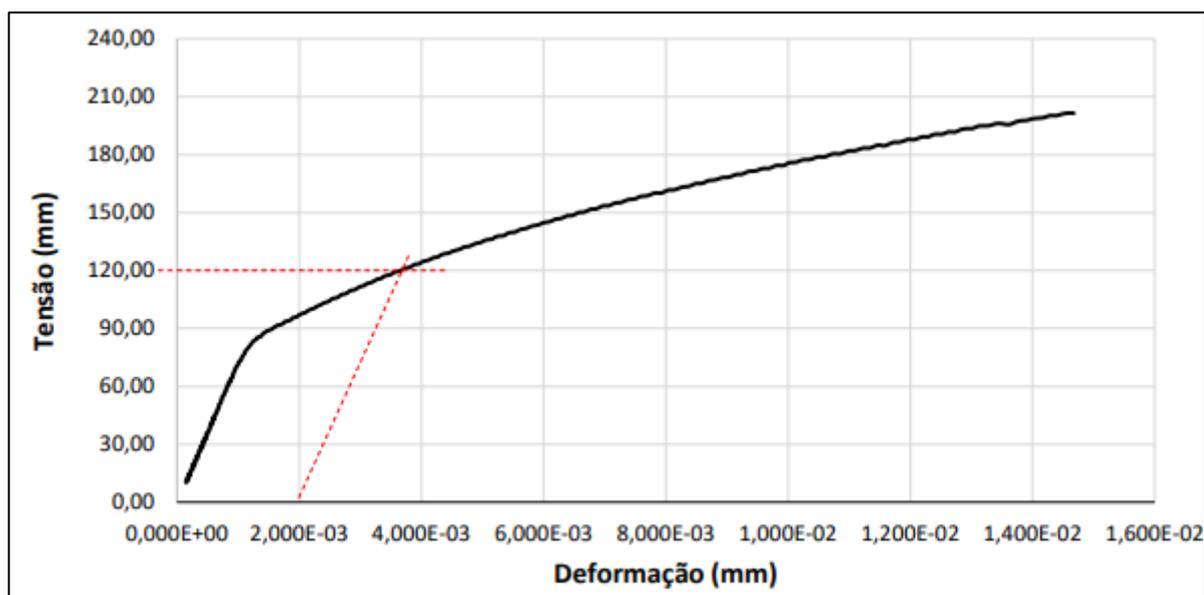
Com os resultados dos ensaios de tração dos dois materiais, já foi possível perceber algumas diferenças antes mesmo de começar a análise de CAE propriamente dita. Os gráficos de Tensão x Deformação obtidos podem ser visualizados nas Figuras 30 e 31.

Figura 30 - Tensão x Deformação da carcaça de FoFo Benchmark



Fonte: o Autor

Figura 31 - Tensão x Deformação da Carcaça proposta em alumínio 305 injetado.



Fonte: o Autor

Após estes ensaios realizados no LAMEC da UCS, constatou-se que o a carcaça benchmark é feita de ferro fundido cinzento, de acordo com sua característica típica da curva tensão vs. deformação. Apresentando comportamento frágil na sua ruptura, sem escoamento e tem alta resistência ao desgaste e compressão.

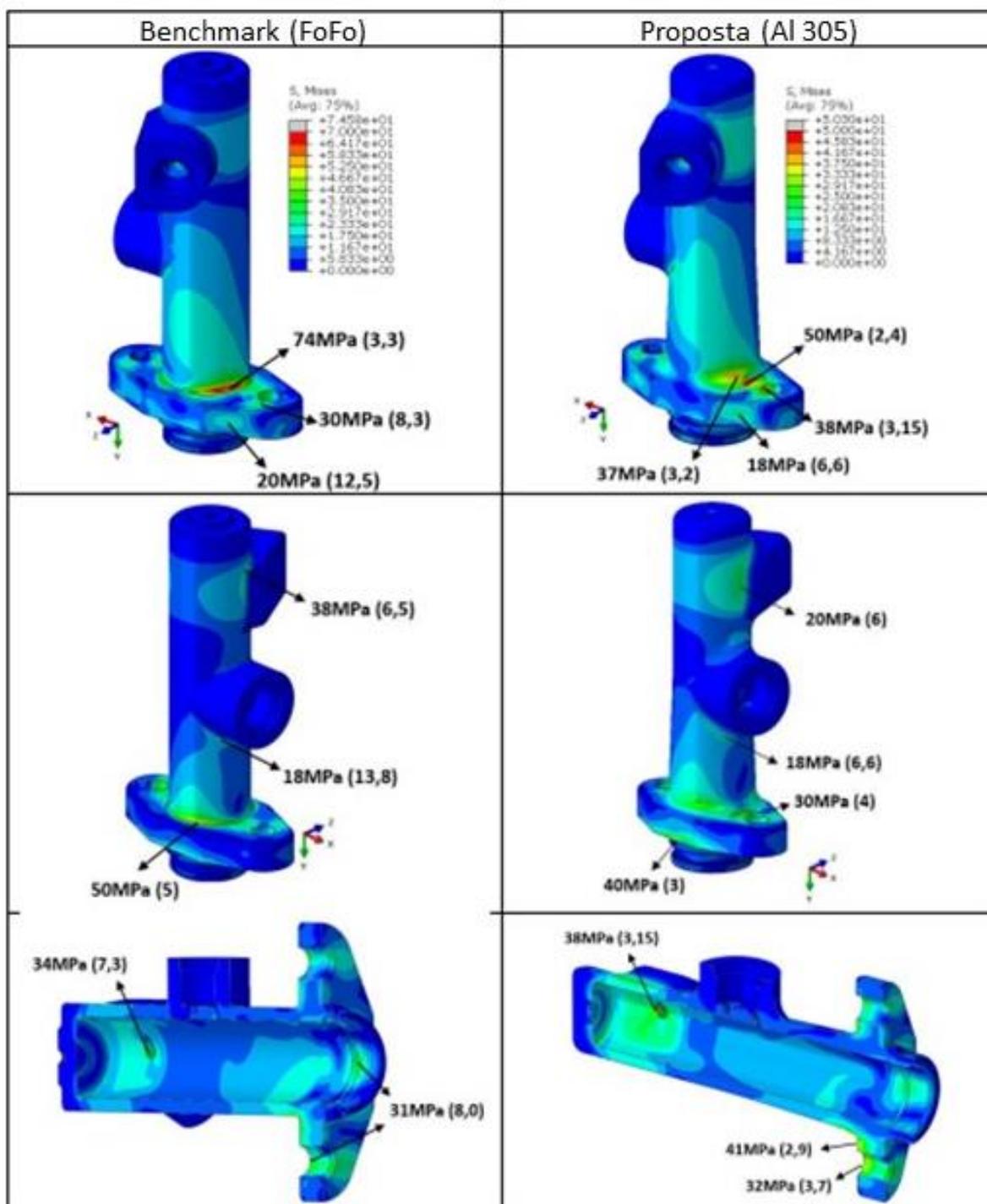
Já o material da proposta (Al 305) é mais dúctil e apresenta região elástica menor. A uma deformação de 0,2%, a tensão de escoamento é de 120 Mpa, ficando um pouco abaixo da norma SAE J452 que exige 130 Mpa de escoamento. Os corpos de prova foram fornecidos pela fundição responsável pela feça final no futuro, e apesar da carcaça protótipo ser em Alumínio usinado, os corpos de prova verificam a condição de peça final.

#### 4.1.2 Análise estrutural estática e de deslocamentos

Com a realização da análise estática e de deslocamentos do cilindro benchmark foi possível identificar os pontos de maior concentração de esforços, e assim aprimorar esses pontos na carcaça proposta em Alumínio para suportar esses mesmos esforços.

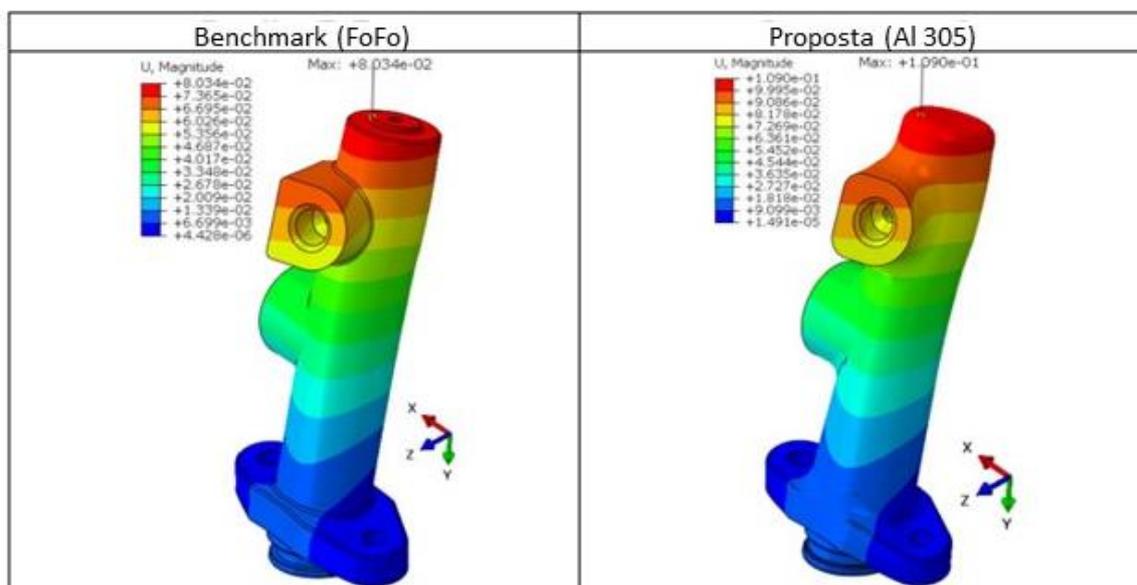
A malha foi refinada para obtenção de resultados mais confiáveis. Na carcaça do cilindro foram utilizados elementos tetraédricos de 1mm de 2ª ordem, resultando em mais de 618 mil elementos. Já para o êmbolo, foram utilizados elementos hexaédricos de 1ª ordem, contando com cerca de 28 mil elementos. As análises comparando os resultados do Benchmark em FoFo vs. a Proposta em Al 305 podem ser vistas nas Figuras 32 e 33.

Figura 32 - Resultados da análise estática



Fonte: Master

Figura 33 - Resultados de deslocamentos



Fonte: Master

As mudanças no modelo proposto foram feitas em concomitância com a realização das análises estática e de deslocamentos, assim foi possível fazer a alteração e testar na sequência para confirmar o resultado esperado. Dentre as melhorias propostas, pode ser destacado:

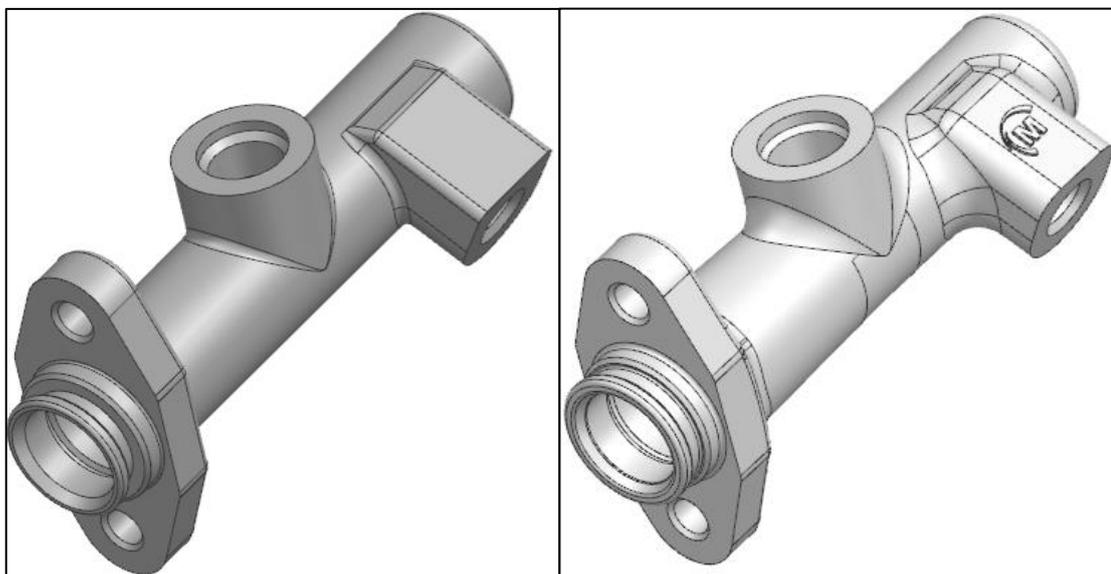
- Aumento da espessura na transição entre cilindro e flange de fixação;
- Aumento dos raios nas transições do corpo e em geral;
- Eliminação de vincos e concentradores de tensão;
- Adição de quebra de cantos.

A carcaça proposta em Al 305 apresentou resultados satisfatórios para os carregamentos aplicados em comparação com a carcaça benchmark, alcançando um coeficiente de segurança de 2,4 no ponto mais crítico da análise estática.

Já na análise de deslocamentos, houve uma variação muito baixa do ponto mais crítico, chegando à um máximo de  $1.09 \times 10^{-1}$  mm, o que não viria a interferir no funcionamento e nem montabilidade da peça. Embora tenha ocorrido deslocamento em todos os eixos X, Y e Z, isso é considerado normal e também não representa perigo. Por tratar-se de uma pressão hidráulica, se distribui igualmente em todos os pontos do recipiente onde está contido.

Tomando por base os coeficientes de segurança como critério de aprovação da Análise de Elementos Finitos, a proposta foi aprovada para prototipagem. A diferença visual entre as duas carcaças pode ser observada na Figura 34.

Figura 34 - Comparativo carcaça Benchmark (FoFo) e proposta (Al 305)



Fonte: o Autor

#### 4.2 PREPARAÇÃO DO PROTÓTIPO

Após um período de negociações feitas pelo time de Compras da empresa, juntamente com auxílio da equipe de Engenharia na parte de especificações técnicas, foram definidos os fornecedores.

Depois de recebidas as amostras inicia-se o processo de relatórios dimensionais, elaborado pela equipe de Qualidade de Recebimento da empresa. É feita uma conferência geral, onde 3 peças de cada componente recebido tiveram todas as suas cotas de desenho verificadas, conferindo se obedecem às tolerâncias dimensionais de desenho. Os componentes com maior número de cotas medidas foram a carcaça do CMC e o êmbolo.

Além disso, também foram necessárias algumas avaliações especiais, como a rugosidade interna da carcaça, medida em rugosímetro com valor na ordem de  $0,2 \mu\text{m}$ . A peça é confeccionada em torno CNC e posteriormente passa por um processo de brunimento em seu diâmetro interno para chegar à uma rugosidade baixa, de modo a proporcionar às gaxetas de borracha uma durabilidade maior. O processo é feito com uma lixa de grão fino lubrificada com óleo ou querosene, resultando no aspecto visto abaixo:

Figura 35 - Brunimento de cilindro



Fonte: extrusora.com.br

Outro cuidado especial no momento da montagem é com as gaxetas, que são de composto EPDM e dureza de 80 Shore A. Este composto é altamente utilizado no mercado automotivo pela sua resistência às altas temperaturas, mas não pode nunca ter contato com óleos minerais. As gaxetas precisam ser lubrificadas somente com o fluído DOT 4 durante a montagem do CMC, pois ela incha em contato com óleos minerais, perdendo sua capacidade de vedação. Este é um detalhe que só foi descoberto depois da primeira montagem, na qual as gaxetas foram lubrificadas com um óleo qualquer, resultando em seu estufamento, como pode ser visto na Figura 36. Foi verificada uma grande folga radial quando desmontada após alguns ciclos e vazamento, porém a gaxeta deveria estar justa no êmbolo.

Figura 36 - Gaxeta folgada no êmbolo



Fonte: o Autor



O protótipo foi confeccionado em alumínio usinado por ser uma opção mais rápida e barata que o injetado, que é a condição da peça final no futuro. A diferença de resistência pode ser desprezada para este caso, e o acabamento interno é o mesmo, não afetando a superfície de contato com as borrachas. Como a análise de CAE foi realizada utilizando as características do material dos corpos de prova injetados do material Al 305, a confiabilidade continua alta.

#### 4.3 RESULTADOS DO TESTE DE BURST

Através de desenhos técnicos do componente original, sabia-se que a pressão máxima de trabalho do componente ficava em 40 bar, portanto, era esperada uma falha acima deste valor. A tabela com os resultados deste teste pode ser vista abaixo:

Tabela 1 - Resultado dos testes de Burst

Teste	Benchmark	Master
Burst	100 bar	92 bar

Fonte: o Autor

Inicialmente foi testado o CMC benchmark, mas este superou até o limite da bancada de 100 bar sem sofrer nenhuma falha, seja por vazamento ou queda de pressão. O resultado foi de uma pressão que se estabilizou em um valor altíssimo e um ótimo fator de segurança considerando a pressão informada em desenho.

Na sequência, foi testado o cilindro protótipo, que resistiu até 92 bar. A falha se deu no anel elástico que faz o fechamento dos componentes internos, onde estavam apoiados os espaçadores que avançaram o êmbolo para o teste, causando a desmontagem do cilindro. Portanto, uma falha deste tipo não deveria ocorrer em situação real, tendo possibilidade de ter suportado pressões ainda maiores. Embora não tenha sido possível medir o real potencial estrutural, o resultado foi satisfatório, chegando à mais que o dobro da pressão de trabalho na aplicação real. Com isto, foi possível seguir para os testes em veículo com maior segurança, sabendo que nenhum problema mais grave deveria ocorrer.

#### 4.4 RESULTADOS DA COLETA DE DADOS EM VEÍCULO

Este capítulo destina-se a apresentar os resultados obtidos nos ensaios em veículo. Como efeito de comparação, a primeira coleta foi com o cilindro benchmark que já veio instalado no

caminhão, posteriormente seguindo para a instalação do cilindro protótipo e repetição dos ensaios.

Ambos os cilindros foram testados com e sem auxílio pneumático, visto que é preciso que exista uma condição mínima de funcionamento do sistema de acionamento da embreagem, no caso de ocorrer alguma emergência ou falha mecânica na qual seja impedido o funcionamento do auxílio pneumático. Os dados considerados são os do momento de fim de curso do pedal da embreagem. Na Figura 39 constam os dados finais.

Figura 39 - Resultados da coleta de dados

Teste	Com Auxílio Pneumático		Sem Auxílio Pneumático	
	Benchmark	Master	Benchmark	Master
Pressão Hidráulica	9.8 bar	10.1 bar	44 bar	43 bar
Curso Garfo (Servo)	17 mm	16.7mm	10.4 mm	8.7 mm
Força no Pedal	61 N	58N	183 N	178 N

Fonte: o Autor

O valor obtido com o primeiro teste para a pressão hidráulica de 9.8 bar deixou a equipe intrigada, visto que a pressão conhecida era a máxima de 40 bar indicada no desenho técnico do produto. Posteriormente, com os testes simulando a falha do auxílio pneumático, a pressão aumentou muito, alcançando 44 bar, e desta forma fazendo mais sentido com relação ao dado do desenho, embora tenha ficado acima deste.

Um ponto importante é a diferença observada na força no pedal quando se retira o auxílio pneumático. Sem o auxílio para ajudar o êmbolo do cilindro escravo a empurrar o garfo de acionamento da embreagem, o pedal fica muito mais pesado, chegando a exigir do motorista uma força na ordem de 3 vezes mais para que o pedal chegue ao fim do curso.

Conseqüentemente, o curso do garfo fica prejudicado, visto que só a força hidráulica não é suficiente para avançar o êmbolo do cilindro escravo ao curso normal. Houve uma diminuição do curso do garfo em 63% no cilindro benchmark, implicando em um leve “arranhão” quando se engatava uma marcha.

Esta falha ficou ainda mais intensa no cilindro Master, onde a diminuição do curso foi de 92%. Neste caso, as marchas arranhavam ainda mais, porém continuava possível engatar todas as marchas e seguir com o caminhão em funcionamento. Este era o funcionamento esperado, de modo que o motorista consiga se deslocar até um local seguro no caso de falha e para uma oficina para a realização do reparo.

Os demais testes estáticos, de rodagem, Pista Aclive 12% e Pista de Alta tiveram resultados muito similares nas duas amostras, podendo ser considerado um empate técnico. O cilindro mestre Master obteve dados muito semelhantes ao benchmark, sem problemas de interface de montagem ou vazamentos, tendo o motorista relatado que o feeling ao dirigir é idêntico. Desta forma, sendo considerado o funcionamento do protótipo como satisfatório, foi possível partir para as próximas etapas, onde ocorre a validação do produto com relação à sua durabilidade e confiabilidade.

#### 4.5 RESULTADOS DA CICLAGEM EM BANCADA DE TESTES

Os primeiros ciclos da bancada ocorreram com a utilização de cilindro mestre do modelo benchmarking, para não arriscar desperdiçar o protótipo. Foram necessários alguns ajustes até o funcionamento ser mais satisfatório, podendo dividir em 2 fases de testes da bancada. Na 1ª fase, utilizava-se uma haste para atuar o cilindro mestre cujo ângulo formado em relação ao êmbolo interno do cilindro fugia muito da condição ideal, que é 0°. Já na segunda fase que está sendo testada agora, foi possível ajustar este ângulo para atuar o mais próximo de zero possível.

Embora a bancada esteja ainda em processo de refinamento, já foi possível coletar alguns resultados rodando o cilindro benchmark e também o protótipo Master, que seguem abaixo:

Figura 40 - Resultados da bancada de validação

<b>Bancada fase 1</b>		<b>Bancada fase 2</b>	
<b>Amostra</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Amostra</b>	<b>Ciclos</b>
Benchmark 1	219k	Benchmark 2	4.3M
Master 1	20k	Master 3	320k
Master 2	199k		

Fonte: o Autor

Na Fase 2 da bancada, foi possível alcançar 4.3 milhões de ciclos com uma amostra benchmark, indicando uma melhora no desempenho do dispositivo de teste. O resultado também fica de acordo com o esperado, visto que o requisito de validação para montadoras é de 4 milhões de ciclos.

Este número alto de ciclos como requisito de validação foi especificado pelo cliente, que por sua experiência, entende que assim é garantida uma vida longa do produto desde a saída

da concessionária até a primeira manutenção do CMC. Embora seja difícil estimar sua vida em tempo ou quilometragem, visto que depende muito do modo como é aplicado o veículo e o estilo de pilotagem do motorista. Veículos que realizam muitas paradas e arrancadas tendem a ter uma menor durabilidade do sistema de transmissão, já que necessita de maior número de acionamentos da embreagem em menor distância e tempo.

Já entre os protótipos Master 1, 2 e 3, foram testadas diferentes folgas entre êmbolo e carcaça do cilindro, sendo obtido os melhores resultados com as folgas maiores. O modo principal de falha para todas as amostras vem sendo o de desgaste acentuado do êmbolo interno e camisa do cilindro, resultando em desgaste das gaxetas e vazamento de fluido. O resultado obtido ainda fica um pouco distante do objetivo de 4 milhões, mas a julgar pela evolução na quantidade de ciclos, o projeto caminha na direção correta. O modo de falha mencionado pode ser visto na Figura 41:

Figura 41 - Êmbolo desmontado e Protótipo após falhar no teste de durabilidade



Fonte: o Autor

## 5 CONCLUSÃO

A motivação inicial para a realização deste trabalho foi o desenvolvimento de um cilindro mestre de embreagem e consequente aquisição de conhecimento técnico de um segmento até então pouco explorado pela empresa onde o trabalho foi feito. Em contrapartida desenvolver um projeto especial desde o esboço até a prototipagem e testes são atividades que proporcionam uma experiência completa para quem está iniciando no âmbito da Engenharia. Uma oportunidade valiosa, principalmente quando no tempo certo da carreira do futuro Engenheiro.

A partir dos resultados obtidos nos testes, conclui-se que o protótipo construído teve sua funcionalidade aprovada. A análise de CAE mostrou quais alterações eram necessárias para realizar a troca do material da carcaça de maneira segura, sendo comprovada a resistência estrutural obtida através do teste Burst. Os testes em veículo confirmaram o funcionamento do CMC, que obteve valores muitos satisfatórios quando comparado ao benchmark na coleta de dados. Além disso, o protótipo passou um feeling confortável para o motorista durante a pilotagem.

Foi construída uma bancada de testes com a finalidade de validar a durabilidade do produto. O primeiro protótipo Master testado alcançava apenas 20 mil ciclos, e após atualizações, conseguiu chegar à 320 mil. Embora ainda falte bastante para atingir a quantidade de 4 milhões de ciclos, que garantiria a validação do produto, uma evolução considerável já foi feita, ajudando a nortear o projeto.

Dentre algumas alternativas, estão mapeados testes com amostras tratadas superficialmente com anodização e diferentes folgas. Além do refinamento do produto e aumento da confiabilidade da bancada de durabilidade, também existem planos para trabalhos futuros. O cronograma do projeto conta com a construção da bancada de eficiência, composta do sistema completo da transmissão. Desta forma, o teste pode ser pausado para transferir o CMC à esta outra bancada e averiguar seus dados de controle através de instrumentação. Caso os parâmetros estejam bons, ele retorna para a durabilidade em seguida, auxiliando no processo de validação do produto.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SHAVER, R. **Manual transmission clutch systems**. Society of Automotive Engineers, Warrendale-USA, AE-17,1997. 191p

SCHAEFFLER Group – Divisão LUK. **SAC - Embreagem auto ajustável – Princípio de funcionamento**. Trabalho apresentado à DaimlerChrysler do Brasil. São Bernardo do Campo. Fev/2006. Não Publicado

MOMISSO; P. C. et al. **Development of clutch systems for commercial vehicles**. São Paulo. Society of Automotive Engineers – Congresso SAE. 2004.

NAUNHEIMER, Harald *et al.* **Automotive Transmissions: Fundamental, Selection, Designs and A Application**. 2 ed. Berlin, Heidelberg: Springer 2014.

SANTOS, Wagner Matos. **Sistema de Acionamento de Embreagem Hidráulico Para Caminhões Leves**. Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Automotiva da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Automotiva. São Bernardo do Campo 2006

VALEO Transmissions. **Self adjusting technology**. Trabalho apresentado à DaimlerChrysler do Brasil. São Bernardo do Campo. Mar/2004. Não Publicado

ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos: a base da tecnologia CAE / análise não linear**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos finitos: A Base da Tecnologia CAE**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2005.

KIM, Nam-Ho; SANKAR, Bhavani V. **Introdução à análise e ao projeto em elementos finitos**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

FISH, Jacob; BELYTSCHKO, Ted. **Um Primeiro Curso em Elementos Finitos**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2009.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada**. Porto Alegre : Bookman, 2004.

AZEVEDO, A. F. M. **Método dos Elementos Finitos**. 1. ed. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 2003.

CHANDRUPATLA, Tirupathi R.; BELEGUNDU, Ashok D. **Elementos finitos**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2014.