

Sys 1944182

Auto
Marcelo Massarani

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

OTIMIZAÇÃO DA TRANSMISSÃO DE UM VEÍCULO
OFF-ROAD PARA O USO RODOVIÁRIO

Elaborado por:
EMERSON GRAHOVEC
WILLIAM MAKANT

Orientador:
MARCELO MASSARANI

São Paulo
1999

EMERSON GRAHOVEC
WILLIAM MAKANT

OTIMIZAÇÃO DA TRANSMISSÃO DE UM VEÍCULO OFF-ROAD PARA O USO RODOVIÁRIO

Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção do título
de Graduação em Engenharia.

Orientador:
Prof. Dr. Marcelo Massarani

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica
Energia e Fluidos

São Paulo
1999

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer ao professor Marcelo Massarani por sua orientação e seu grande interesse pelo trabalho.

Devemos nossa gratidão também ao Eng. Daniel Wiecek da EATON – Divisão de Transmissões – Valinhos pelas informações técnicas e pela ajuda para obter as peças necessárias para a continuidade do trabalho.

Às nossas famílias e namoradas que deram o apoio necessário nesta longa jornada.

Ao Sr. Alceu, responsável pelas ferramentas do Laboratório de Máquinas, que se mostrou a boa vontade em pessoa, sempre disposto a ajudar e motivar os alunos .

RESUMO

Os automóveis off-road normalmente possuem uma relação reduzida de marchas, visando um torque elevado para enfrentar os mais variados obstáculos.

Devido a essa característica, sua utilização rodoviária fica prejudicada, limitando principalmente sua velocidade de cruzeiro.

O objetivo deste trabalho é introduzir modificações no veículo que amenizem este problema.

A solução encontrada foi acrescentar uma caixa de câmbio com duas marchas entre a caixa de transferência e o cardã, constituindo um equipamento denominado *overdrive*. Acionando-se o *overdrive*, obtém-se uma relação adequada ao uso rodoviário e, ao desacioná-lo, o veículo mantém suas características originais.

O projeto, com caráter de adaptação, utiliza algumas peças já existentes no mercado, visando diminuir os custos e tempo de projeto e fabricação.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS

RESUMO

1. ESTUDO DE VIABILIDADE

1.1 Estabelecimento da Necessidade	2
1.2 Formulação Técnica	5
1.3 Síntese de Soluções	8
1.4 Escolha da Melhor Solução	17

2. PROJETO BÁSICO

2.1 Desenvolvimento da Solução	22
2.1.1 Síntese de Configurações	22
2.2 Seleção da Melhor Configuração	39

3. PROJETO EXECUTIVO	
3.1 Considerações Iniciais	42
3.2 Principais Características dos Câmbios Existentes	43
3.3 Seleção do Câmbio a Ser Utilizado	45
3.4 Cálculo da Relação de Transmissão	49
3.5 Observações quanto ao Dimensionamento das Engrenagens	51
3.6 Projeto	53
3.7 Cálculos	64
4. CONCLUSÕES	68
Referências Bibliográficas	69
Anexos – Desenhos de Conjunto e Fabricação	70

PARTE 1

ESTUDO DE VIABILIDADE

1.1 Estabelecimento da Necessidade

Veículos fora de estrada nasceram da necessidade das forças armadas americanas e européias terem um veículo terrestre leve, utilizado para transporte ágil no campo de batalha, durante a Segunda Guerra. Os precursores destes veículos são o *Jeep Willys*, jipe americano; *Bedford* e *Unimog*, caminhões leves inglês e alemão, respectivamente.

Atualmente, muitos destes veículos continuam em uso, porém como carro de uso diário, apesar de manter as características devido às funções a que foram destinados. Entre as características mais marcantes está a sua relação reduzida de marchas. Até os dias de hoje, os “jipes” fora de estrada tendem a ser projetados com uma relação de marchas mais “reduzida” que um carro de passeio de peso/potência equivalente, para priorizar o seu desempenho fora-de-estrada, onde torques altos a baixas velocidades são freqüentemente necessários. Como consequência imediata, o desempenho rodoviário destes veículos é prejudicado. Entende-se por desempenho rodoviário a possibilidade de se transitar a uma velocidade de cruzeiro legalmente permissível a uma rotação econômica. A melhoria das condições das rodovias e o aumento gradual dos limites de velocidade aumentam a defasagem de velocidade de cruzeiro entre veículos fora de estrada e de passeio.

Os veículos fora de estrada mais antigos sofrem ainda mais com este problema: até os anos 70, os jipes Willys eram fabricados com transmissão de 3 marchas, e posteriormente com 4 marchas. Contudo, estes permaneceram com relações de marcha reduzidos, permitindo uma velocidade máxima (e não de cruzeiro) de aproximadamente 80km/h. O veículos Diesel de concepção

mais antiga também apresentam esta desvantagem: apesar de contar com uma transmissão de 4 marchas, a rotação do motor é geralmente limitada a 3000 rpm, o que reduz ainda mais o “range” de transmissão do veículo.

Atualmente, motores Diesel mais modernos, com pré-câmara de combustão, atingem altas rotações (aprox. 4500 rpm), permitindo um desempenho mais próximo a motores Otto a gasolina. Um exemplo de aplicação destes motores de alta rotação é visto em veículos leves de carga de origem asiática.

A proposta deste trabalho é alterar o sistema de propulsão ou transmissão de um veículo de modo a obter um desempenho adequado em uso rodoviário. Contudo, um dos requisitos básicos do projeto será manter suas características fora-de-estrada, ou seja, o alto torque em baixas velocidades, mantendo as primeiras marchas com grande redução.

Para se desenvolver esta alteração tornou-se necessária a escolha de um veículo para ser usado como base para este trabalho. O jipe Toyota Bandeirante é uma boa opção devido as seguintes características:

- Até recentemente, os Toyota Bandeirante eram fabricados com uma relação reduzida de transmissão e um motor Diesel Mercedes-Benz de baixa rotação, sendo portanto um dos únicos veículos fora de estrada em produção que ainda sofria deste mal. Este problema foi amenizado com a introdução de um cambio de 5 marchas e motor de alta rotação, mais moderno. Contudo, a maioria das Toyotas em circulação, devido a alta durabilidade do veículo, são anteriores a esta modificação. Consequentemente, existe um grande mercado potencial que justifica o desenvolvimento desta alteração.

- É um veículo de valor relativamente alto (por conta do motor Diesel) o que torna mais provável que o proprietário do mesmo esteja disposto a investir em equipamentos que melhorem seu desempenho.
- Além de ser utilizado para o uso fora de estrada, é extremamente popular como veículo de carga, o que aumenta o leque de aplicações e o mercado para a alteração a ser realizada no veículo.
- O Toyota Bandeirante possui um sistema de transmissão e tração integral simples, que facilita a execução de modificações nos mesmos.

Resumidamente, os requisitos básicos de projeto são:

“Otimizar o desempenho de um veículo Toyota Bandeirante no uso rodoviário, sem prejuízo de suas características fora-de-estrada, a um baixo custo e com o máximo de praticidade.”

É necessário ressaltar que a otimização se dará apenas na transmissão, não sendo alterados os freios e a suspensão. Como as alterações possibilitarão maiores velocidades, é necessário que o condutor tenha consciência dos limites de estabilidade e frenagem do veículo. Alterações nestes itens são recomendadas para melhorar o desempenho do veículo como um todo.

1.2 Formulação Técnica

Um dos requisitos fundamentais deste projeto é que o veículo tenha seu desempenho otimizado para o uso rodoviário perdendo o mínimo possível de suas características fora-de-estrada.

Entende-se por velocidade de cruzeiro, a rotação do motor na marcha mais longa onde a relação entre a velocidade e o consumo de combustível é máxima. A dificuldade de se medir precisamente esta velocidade, especialmente em uma faixa de velocidades em que o veículo ainda não atinge e em um motor a Diesel onde ocorre o retorno de combustível, torna necessário estimar este valor.

Um método de se aproximar este valor é adotando a velocidade de cruzeiro onde o nível de ruído e vibração são mínimos, ou seja, onde o motor é menos exigido. Utilizando-se este método, podemos estimar a velocidade de cruzeiro atual do veículo em aproximadamente 85 Km/h, em quarta marcha, a uma rotação de 2100 rpm.

Nas *figuras 1 e 2*, podemos observar as curvas de potência e torque do motor em questão: Mercedes-Benz OM-364A, Turbo alimentado.

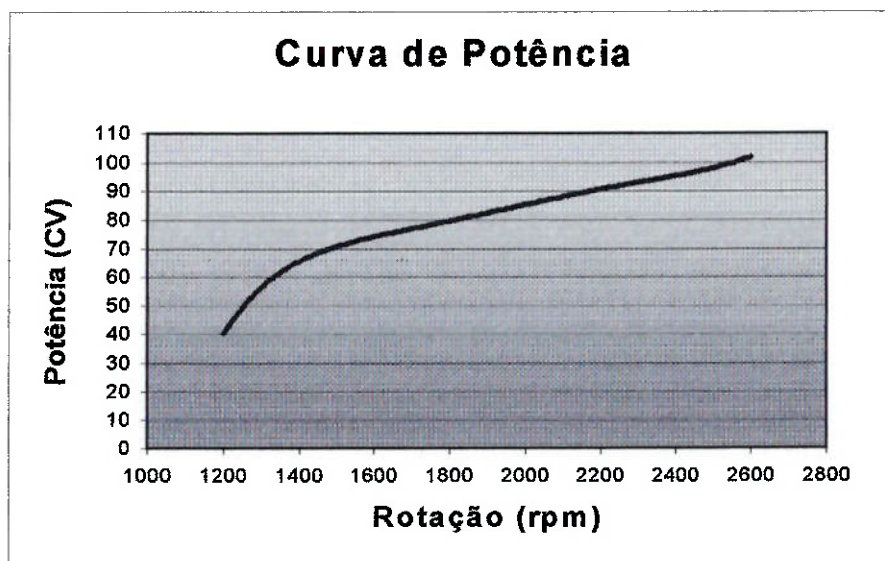


Figura 1

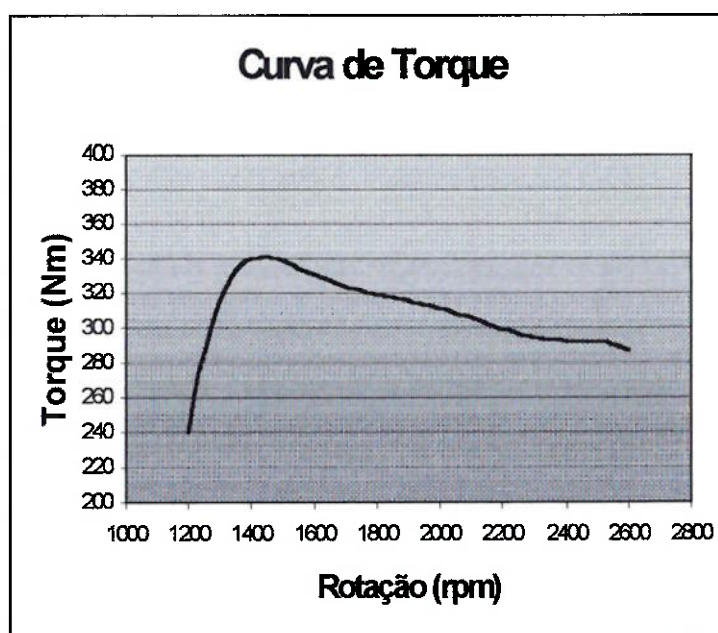


Figura 2

O objetivo do projeto será elevar a velocidade de cruzeiro para 110 Km/h, mantendo a mesma rotação. O aumento da velocidade seria portanto da ordem de 29%.

O motor tem potência máxima de aproximadamente 105 CV a 2600rpm e torque máximo de 340 Nm a 1450rpm.

A potência do motor a 2100 rpm é de cerca de 88 CV. Apesar de não ser possível quantificar com exatidão a potência exigida pelo arraste do ar e devido as resistências mecânicas a 110 km/h, o bom senso sugere que esta potência disponível de 88CV seria suficiente para manter o veículo a velocidade constante.

Convém citar que o projeto busca somente o aumento da velocidade de cruzeiro do veículo, não tendo como intuito observar e solucionar possíveis consequências não desejáveis, como por exemplo estabilidade ou sistema de frenagem não compatível com o aumento de velocidade. Pressupõe-se que um usuário do dispositivo resultante deste projeto se precaverá destes problemas.

1.3 Síntese de Soluções

Para se alterar a velocidade tangencial final da roda do veículo é necessário se alterar a rotação do motor, a relação de rotações entre o eixo do motor e o eixo das rodas de tração ou o diâmetro das rodas de tração. É portanto possível dividir em três seções do veículo, a área onde a alteração pode ser feita para se aumentar a velocidade de cruzeiro:

- Motor
- Transmissão
- Diferencial/Rodas

Dentre as possíveis alterações no motor, podemos destacar:

A) Troca do Motor a Diesel por um Motor a Gasolina

Esta é uma solução possível, pois o motor a gasolina trabalha em uma faixa mais ampla de rotação (1.000 a 5.000 rpm), enquanto que o motor a Diesel original trabalha de 1.200 a 3.000 rpm. Essa característica já permitiria maior amplitude de velocidades.

Uma das vantagens do motor a gasolina seria o nível de ruído, que é um dos principais pontos fracos do motor a Diesel.

Uma outra vantagem do motor à gasolina seria o menor nível de emissões atmosféricas, considerando que o veículo transita nas cidades, onde é cada vez maior a preocupação nesse sentido.

Mas essa solução possui muitos pontos negativos.

O primeiro seria o alto preço inicial. Um motor a gasolina de potência similar custaria pelo menos R\$ 2.000,00. Além disso, teriam que ser feitas várias adaptações para a fixação do motor e a conexão com a caixa de câmbio.

Um outro ponto negativo seria o maior gasto com combustível, que é justamente uma das maiores qualidades do motor Diesel. É importante ressaltar que o motor Diesel é um fator importante quando o consumidor opta por um carro deste tipo, e pode-se encontrar alguns apreciadores que se sentiriam até ofendidos com esta proposta.

Um outro ponto a ser levado em conta é o fato de que o motor a Diesel, por ser mais robusto, mecanicamente mais simples e não possuir parte elétrica é mais confiável e durável.

Se o projeto fosse aplicado a apenas um veículo, poderia optar-se por um motor usado para diminuir o custo inicial. Mas como o projeto tem como objetivo atender a uma produção em massa, essa alternativa se tornaria inviável

B) Alterar o Motor para Gasolina

Existem muitos casos de motores à álcool que foram transformados para gasolina, a um custo viável.

Entretanto, esta alternativa no caso dos motores à Diesel mostra-se muito improvável inicialmente, devido às características específicas dos motores a Diesel e a gasolina.

O princípio de funcionamento de um motor a Diesel é a ignição por compressão, enquanto que em um motor a gasolina a ignição é provocada por uma centelha. Como consequência, existe uma série de diferenças construtivas entre os dois motores. Entre as mais importantes podemos citar: maior robustez do motor a Diesel devido a maiores taxas de compressão, presença de uma bomba injetora e bicos injetores ao contrário de um distribuidor, velas de ignição e carburador encontrados no motor a gasolina.

A alteração para o motor a gasolina seria difícil, necessitando um reprojeto do mesmo, além de extremamente custoso, sendo necessária a troca de grande parte dos componentes do motor.

As alterações possíveis no sistema de transmissão são:

C) Novo Projeto da Caixa de Câmbio

Uma das soluções possíveis seria a troca de toda a caixa de câmbio, atentando-se ao fato de que o veículo não pode perder suas características fora-de-estrada.

Nesse caso, o câmbio teria que ter um número muito grande de marchas. Por exemplo: três ou quatro marchas para o uso fora-de-estrada, três para o uso rodoviário e mais a marcha a ré.

Essa solução apresenta também um custo inicial muito elevado, além de um projeto complexo.

D) Adicionar uma Quinta Marcha ao Câmbio Existente

Uma das soluções possíveis seria adicionar uma caixa de câmbio intermediária entre a caixa de marchas e a reduzida, onde um par de engrenagens faria o aumento da rotação do eixo de saída do câmbio.

Porém, nesse caso, seria necessário trocar o eixo principal do câmbio por um mais comprido, o que acarretaria em custos muito altos. Além disso, a caixa da reduzida teria que ser toda deslocada, o que exigiria muitas modificações, tanto na sua fixação como no cardan.

Na *figura 3* podemos observar um desenho esquemático da caixa de câmbio e caixa de transferência original do Toyota:

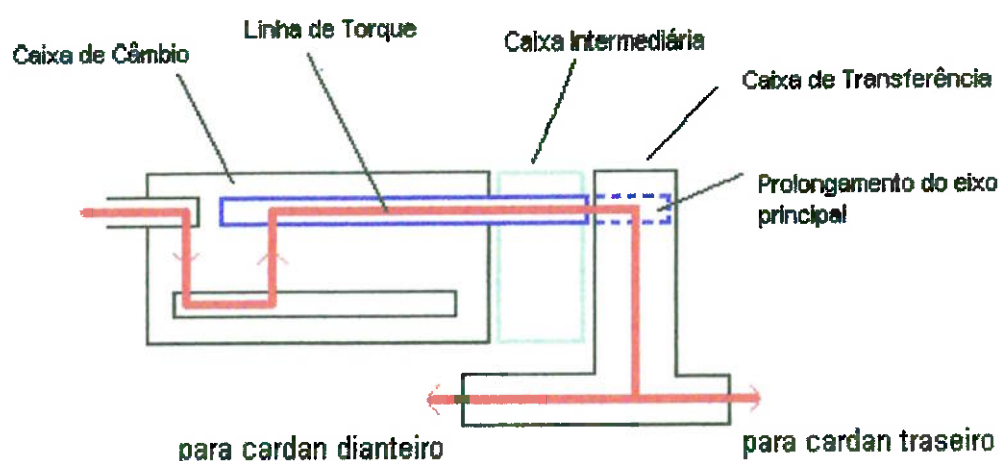


Figura 3

E) Alongar a Relação da Quarta Marcha

Uma das soluções possíveis seria a troca das engrenagens da quarta marcha, tornando esta relação mais longa. Esta solução mostra-se uma das mais simples e baratas.

Entretanto, ocorreriam alguns problemas na pilotagem do veículo: como a terceira marcha é muito curta, o condutor teria que acelerar muito para conseguir engatar a quarta. Em um aplace, por exemplo, não haveria força suficiente para transitar em quarta marcha e a terceira ficaria muito curta, obrigando o motorista a transitar em terceira marcha a uma velocidade muito reduzida ou um giro muito alto.

F) Instalar uma Caixa de Câmbio Posterior à Existente

Nesse caso, seria projetada uma nova caixa de câmbio a ser instalada na saída da caixa de câmbio original.

O câmbio adicional teria apenas duas marchas: uma com a relação de overdrive e uma neutra (relação 1:1).

Essa solução tem a vantagem de ser um projeto mais simples do que o reprojeto de toda a caixa de câmbio e apresentar um custo inicial mais baixo do que as soluções apresentadas até aqui.

As características fora-de-estrada do veículo seriam totalmente mantidas, pois uma vez que seja engatada a relação de 1:1, o veículo teria exatamente o comportamento original.

Essa caixa de câmbio poderia ser acionada por uma alavanca ou por solenóide, o que tornaria mais fácil sua instalação e manuseio.

Na *tabela 1* podemos observar as relações de transmissão atuais e como ficariam com o overdrive:

MARCHA	ATUAL	OVERDRIVE
1	4,925	3,807
2	2,643	2,042
3	1,519	1,174
4	1,000	0,773
R	4,925	3,807

Tabela 1: Relação de marchas original e overdrive

G) Troca do Motor à Diesel por um Motor à Gasolina com a Caixa de Câmbio

Nesse caso seria utilizada a caixa de câmbio própria do motor à gasolina.

O principal problema dessa solução seria adaptar o novo câmbio à caixa de transferência para tração 4X4 e reduzida, o que provavelmente tornaria o projeto inviável.

Além disso, o custo inicial seria ainda mais caro do que a troca apenas do motor.

As possíveis alterações no diferencial ou rodas seriam:

H) Alterar a Relação do Diferencial

O diferencial fornece uma redução de 3,7:1, o que significa que o pinhão tem 13 dentes, contra 48 dentes da coroa. Uma solução para o projeto poderia ser a alteração do diferencial, tornando a relação mais longa, como por exemplo um pinhão de 14 dentes e uma coroa de 40 dentes, resultando em uma relação 29% mais longa, como desejado. Esta seria uma solução simples e barata.

Porém nesse caso a relação seria fixa, e um dos requisitos do projeto é que se mantenha as características fora-de-estrada do veículo. Essa alteração seria aplicável caso o veículo fosse utilizado apenas para uso rodoviário, o que poderia ser um tema para um outro projeto.

I) Alterar o Diâmetro do Pneu

O pneu geralmente utilizado no veículo em questão tem diâmetro de aproximadamente 31 polegadas, ou menos, por volta de 790mm. Uma solução seria trocar o pneu por um de maior diâmetro. Contudo, para a alteração proposta, de cerca de 30%, seria necessário um pneu com diâmetro de aproximadamente 1020mm, o que acarretaria em um imediato aumento da altura do chassi do veículo do solo em 120mm que causará uma perda substancial de estabilidade, algo não desejado para um veículo alto e portanto relativamente instável, que terá sua velocidade de cruzeiro aumentada.

Como visto no exemplo anterior, esta possibilidade limita o veículo a uma relação fixa mais longa, alongando conseqüentemente as marchas reduzidas de uso fora de estrada, o que foge das premissas básicas do projeto. Além disto, esta solução seria perigosa e muito custosa devido as grandes dimensões dos pneus.

J) Utilizar Dois Jogos de Pneus

Uma possível solução para o problema da relação fixa seria utilizar dois jogos de rodas e pneus. No caso de um proprietário que utilize o veículo para trabalho durante a semana e para fora-de-estrada nos fins de semana, por exemplo, esta seria uma solução possível.

Esta solução apresenta a vantagem de que seriam utilizados pneus próprios para cidade, de diâmetro maior, ou pneus fora-de-estrada, de diâmetro original, em vez da utilização dos pneus mistos, melhorando o desempenho do veículo para o fora-de-estrada.

Porém esta solução apresenta uma série de inconvenientes. O principal problema é relativo à questão da praticidade, pois trocar quatro pneus é uma tarefa trabalhosa. Além disso, o carro perderia sua versatilidade, a não ser que o motorista carregue consigo o jogo de pneus opcional, trocando-os sempre que necessário, o que seria totalmente insensato. E a questão da estabilidade e segurança com pneus maiores não estaria resolvida.

K) Alteração do Diferencial e dos Pneus

Uma possível solução poderia ser a alteração dos pneus juntamente com a alteração do diferencial. Nesse caso, poderia ser utilizado um diferencial com uma relação levemente mais longa e pneus um pouco maiores para estrada e um pouco menores para fora-de-estrada.

Esta solução amenizaria a questão da estabilidade levantado no item anterior, porém não resolveria os outros problemas levantados.

Além disso, o custo para executar alterações no diferencial e para a compra de dois jogos de pneus e rodas seria extremamente elevado.

1.4 Escolha da Melhor Solução

Levando em conta as características do projeto, podemos definir alguns critérios de seleção, definindo o nível de importância para cada um:

1.4.1 Custo (10)

Em qualquer projeto atual, o custo é sempre um fator importante pois pode determinar o fracasso ou sucesso de um projeto.

Qualquer projeto, por melhor que seja, tem de ser viável economicamente ou não será possível produzi-lo.

1.4.2 Facilidade de Operação (8)

A facilidade de operação é um fator a ser levado em conta, pois melhorias tecnológicas sempre envolvem comodidade.

O peso deste fator só não é maior porque o sistema não será acionado com uma frequência muito grande. Durante o uso do veículo, a transição de rodovias para fora-de-estrada não é muito frequente na maioria dos casos. Entretanto, algumas das soluções apresentadas pecam neste quesito, pois sua operação é muito trabalhosa.

1.4.3 Facilidade de Instalação (3)

A facilidade de instalação é uma característica não muito importante, pois envolve mudanças possivelmente complexas no veículo, e não se espera que seja uma alteração tão simples.

Além disso, a instalação, por mais demorada e difícil que seja, não pode demorar mais que alguns dias, o que um tempo é considerado normal na manutenção de veículos. E como não é uma situação de emergência, o proprietário pode se planejar para escolher a melhor data para a instalação sem grandes problemas.

1.4.4 Facilidade de Execução (10)

É imprescindível que a solução seja exequível, e pode-se dizer que uma solução mais simples é preferível à uma solução mais complexa. Quanto mais simples é um mecanismo, menores seus custos de projeto, construção e manutenção. Além disso, é menor a probabilidade de que sejam encontrados problemas técnicos insolúveis durante seu projeto, que possam inviabilizar sua continuidade.

Um mecanismo mais simples normalmente é também mais confiável, pois possui menos pontos onde possam surgir falhas.

1.4.5 Custo de Operação (7)

Uma característica destes veículos é seu baixo custo de operação e manutenção, principalmente pelo motor à Diesel e pela resistência e durabilidade de seus componentes. Por isso, é necessário que a solução não apresente um custo alto de operação e manutenção, o que seria uma descaracterização do veículo.

1.4.6 Alteração das Características Fora-de-estrada (10)

Como foi comentado desde o princípio, a solução não poderá alterar essa característica do veículo, sendo esse um dos requisitos mais importantes do projeto.

Resumindo, as soluções até aqui apresentadas são:

- A) Troca do motor a Diesel por um motor a gasolina
- B) Alterar o motor para gasolina
- C) Novo projeto da caixa de câmbio
- D) Adicionar uma quinta marcha ao câmbio existente
- E) Alongar a relação da quarta marcha
- F) Instalar uma caixa de câmbio posterior à existente
- G) Troca do motor à Diesel por um motor à gasolina com a caixa de câmbio
- H) Alterar a relação do diferencial
- I) Alterar o diâmetro do pneu

J) Utilizar dois jogos de pneus

K) Alteração do diferencial e dos pneus

De acordo com as descrições dadas anteriormente para cada solução, podemos montar uma matriz de decisão para as soluções encontradas:

	PESO	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
CUSTO INICIAL	10	1	0	2	5	7	6	0	9	5	6	7
OPERAÇÃO	8	9	7	8	8	1	8	10	7	4	0	6
INSTALAÇÃO	3	1	0	8	4	8	6	3	9	10	10	9
FACILIDADE DE EXECUÇÃO	10	2	0	2	2	7	4	2	8	10	10	9
CUSTO DE OPERAÇÃO	7	1	1	10	10	8	10	1	10	4	3	8
CARAC. FORA-DE ESTRADA	10	8	8	10	8	10	10	10	1	1	10	1
TOTAL		192	143	298	296	328	352	216	333	250	311	301

Portanto será escolhida a solução F:

Instalação de uma caixa de câmbio posterior à existente (overdrive).

PARTE 2

PROJETO BÁSICO

2.1 Desenvolvimento da Solução

2.1.1 Síntese de Configurações

De acordo com o item anterior, decidiu-se adotar um overdrive como solução.

O sistema overdrive pode ser implementado de diversas maneiras. Neste ponto, devemos decidir qual a melhor configuração.

Podemos optar por um sistema de engrenagens convencional ou por planetário. Quanto ao sistema de acionamento, pode-se utilizar um acionamento mecânico ou elétrico, por solenóide, servo-motor ou freio eletromagnético. Pode-se ainda acoplar o sistema à caixa de câmbio em dois pontos diferentes: na saída para o cardan traseiro ou no primeiro eixo da caixa de transferência.

Para permitir um entendimento claro das opções possíveis de overdrive, torna-se necessário entender o funcionamento da caixa de transferência e reduzida do veículo em questão. A figura 4 ilustra a caixa de transferência do Toyota Bandeirante. O torque é aplicado pelo eixo de saída da caixa de câmbio, e passado através do entalhado para as engrenagens "A" e "B". A engrenagem "A" transmite o torque para árvore que contém as engrenagens "C" e "D". As engrenagens "E" e "F" rodam livremente sobre o eixo de saída da caixa de transferência, sendo engatadas por uma luva. Com a luva para a esquerda, o torque é transmitido de "A" para "C" e para "E" sem redução. Alternativamente, com a luva para direita, o torque é transmitido de "A" para "C" e para "F", com redução de rotação de 2:1. A engrenagem "B" é utilizada como tomada de

força, quando acoplada a um dispositivo externo como um guincho.

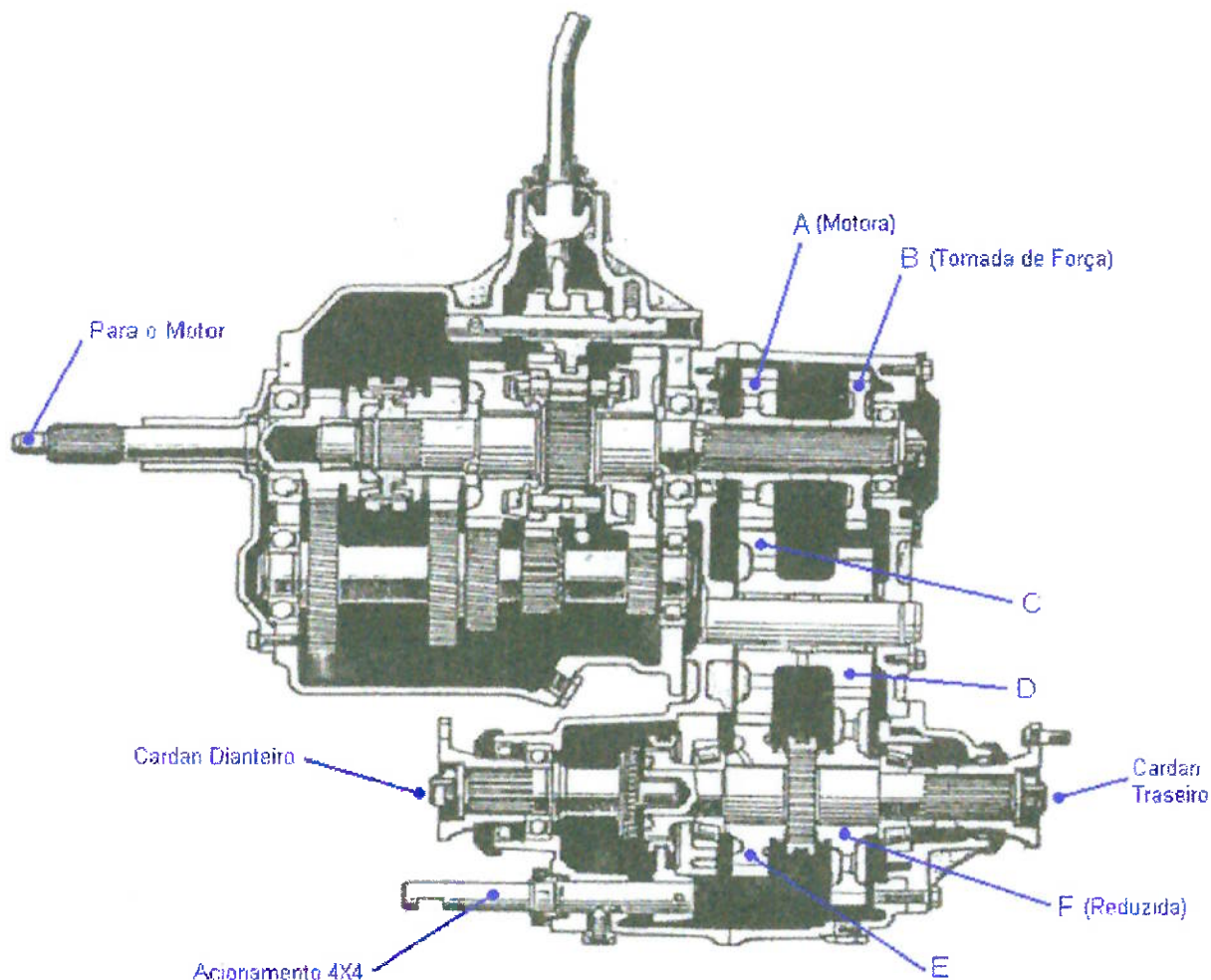


Figura 4

O sistema de overdrive pode ser instalado em duas possíveis posições, na saída para o cardan traseiro, no eixo de saída da caixa de transferencia, e ao lado da ponta de eixo de saída da caixa de cambio, à direita da caixa de transferencia. Passaremos agora a uma descrição das possíveis opções.

- Posicionamento na Saída do Cardan

Neste método, o overdrive seria instalado entre a saída da caixa de reduzida e o eixo cardan traseiro. Neste caso, o overdrive seria colocado no lugar do freio de mão, fixado no suporte do tambor. Optando por esta solução, seria necessário desenvolver também um sistema alternativo como freio de estacionamento, substituindo o já ineficiente freio de mão. Por outro lado, sua instalação seria muito simples, não sendo necessárias modificações internas na caixa da reduzida, apenas na sua carcaça (para fixar a nova caixa) e no cardan traseiro, que provavelmente precisaria ser encurtado.

Contudo, nesta disposição o overdrive só poderia ser acionado em 4X2, pois a alteração de redução aconteceria apenas no cardan traseiro. O acionamento da 4X4 resultaria em uma diferença de rotação entre os eixos dianteiro e o traseiro, causando a quebra de algum componente. Consequentemente, o sistema precisaria possuir algum tipo de dispositivo de segurança que impedisse que a 4X4 fosse acionado com o overdrive “engatado”.

- Posicionamento ao lado da Caixa de Transferencia

Nesse caso, o overdrive seria instalado na ponta do eixo de entrada da caixa de reduzida. O torque seria transmitido ao overdrive pelo eixo interno que suporta as engrenagens “A” e “B”, e retornaria por uma árvore que substituiria estas mesmas engrenagens.

A principal vantagem deste posicionamento é que o overdrive na configuração anterior precisará ser dimensionado para o torque quando o veículo estiver com a reduzida acionada, enquanto que neste ponto da transmissão, não há variação do torque a ser transmitido quando a reduzida for acionada. Sendo necessário transmitir apenas metade do torque, a suas dimensões seriam muito menores, barateando o projeto. Além disso, não teriam que ser feitas alterações no cardan e no freio de estacionamento (freio de mão) do veículo.

Em contrapartida, ainda seria necessário produzir a árvore que substituiria as engrenagens "A" e "B" colocadas no eixo entrada da caixa de transferência, o que aumentaria substancialmente o custo do projeto.

A figura 5 ilustra as duas posições possíveis para o overdrive na caixa de transferência.

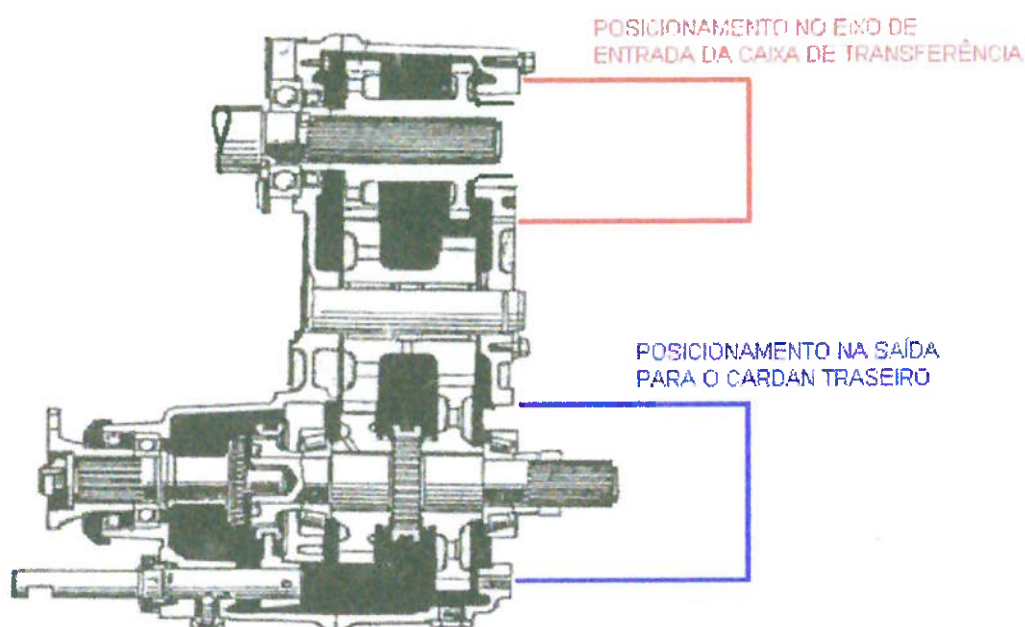


Figura 5

O overdrive em si pode ser constituído de um sistema de engrenagens helicoidais, como em caixas de câmbio convencionais ou de um sistema de engrenagens planetárias, como visto a seguir.

- Sistema de Engrenagens Convencional

Esse tipo de transmissão pode ser visualizado na *figura 6*: consiste em dois eixos com dois pares de engrenagens. A primeira engrenagem (verde) gira livre sobre o eixo de entrada. O torque nesta engrenagem pode ser transmitido a segunda engrenagem (azul) por um par de engrenagens solidárias a um eixo secundário. Esta última engrenagem é solidária ao eixo de saída. Entre as duas engrenagens (azul e verde) existe um entalhado no eixo de entrada onde é encaixada uma luva, que desliza no sentido axial. Essa luva, ao ser deslocada, se encaixa em uma das duas engrenagens livres, fixando-as ao eixo, tornando possível a transmissão do torque. Ligando o eixo a segunda engrenagem (azul), o torque é transmitido diretamente do eixo de entrada ao eixo de saída, ou seja, com relação de transmissão de 1:1. Ligando a primeira engrenagem ao eixo de entrada o torque é transmitido ao eixo secundário antes de voltar a segunda engrenagem e finalmente ao eixo de saída. Nesta configuração será verificada uma relação de transmissão dada por $(D_2/D_1) \times (D_4/D_3)$, se considerada a ordem de transmissão de torque.

Para tornar as engrenagens solidárias ao eixo de entrada podem ser utilizados sistemas sincronizadores mecânicos, embreagens ou um freio eletromagnético, que neste caso utilizaria a própria engrenagem como elemento de reação, agindo como uma embreagem.

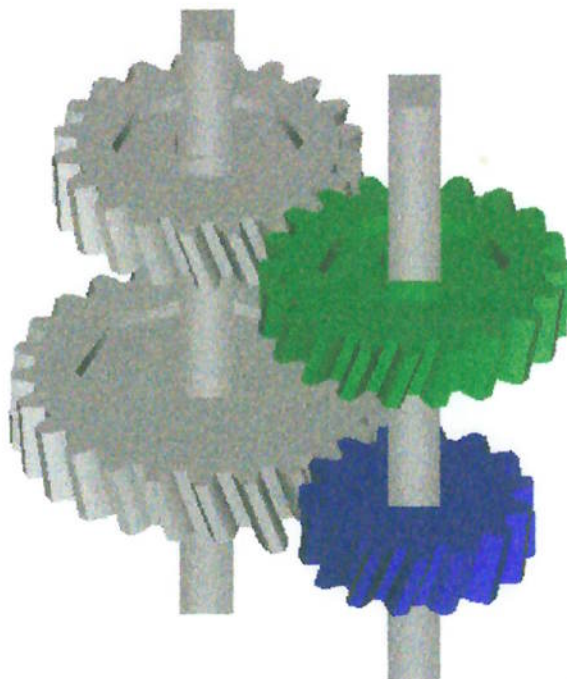


Figura 6

Esta é a solução normalmente adotada para redutores automobilísticos, e seria a solução mais natural para o problema.

- Sistema de Engrenagens Planetárias

O sistema de engrenagens planetárias consiste em uma engrenagem ("sol") engastada, onde são acopladas três ou mais pequenas engrenagens ("planetas"), que por sua vez são acopladas a uma engrenagem externa.

Na *figura 7*, pode-se observar uma transmissão típica por planetário.

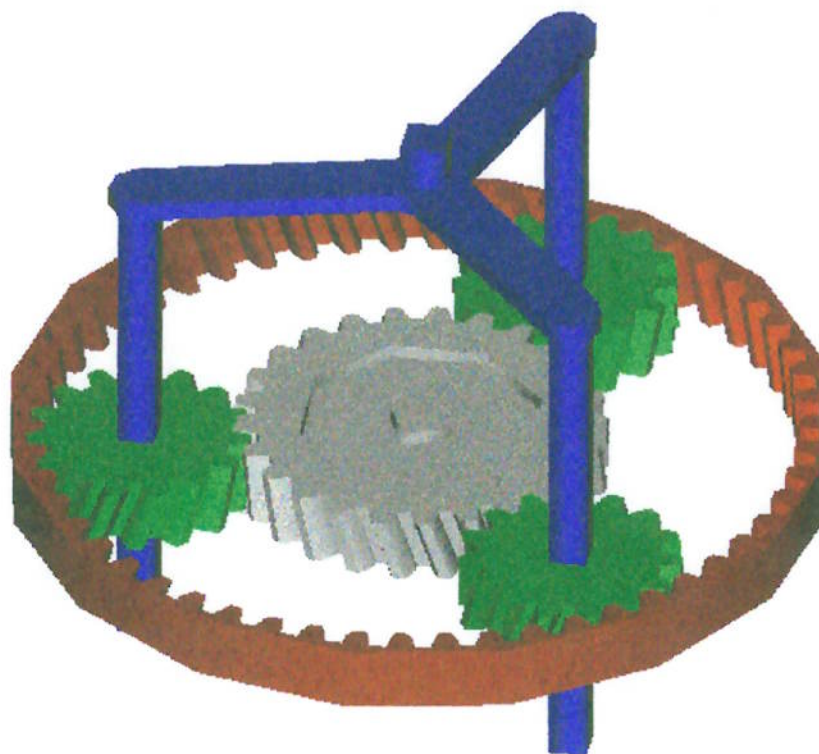


Figura 7

A mudança de marcha pode ser feita de várias formas. Normalmente, freia-se uma das engrenagens, e as outras duas produzirão uma relação de transmissão entre elas. Engastando qualquer elemento a um outro faz com que o conjunto inteiro gire a uma mesma rotação, gerando uma relação 1:1. No caso do overdrive, onde apenas uma pequena diferença de rotações é necessária (0,77), costuma-se utilizar a configuração descrita a seguir. O braço de apoio dos “planetas” (azul) é acoplado ao eixo de entrada, enquanto que a engrenagem externa (vermelho) é engastada ao eixo de saída. Mantendo a engrenagem interna “sol” (cinza) imóvel, a engrenagem externa gira com uma velocidade maior que o eixo de entrada, enquanto que os “planetas” caminham em torno do “sol”. A relação resultante é dada por $D_{\text{braço}}/D_{\text{ext}}$, onde $D_{\text{braço}}$ é o

diâmetro do braço de apoio dos “planetas” medido do centro dos “planetas” e passando pelo centro do braço de apoio.

A grande vantagem deste sistema é que a mudança da relação é feita através da frenagem ou travamento de uma ou mais engrenagens, ou seja, não é necessário interromper a transmissão de potência bem como acionar a embreagem. Por essa característica, ele é muito utilizado em sistemas de transmissão automática. Além disso, ele permite grandes reduções e várias relações com poucas engrenagens (apesar de não relacionado com a aplicação do overdrive) ocupando pouco espaço, principalmente em seu comprimento.

- Acionamento Mecânico

O acionamento mecânico é aquele normalmente observado em automóveis, onde a seleção das marchas se dá por meio de alavancas que empurram a luva para o sincronizado de uma das engrenagens. No caso das engrenagens planetárias, as alavancas acionam um freio (geralmente de cinta) para travar a engrenagem interna e uma embreagem para unir qualquer duas engrenagens. Uma opção pouco viável seria acionar uma luva a um sincronizado engastado na caixa travando a engrenagem, pois obrigaria a embreagem a ser acionada simultaneamente. Opcionalmente, para facilitar a montagem do overdrive, o acionamento também pode ser feito por um cabo.

Este sistema tem a vantagem de ser mais confiável e durável do que o sistema elétrico. Porém, é um sistema de acionamento menos confortável.

Outra desvantagem deste método é a necessidade de construir um sistema de alavancas, o que seria muito mais complexo do que o sistema elétrico. Teriam que ser executadas modificações na cabine do veículo para a passagem da alavanca ou cabo. No Toyota Bandeirante original, existem duas alavancas na cabine: do câmbio e da reduzida/4x4, caso o veículo não seja equipado com quincho mecânico, e uma terceira alavanca começaria a representar um inconveniente.

- Acionamento Elétrico

O acionamento elétrico simula o movimento do acionamento mecânico mas apresenta a vantagem de não requerer grandes modificações na cabine, bastando apenas acrescentar um interruptor ao painel. Portanto sua instalação seria muito mais simples do que acionamento mecânico. Os componentes internos do overdrive seriam os mesmos, mudando apenas a fonte do movimento, em vez de uma alavanca, teríamos um solenóide ou um servomotor.

Este sistema está sujeito a algumas falhas de origem elétrica, como pane do sistema elétrico, queima de algum componente ou curto-circuito. Portanto, deve ter alguma característica que proteja o sistema contra falhas no sistema elétrico. No caso de falha elétrica, o sistema teria que assumir uma das duas posições e permitir que o veículo continue transitando.

Apesar do acionamento elétrico ser muito similar ao mecânico, eles se diferenciam pelo preço, pois o uso de um servo motor torna mais caro um projeto análogo com acionamento mecânico.

- Acionamento Eletromagnético

Este acionamento consiste em um freio eletromagnético, ou seja, um dispositivo que quando energizado pela passagem de corrente une o eixo a um tambor, ou no caso, uma engrenagem. A especificação de um modelo básico de disco único pode ser observada na *figura 8*.

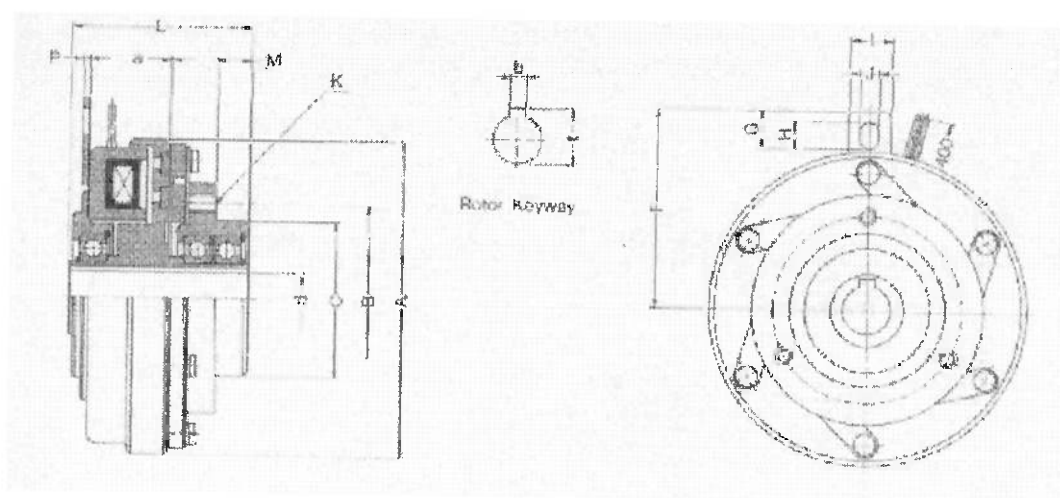
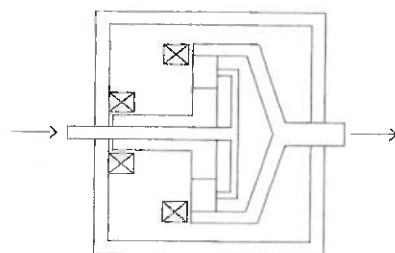


Figura 8

A sua principal vantagem é que para qualquer dos sistemas de engrenagens escolhidos, o uso do freio eletromagnético permite que o overdrive seja acionado sem ser preciso acionar a embreagem simultaneamente. A sua instalação é simples, sendo fixado à um eixo por meio de uma chaveta e à engrenagem por parafusos. Além de ser comprado como item montado, não requer manutenção e simplifica bastante a configuração e o acionamento na cabine, necessitando apenas de um interruptor, como no caso do acionamento elétrico.

Se este sistema fosse usado com o sistema de engrenagens planetárias, por

exemplo, o freio eletromagnético permitiria o travamento da engrenagem interna, bem como o acoplamento dos outros dois elementos rotativos. O acionamento poderia ser realizado sem que seja necessário interromper a transmissão de potência ou acionar a embreagem. Uma ilustração esquemática pode ser observada a seguir:



Contudo, o acionamento eletromagnético sofre de uma série de desvantagens: o torque a ser transmitido do eixo para engrenagem é de aproximadamente 350 Nm. Com a primeira marcha engatada, este torque é multiplicado por quase 5 vezes, o que resulta em um torque de mais de 1500Nm. Contudo, pode ser considerado extremamente improvável que o torque máximo seja atingido em primeira marcha, sendo o overdrive acionado simultaneamente. O torque máximo, com mudança para overdrive, só seria exigido em 3 marcha o que resultaria em uma torque de no mínimo 500Nm. Nota-se que este torque é o de acionamento do overdrive, como acontece com a rotação relativa entre os dois elementos a serem acoplados.

Dimensions in mm

SIZE		6	12	25	40	70	100	160
Static Torque, NM		60	120	250	400	700	1,000	1,600
Coil Voltage (typical), DCV		24	24	24	24	24	24	24
Coil Power (at 20C), W		30	40	50	60	80	100	120
Max. Revolution, RPM		3,000	3,000	2,000	2,000	1,500	1,000	1,000
Bore	Dia. (Rotor), dH7	22	28	35	50	50	75	75
	keyway, bXT	7X25. 5	7X31. 5	10X38. 5	12X53. 5	12X53. 5	20X8 1	20X8 1
Diameter	A	143	171.5	203	228	267	317	368
	B	85	100	120	150	180	210	250
	C	70	80	100	120	150	180	215
	F	90	102	120	140	155	180	215
	G	10	11.5	13	13	18	18	30
	H	8	9	10.5	10.5	13	13	20
	I	14	14	16	16	24	24	30
	J	6.5	6.5	8.5	8.5	13	13	13
	K	3-M8	3-M8	3-M10	4-M10	6-M12	8-M12	8-M12
Length	L	80	90	90	102	120	135	165
	M	15	17	18	18	24	32	38
	P	3	3	4	5	6	8	8
Air Gap, a		0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.7
Weight, kg		4.5	7.4	11.5	21	44	51	76

Consultando empresas que fornecem este tipo de equipamento, descobriu-se que as dimensões de um freio eletromagnético para transferir tal torque se aproximam de 300mm de diâmetro e pesam mais de 40kg, pouco satisfatório para o projeto proposto considerando a necessidade de dois destes dispositivos, como visto adiante. Para se tentar resolver este problema, seria necessário adotar um freio eletromagnético de discos múltiplos que apesar de ter dimensões menores ainda sofre o seu principal problema: seu alto custo que encarece bastante o projeto. Consultando distribuidores destes equipamentos em São Paulo, obteve-se um preço médio de R\$ 1.100,00 para o dispositivo similar ao ilustrado acima. Considerando a necessidade de um par destes freios eletromagnéticos, esta proposta colocada se torna

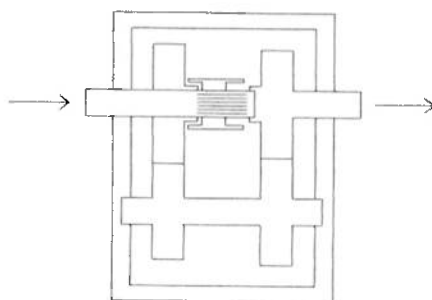
economicamente inviável por não condizer com o objetivo inicial do projeto de proporcionar a melhora do desempenho rodoviário a um baixo custo..

Agrupando as opções apresentadas, e excluindo o uso do acionamento eletromagnético, podemos desenvolver as seguintes soluções:

A) Sistema de Engrenagens Convencional

Acionamento Mecânico

Posicionamento na Saída do Cardan



Essa solução apresentaria a simplicidade de um sistemas de engrenagens convencional aliada ao baixo preço do acionamento mecânico.

Porém o posicionamento na saída do cardan apresenta os inconvenientes de trabalhar com um torque mais elevado e a necessidade de se fazer modificações no cardan.

B) Sistema de Engrenagens Convencional

Acionamento Elétrico

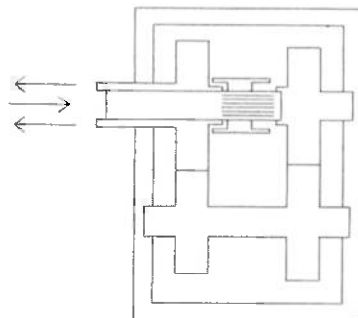
Posicionamento na Saída do Cardan

A diferença desta solução para a anterior está no acionamento elétrico. Essa característica tornaria o projeto um pouco mais caro, porém a instalação seria muito mais simples e o acionamento mais confortável. Novamente se tornaria necessário um super dimensionamento das engrenagens e elementos associados para permitir a transmissão de potência quando o veículo estiver com a reduzida engatada.

C) Sistema de Engrenagens Convencional

Acionamento Mecânico

Posicionamento na Caixa Reduzida



Diferentemente das opções anteriores, neste caso a caixa ficaria posicionada no primeiro eixo da caixa reduzida. Como já foi dito, a caixa teria dimensões menores por trabalhar com um torque reduzido. A relação de overdrive atuaria

nos eixos dianteiro e traseiro, eliminando o problema de se engatar a 4x4 com o overdrive acionado. Além disso, não teriam que ser feitas alterações no cardan.

D) Sistema de Engrenagens Convencional

Acionamento Elétrico

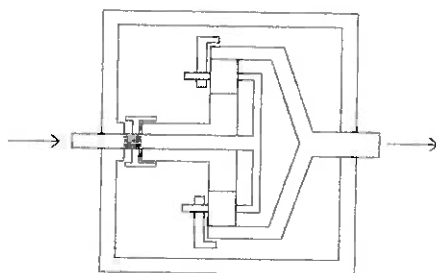
Posicionamento na Caixa Reduzida

Essa solução alia as vantagens da solução anterior com a comodidade de um acionamento elétrico.

E) Sistema de Engrenagens Planetárias

Acionamento Mecânico

Posicionamento na Saída do Cardan



O sistema de engrenagens Planetárias possui alguns pontos negativos, pois é um sistema mais complexo e mais caro pois envolve um maior número de dispositivos para se "travar" a engrenagem interna ou os outros dois elementos

entre si.

No caso de o planetário estar posicionado na saída do cardan, onde o torque é muito alto, seria necessário uma maior dimensão das peças. Porém apresenta a vantagem de não ser necessário interromper a transmissão de potência para o acionamento do overdrive.

O acionamento mecânico, propriamente dito, no caso de um sistema planetário pode ser mais simples do que um sistema de engrenagens convencionais, pois o travamento normalmente é feito por um freio. Assim, em vez de um sistema de alavancas, o acionamento pode ser feito por um cabo de aço, por exemplo.

F) Sistema de Engrenagens Planetárias

Acionamento Elétrico

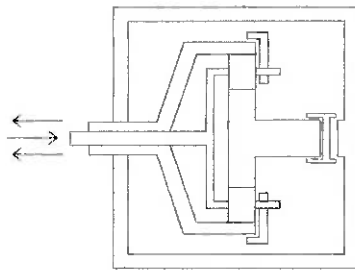
Posicionamento na Saída do Cardan

Nesta solução, o acionamento seria provavelmente feito por um solenóide que tencionaria um freio de banda, travando a engrenagem interna. A união de dois elementos quais quer no planetário pode também ser feita por uma freio acionado eletricamente, desde que solidário a um segundo elemento, ou seja, para que haja frenagem do movimento relativo entre eles. Um método opcional seria por um sistema de sincronização entre as engrenagens que apresenta as mesmas características apontadas nos itens anteriores.

G) Sistema de Engrenagens Planetárias

Acionamento Mecânico

Posicionamento na Caixa Reduzida



O posicionamento na caixa reduzida faria com que o planetário tivesse dimensões menores, eliminando um grande problema apontado na solução E). Essa seria uma boa solução caso se opte por um sistema planetário, desde que o custo do acionamento elétrico não sobreponha os outros fatores.

H) Sistema de Engrenagens Planetárias

Acionamento Elétrico

Posicionamento na Caixa Reduzida

Como citado anteriormente, este sistema seria similar ao de engrenagens planetárias com acionamento mecânico, facilitando apenas o acionamento, a um custo um pouco maior.

2.2 Seleção da melhor configuração

Apresentadas as possíveis configurações para o overdrive, podemos montar uma matriz de decisão semelhante à anterior para selecionar a melhor opção. Serão utilizados basicamente os mesmos critérios anteriores, eliminando apenas os critérios sobre alteração das características fora-de-estrada, pois todas as opções atendem plenamente a esse quesito, e o critério sobre custo de operação, pois é aproximadamente o mesmo para todos.

	PESO	A	B	C	D	E	F	G	H
CUSTO INICIAL	10	10	9.2	8	7.2	7.4	4.6	5.4	4.6
OPERAÇÃO	8	5.4	7.4	6	8	7.4	9.4	8	10
INSTALAÇÃO	3	7.4	10	4.6	7.4	7.4	10	4.6	7.4
FACILIDADE DE EXECUÇÃO	10	8	10	6	8	5.4	7.4	3.4	5.4
MÉDIA		7.9	9.1	7.3	7.7	6.8	7.3	5.3	6.5

De acordo com a matriz de decisão acima, escolhemos a solução B):

Sistema de Engrenagens Convencional

Acionamento Elétrico

Posicionamento na Saída do Cardan

A escolha da solução deve-se principalmente ao fato de oferecer um baixo custo inicial e a sua facilidade de execução, requisitos fundamentais para o

projeto em questão.

A continuação do trabalho consiste no projeto básico e executivo do overdrive.

Durante essas etapas, será analisada a possibilidade de se utilizar peças já existentes no mercado em outros dispositivos, com a intenção de diminuir o custo do projeto.

PARTE 3

PROJETO EXECUTIVO

3.1 Considerações Iniciais

Tendo definido as principais características do overdrive, cabe agora determinar a melhor forma de construí-lo.

Nesta etapa, deve-se levar em conta que o projeto é uma adaptação e o equipamento não será produzido em grandes quantidades. Por isso, processos de fabricação e otimizações de preços ou peso não serão fatores importantes.

Como a intenção não é a produção em série, optou-se por utilizar, na medida do possível, algumas peças já disponíveis no mercado em outros câmbios, adaptando-as ao projeto.

A melhor opção seria utilizar engrenagens já existentes com seu próprio sincronizado, eixo e rolamentos, visando diminuir o custo e o tempo de projeto e fabricação. Assim, o trabalho de adaptação ficaria concentrado na caixa e no acionamento.

Foi então realizada uma pesquisa para encontrar dois pares de engrenagens que satisfizessem as condições de relação de transmissão e resistência aos esforços requeridos, e que tivessem ainda dimensões compatíveis com o projeto.

3.2 Principais Características dos Câmbios Existentes

Os veículos que mais se aproximariam desses requisitos seriam os caminhões leves. Na maioria dos caminhões, o câmbio funciona da seguinte forma:

O câmbio possui três eixos principais: o piloto, o secundário (ou intermediário) e o de saída (ou entalhado).

O torque é transmitido do motor ao câmbio por um eixo de entrada (piloto), que transmite o torque ao eixo secundário através de um par de engrenagens (redução primária), geralmente chamada de relação constante pois é utilizada independente da marcha selecionada.

O eixo secundário é ligado ao eixo de saída através dos pares de engrenagens referentes à cada marcha (redução secundária). No caso de um câmbio de quatro marchas, por exemplo, teremos quatro pares de engrenagens ligando o eixo secundário ao eixo de saída (mais a marcha a ré).

Estes detalhes podem ser claramente observados na *figura 9*.

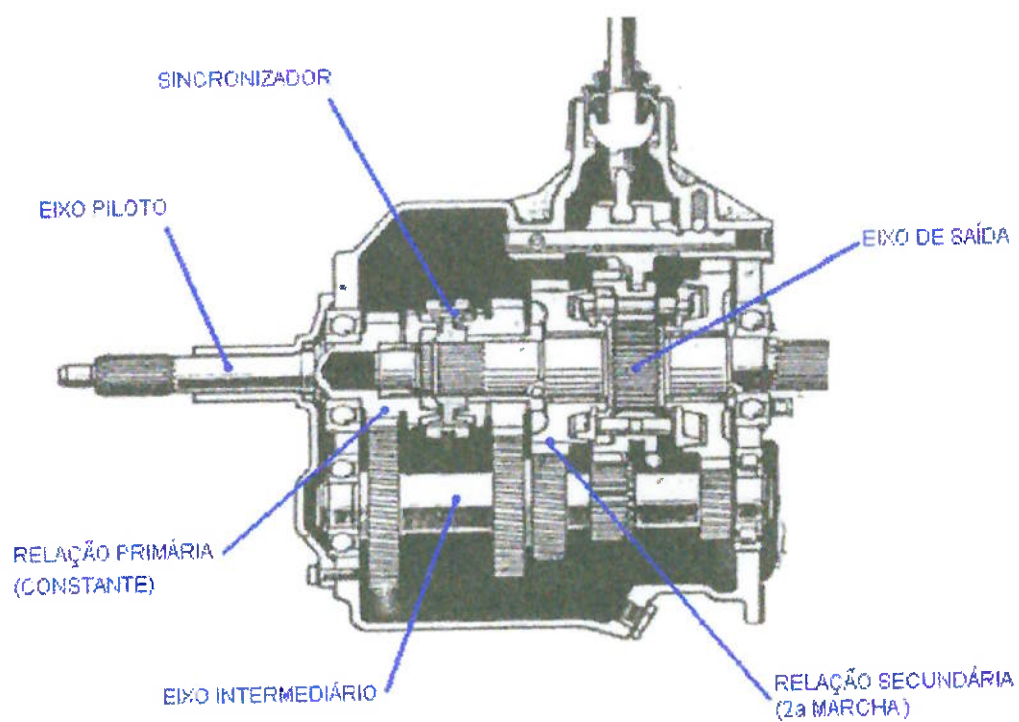


Figura 9: Corte da caixa de câmbio do TOYOTA Bandeirante.

3.3 Seleção do Câmbio a Ser Utilizado

Neste projeto, seriam utilizados dois pares de engrenagens secundárias, pois assim poderia ser aproveitado o próprio sincronizado original, que é um sistema cujo projeto não é simples e possui um alto nível de desenvolvimento tecnológico, não valendo a pena reprojetá-lo e construí-lo. Portanto, a relação resultante seria dada pela multiplicação entre as duas reduções. Uma representação esquemática do overdrive pode ser observada na *figura 10*.

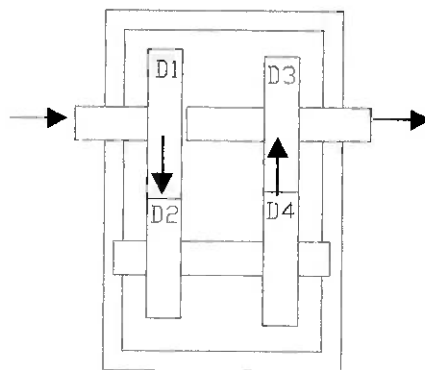


Figura 10: Representação esquemática do overdrive

A relação final pode ser determinada pela fórmula: $R = (D2/D1) \cdot (D3/D4)$.

Sendo D o diâmetro das engrenagens ou o seu número de dentes já que os módulos de cada par de engrenagens é necessariamente igual.

Foram consultados os três principais fabricantes nacionais de câmbios: inicialmente a ZF e a Mercedes Benz e, posteriormente a EATON ⁽¹⁾.

Porém, na maioria dos câmbios que satisfizeram a condição de torque as relações obtidas por este método estavam na ordem de 50%, que é um valor muito superior ao desejado (30%).

Na EATON, encontrou-se um jogo de engrenagens sincronizadas que atendia aos requisitos e resultava em uma relação de 28%, que seria ideal para o projeto. As engrenagens correspondiam à terceira e quarta marcha do câmbio FS-5306. Porém esse câmbio era destinado ao mercado externo, e a obtenção de peças seria muito complicada, o que inviabilizou a sua utilização.

A relação mais próxima que se conseguiu foi de 36%, utilizando-se a redução primária e a quinta marcha do câmbio EATON FS-6206A. A relação 1:1 (overdrive desligado) seria obtida ligando-se o eixo piloto diretamente ao eixo de saída, que corresponde à sexta marcha do câmbio original.

(1) Foi feita uma visita à concessionária de caminhões Mercedes Benz ITATIAIA, localizada em Barueri, onde havia catálogos dos câmbios ZF e Mercedes Benz para caminhões. Posteriormente, foi feita uma visita à fábrica da EATON – Divisão de transmissões, em Valinhos, onde pudemos observar catálogos e obter informações diretamente dos engenheiros. Além disso, tivemos a oportunidade de visitar a linha de produção, acompanhando processos de usinagem, tratamento térmico, montagem e controle de qualidade. Algumas informações importantes foram obtidas. Por exemplo: foi informado que as engrenagens prontas passam por tratamentos térmicos sofisticados. Após este tratamento elas não podem ser usinadas. Portanto, as engrenagens compradas não podem sofrer alterações. Posteriormente, conseguiu-se a doação de um câmbio semi-novo da EATON, com o qual foi possível dar continuidade ao projeto e a construção do protótipo.

Apesar de a relação obtida ser um pouco maior do que a ideal, devido ao elevado torque do veículo esse fato não representa um fator de inviabilização do projeto, como veremos posteriormente. Portanto decidiu-se por utilizar este câmbio, cujo desenho de conjunto pode ser observado na *figura 11*. No destaque, pode-se observar as principais peças utilizadas.

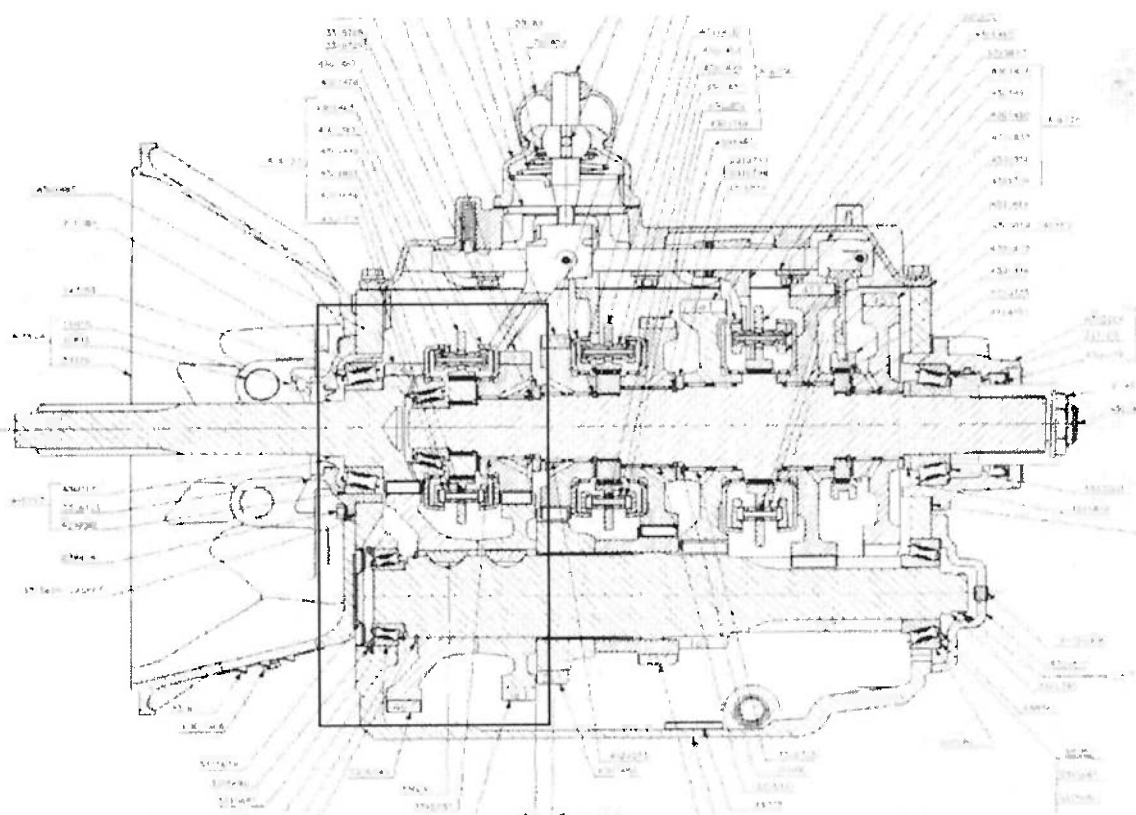


Figura 11

Na *figura 12* pode ser observado o câmbio original montado.

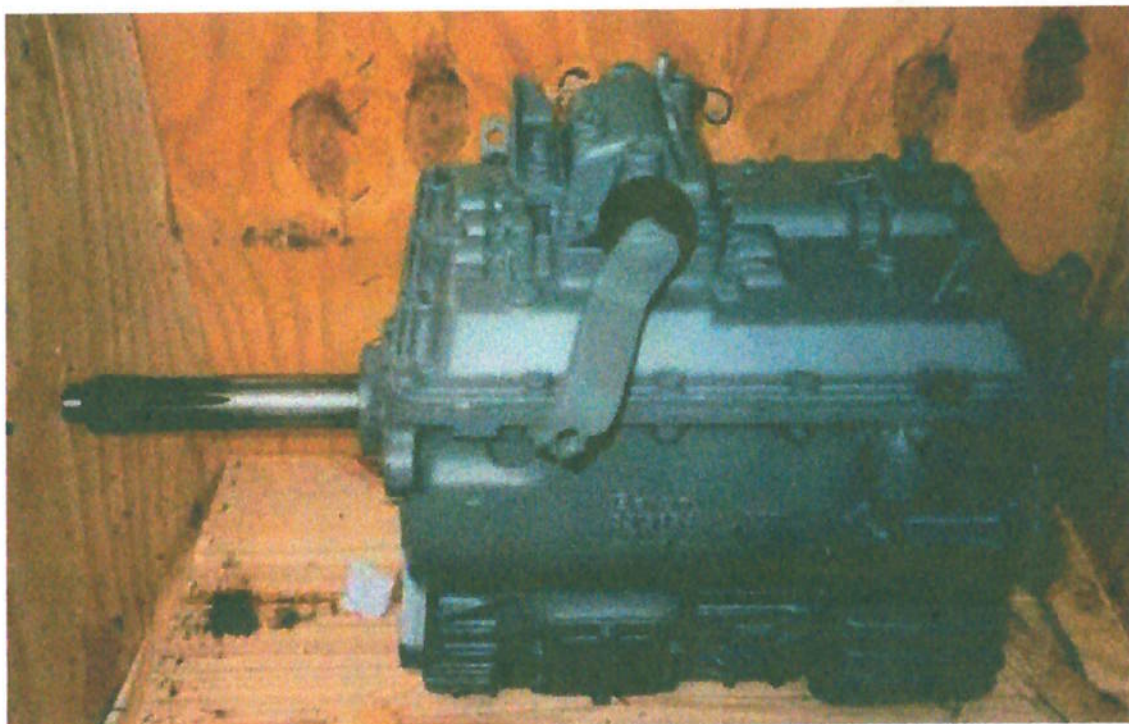


Figura 12

3.4 Cálculo da Relação de Transmissão

O projeto original previa uma velocidade de cruzeiro de 110km/h a 2100rpm, com uma relação de 1,27 : 1, ou 1 : 0,787. Com a nova relação, a velocidade de cruzeiro eleva-se para 118km/h a 2100rpm ou pode ser mantida a 110km/h a uma rotação de 1960rpm.

Na figura 13 pode-se observar um esquema do overdrive.

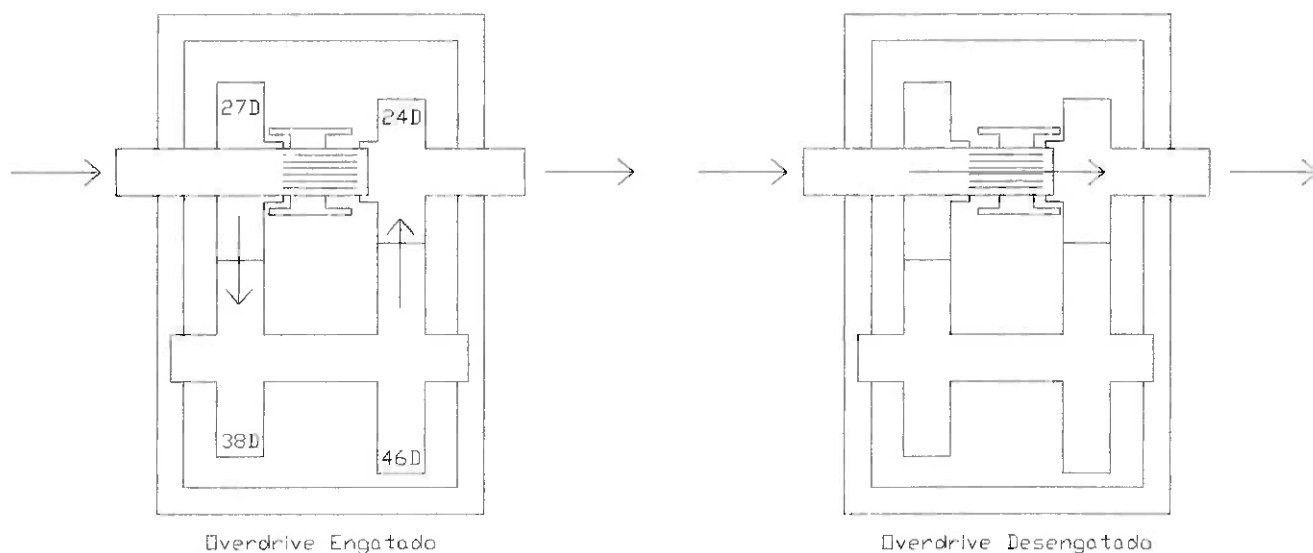


Figura 13: Funcionamento do overdrive engatado e desengatado

Assim, pelo número de dentes de cada engrenagem, podemos calcular a relação de overdrive:

$$R = (38/27) \cdot (24/46) = 0,7343$$

Invertendo-se este valor, obtemos 1,36, que fornece um aumento na velocidade de 36%.

3.5 Observações quanto ao Dimensionamento das Engrenagens

O dimensionamento de engrenagens encontrados em livros de Elementos de Máquinas, estão muito aquém dos avanços tecnológicos obtidos por empresas especializadas. Através de tratamentos térmicos, materiais e processos de fabricação especiais, consegue-se a transmissão de potências muito grandes em engrenagens de dimensões reduzidas.

Por isso, o dimensionamento das engrenagens não fará parte deste trabalho, sendo utilizados os dados fornecidos do fabricante quanto à resistência das engrenagens e uma comparação com os esforços solicitantes.

Na *figura 14* podemos observar a curva de torque do motor.

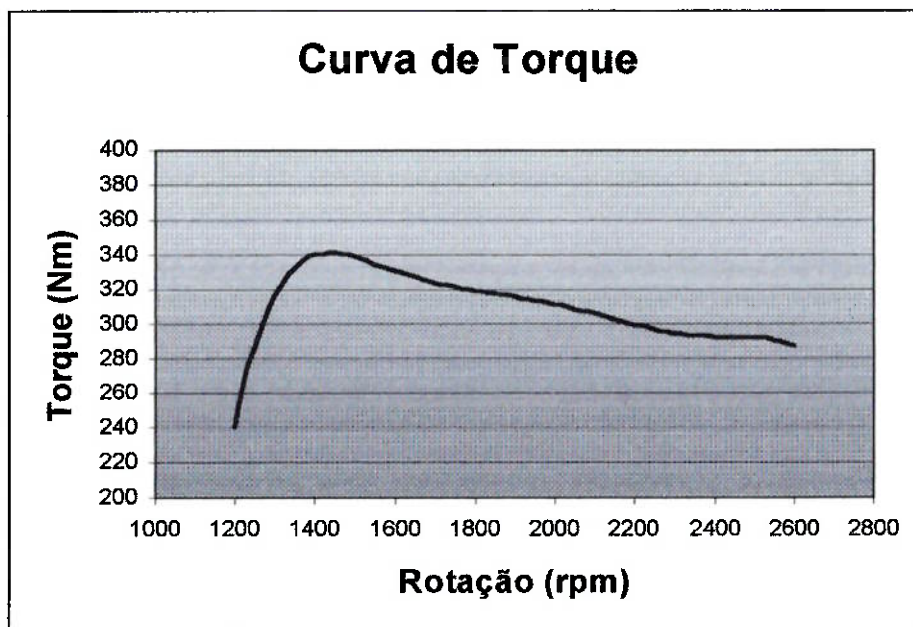


Figura 14

De acordo com a tabela abaixo, o torque máximo que chegaria ao overdrive seria o torque máximo do motor multiplicado pela relação de redução da 1ª marcha.

MARCHA	RELAÇÃO DE REDUÇÃO
1	4,925
2	2,643
3	1,519
4	1,000
R	4,925

Portanto, o torque máximo seria de:

$$340 \text{ Nm} \cdot 4,925 = 1674,5 \text{ Nm}$$

Nas especificações do câmbio, o torque máximo é de 820Nm. Porém, de acordo com informações fornecidas pela EATON, este valor é limitado principalmente pela primeira marcha do câmbio original, pois ela possui uma engrenagem de diâmetro muito reduzido. As engrenagens a serem utilizadas (da redução primária e quinta marcha) resistem a este torque com grande margem de segurança.

3.6 Projeto

Nesta etapa será descrito o projeto propriamente dito, onde são feitas considerações sobre todas as partes do overdrive.

Como visto anteriormente, serão utilizadas algumas peças do câmbio EATON e algumas peças serão fabricadas.

Ao final do trabalho estão anexados desenhos de conjunto e de fabricação de todas as peças que foram produzidas.

Na *figura 15* pode ser observado um corte esquemático do overdrive.

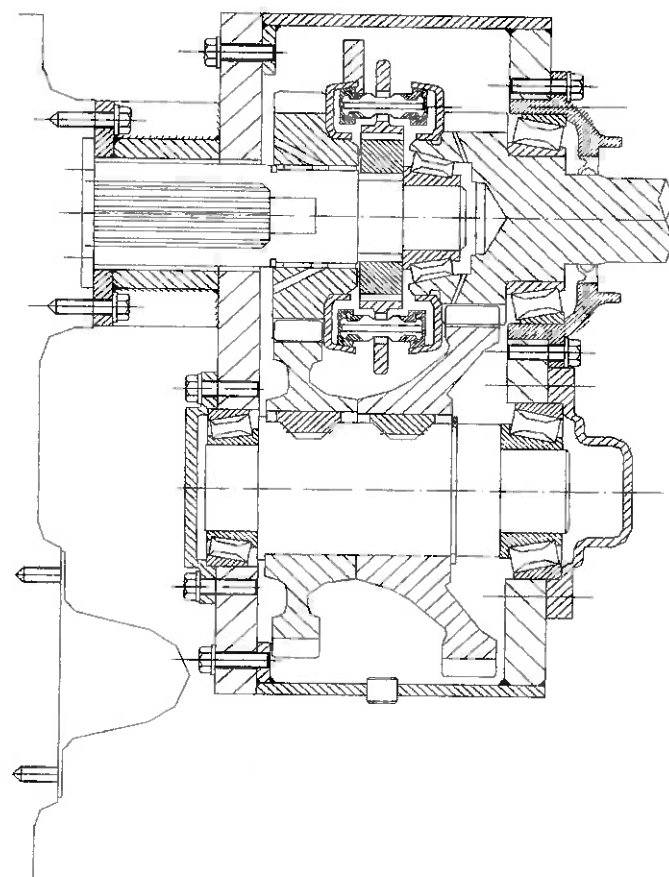


Figura 15

3.6.1 Eixos

Eixo de Entrada

O eixo de ligação entre o overdrive e a caixa de transferência será reconstruído. Ele será semelhante ao eixo original da Eaton, pois nele serão encaixadas várias peças originais: o rolamento, o entalhado do sincronizado, uma engrenagem e o anel elástico.

Este eixo deve ser acoplado ao eixo de saída da caixa de transferência.

Para evitar transformações definitivas no automóvel, os eixos serão interligados através do entalhado que existe no eixo de saída da caixa de transferência.

Para isso, no eixo a ser construído será feito um entalhado interno.

Eixo de Saída

O eixo piloto original do câmbio, que será o eixo de saída do overdrive, é uma peça que já contém a primeira engrenagem. Por isso, ele será utilizado, fazendo-se as adaptações necessárias para o acoplamento com o cardã. O suporte da junta universal que liga o cardan será fixado ao eixo através de um entalhado igual ao da saída da caixa de transferência original do veículo. Este entalhado será usinado no eixo de saída (eixo piloto do câmbio Eaton) e o suporte da junta universal será o original Toyota.

Eixo Secundário

O eixo secundário possui a fixação das engrenagens a serem utilizadas. A fixação é feita por chavetas, que é um sistema muito simples de se projetar e construir. Além disso, o eixo original é uma peça longa, com algumas

engrenagens (da primeira e segunda marchas) entalhadas no próprio eixo, e sofre tratamento térmico, sendo uma peça de alto custo e de difícil usinagem. Por isso, será mais fácil usinar um novo eixo a utilizar o original.

3.6.2 Caixa

A caixa será construída em chapas soldadas normalizadas, pois a construção em ferro fundido só seria justificável para uma produção elevada.

Como não se trata de uma produção em série, não se tem a preocupação de otimizar o peso do equipamento.

Essa opção é reforçada pelo fato de que a caixa não estará submetida apenas pelas forças aplicadas pelo sistema de propulsão do veículo, mas também por impactos de pedras, troncos e até o próprio impacto com o solo, pois trata-se de um veículo off-road. Esses impactos geram solicitações muito maiores que o normal.

Por questões de construção, utilizaremos basicamente as espessuras da caixa original. As paredes onde estão apoiados os eixos terão espessura de $7/8"$ e as demais terão espessura de $1/4"$. Vale ainda salientar que a caixa original é de ferro fundido, e a caixa do overdrive será de aço, apresentando uma resistência bem mais elevada.

Para que seja possível a montagem de todas as peças na caixa, a face onde está o eixo de entrada será fixa por meio de parafusos. Para isso, a caixa contará com uma flange interna.

Para garantir que a caixa suporte os esforços, foi feita uma verificação em sua seção mais delgada, que será mostrada mais adiante.

3.6.3 Acionamento

O acionamento elétrico

Como definido no projeto básico, o acionamento deveria ser feito por solenóide. Para tanto, deveria ser selecionado um equipamento adequado às severas condições de trabalho.

Além disso, deveria ser instalado o sistema elétrico, envolvendo a ligação com a bateria e o interruptor, como pode ser visto no esquema a seguir.

O acionamento deveria contar com um sistema de retorno do overdrive à posição desligada. Este sistema seria formado por uma mola, e entraria em ação também em caso de uma pane do sistema elétrico.

Como visto anteriormente, o overdrive não poderá ser acionado simultaneamente com a 4X4, pois isso acarretaria em uma diferença de rotação entre as rodas dianteiras e as traseiras.

Caso o overdrive possuísse um acionamento elétrico, uma possível solução seria a instalação de um relê que fechasse o circuito apenas quando a 4X4 estivesse desengatada. Além disso, se a 4X4 fosse engatada acidentalmente com o overdrive acionado, este deveria ser desligado automaticamente. Como a 4X4 só é acionada com o veículo parado, o desligamento automático do overdrive não acarretaria problemas de diferença de rotação.

A 4X4 já possui um sistema elétrico que acende uma luz no painel quando está engatada. Utilizando-se o sinal deste circuito, foi desenvolvido o circuito elétrico abaixo (figura 15):

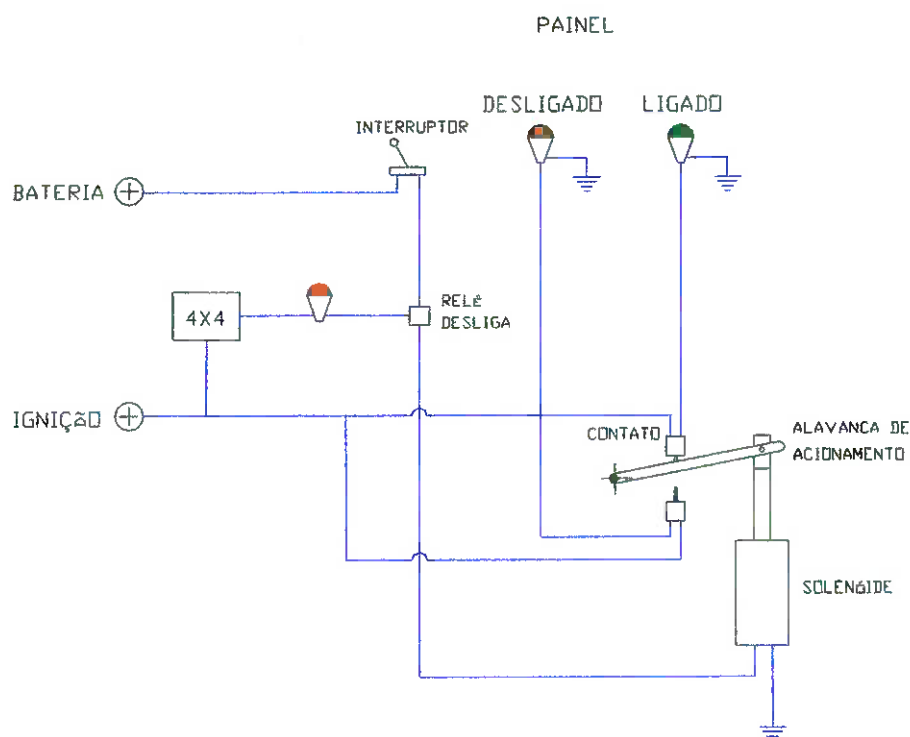


Figura 15

A alimentação para o solenóide provém diretamente da bateria, evitando o desacionamento do overdrive caso a chave de ignição seja desligada inadvertidamente com o veículo em movimento, causando possíveis danos à transmissão.

Deveria ser afixado no painel um aviso para que o overdrive seja desacionado quando o veículo fosse ficar parado e com o motor desligado por um longo tempo, ou com a chave de ignição desligada por um longo período. Esta medida tem como finalidade evitar o descarregamento da bateria, já que o

solenóide irá consumir corrente quando acionado. O motorista também deverá ser advertido que o interruptor do overdrive não deve ser mantido na posição ligado se o overdrive for automaticamente desligado com o acionamento da 4X4 pois o desligamento involuntário da chave de ignição acarretaria no “reacionamento” do overdrive de forma inadvertida.

Porém, verificou-se que a utilização do acionamento elétrico apresenta alguns problemas, que serão apresentados a seguir:

Utilizando-se um dinamômetro, verificou-se que a força de acionamento do sincronizado é de 16 Kgf. Portanto, a mola deveria proporcionar esta força para o retorno do sincronizado. O solenóide, então, teria que exercer uma força de no mínimo 32 Kgf.

Um outro problema é que quando o solenóide fica acionado por um longo tempo, a força de acionamento cai sensivelmente. Por isso, teria que ser utilizado um solenóide de grandes dimensões e elevado custo.

Consultando-se um catálogo da *Soletrafo*, verifica-se que teria que ser utilizado um solenóide de diâmetro 150mm e comprimento de mais de 200mm.

Verifica-se que mesmo utilizando dois solenóides trabalhando em sentidos opostos, com curtos períodos de acionamento, a solução se mostra inviável.

O Acionamento Mecânico

Devido à impossibilidade do acionamento elétrico, como visto anteriormente, utilizaremos um acionamento mecânico.

Para obter maior simplicidade e confiabilidade, o acionamento será feito através de cabo de aço.

Como o garfo do câmbio original tem dimensões desproporcionais ao overdrive, será construído um novo garfo, como pode ser observado nos desenhos de conjunto e fabricação.

3.6.4 Lubrificação

A lubrificação se dará como na caixa original, por banho de óleo e o nível de óleo se manterá na altura dos eixos, para garantir a lubrificação em todos os componentes.

O orifício para a colocação de óleo ficará na parte lateral da caixa. Este furo, medindo $\frac{3}{4}$ " (19mm), como na caixa original, deverá estar no nível do óleo, para que a medida do nível seja feita simplesmente retirando-se o parafuso. Esta é uma construção feita comumente em caixas de diferencial.

A colocação de óleo poderá ser feita através de um tubo, evitando-se que a caixa tenha de ser retirada do veículo. O óleo deverá ser colocado até comece a transbordar, indicando que o nível está correto.

Para a retirada do óleo, a caixa possuirá um orifício na parte inferior, também de diâmetro de $\frac{3}{4}$ ". Esta construção é favorável pois permite a retirada de óleo por gravidade, eliminado também impurezas que se acumulam no fundo da caixa, como borras ou partículas metálicas.

A rosca dos furos deverá ser usinado na própria caixa.

3.6.5 Fixação

A fixação do overdrive deve ser feita na caixa de transferência, por meio de parafusos, formando um conjunto rígido.

Para tanto, a caixa do overdrive terá uma flange de acoplamento, conforme a *figura 16*.

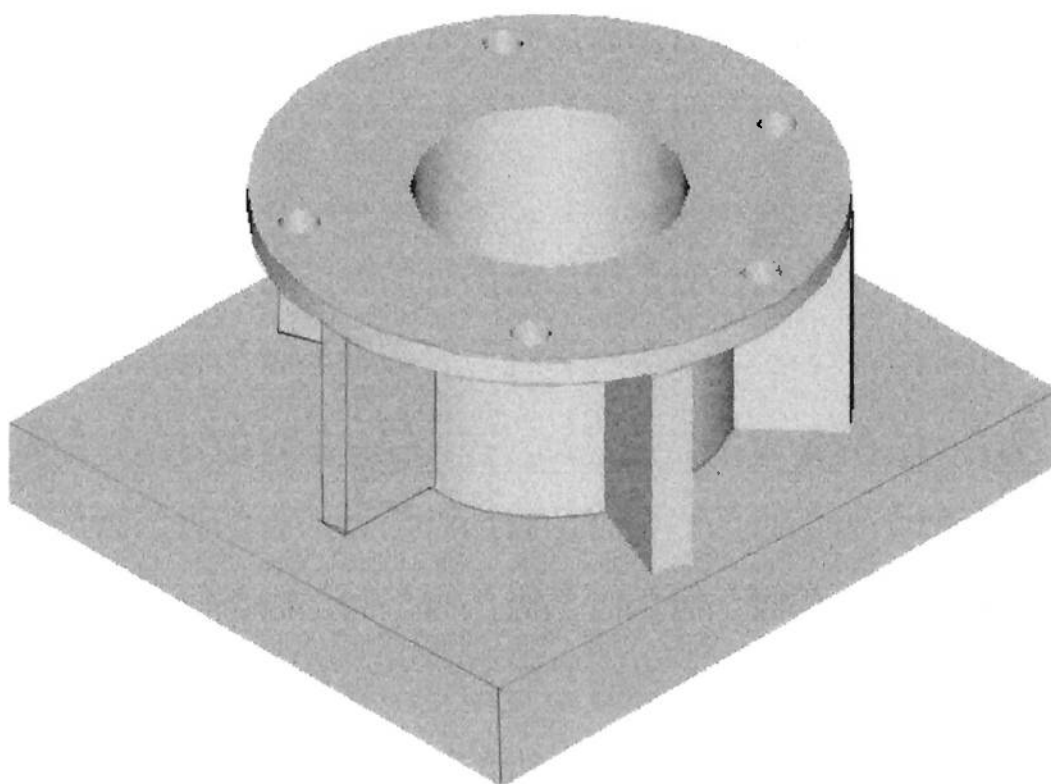


Figura 16

Esta flange deverá suportar o peso próprio da caixa e mais o torque aplicado.

Por ser uma peça crítica, será feito posteriormente um cálculo de verificação

Na *figura 17* pode ser observada a localização do overdrive na parte inferior do veículo.

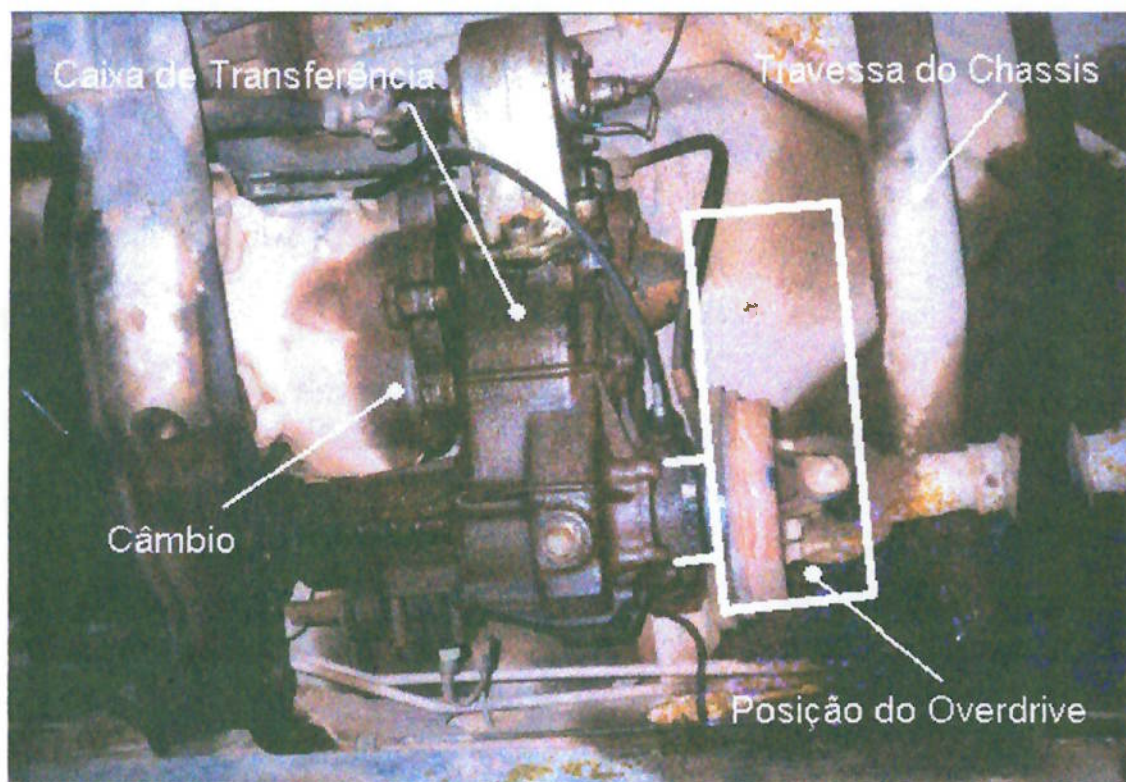


Figura 17

Para que o peso não seja suportado apenas pela flange, suportes com coxins de borracha podem ser fixados entre a parede da caixa e a travessa do chassi, destacado acima, como uma fixação adicional. Os coxins devem ser de borracha devido a um pequeno movimento relativo entre o conjunto motor-câmbio e o chassi.

3.6.6 Rolamentos

Serão utilizados os rolamentos originais, pois foram dimensionados em conjunto com o câmbio original, e portanto não haverá problemas de subdimensionamento. Soma-se a isso o fato de que o overdrive é um

equipamento de menores dimensões e estará sujeito a cargas muito menores do que o câmbio original.

Conforme pode ser observado na *figura 18*, os rolamentos 1 e 2 utilizarão suas próprias tampas de fixação originais.

Para o rolamento 3 será construída uma nova tampa, pois no projeto original é utilizado um anel elástico instalado na própria caixa para sua fixação. A fabricação do rasgo deste anel é de difícil construção, pois é usinado na própria caixa, e por isso não indicado para este projeto.

Existe também um rolamento entre o eixo piloto e o eixo de saída. Este rolamento original será mantido.

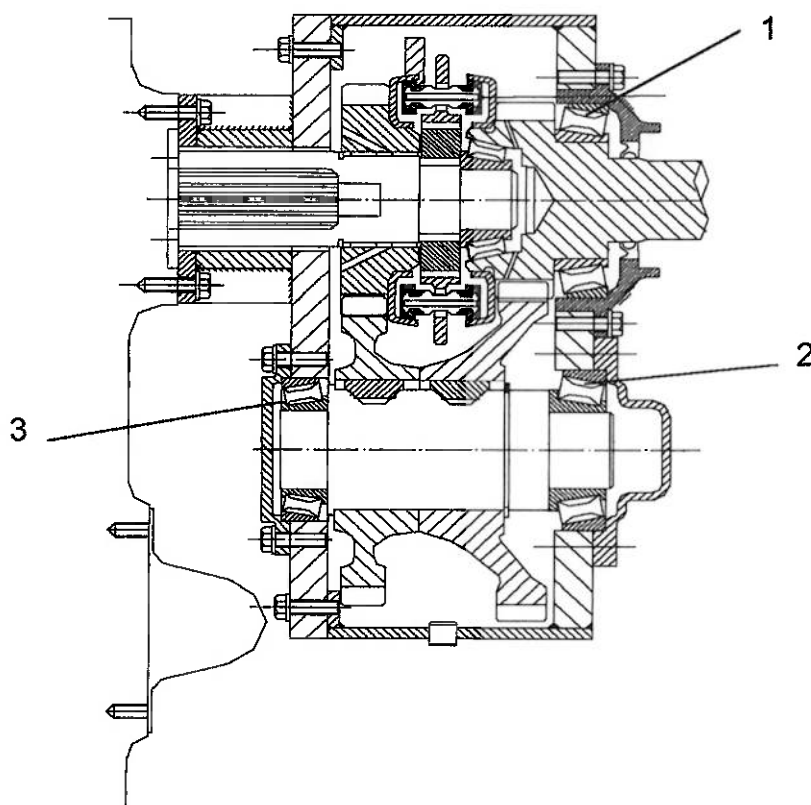


Figura 18

3.6.7 Vedação

Por ter a caixa soldada, há poucos pontos que necessitam de vedação.

A entrada do overdrive será, como visto anteriormente, fixada à caixa de redução por parafusos. Na interface entre as duas caixas deverá ser instalada uma junta de vedação.

Na saída do overdrive será utilizado um anel de vedação (tipo *o'ring*) que equipa o câmbio original.

Entre uma das tampas laterais e a caixa, a fixação será feita por parafusos, para permitir a montagem e desmontagem da caixa. Portanto deverá contar também com uma junta de vedação.

3.7 Cálculos

Para verificar a resistência aos esforços solicitantes, foi realizado um cálculo na seção da flange de fixação e na seção da caixa do overdrive. O cálculo foi realizado para verificar a resistência ao cisalhamento devido ao torque transmitido pela transmissão. O torque solicitante é de 1675 Nm, como demonstrado anteriormente, e as seções transversais podem ser observadas a seguir nas *figuras 19 e 20*. As tensões geradas devido ao momento fletor nos eixos não serão consideradas pois já são resistidos pelos eixos originais. O momento fletor na caixa também não será considerado devido ao pequeno comprimento dos eixos e portanto da caixa.

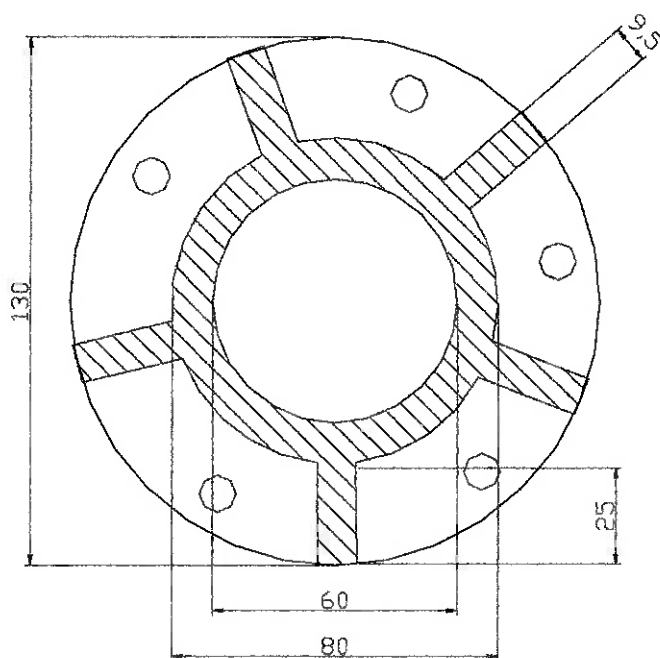


Figura 19: Seção transversal da flange

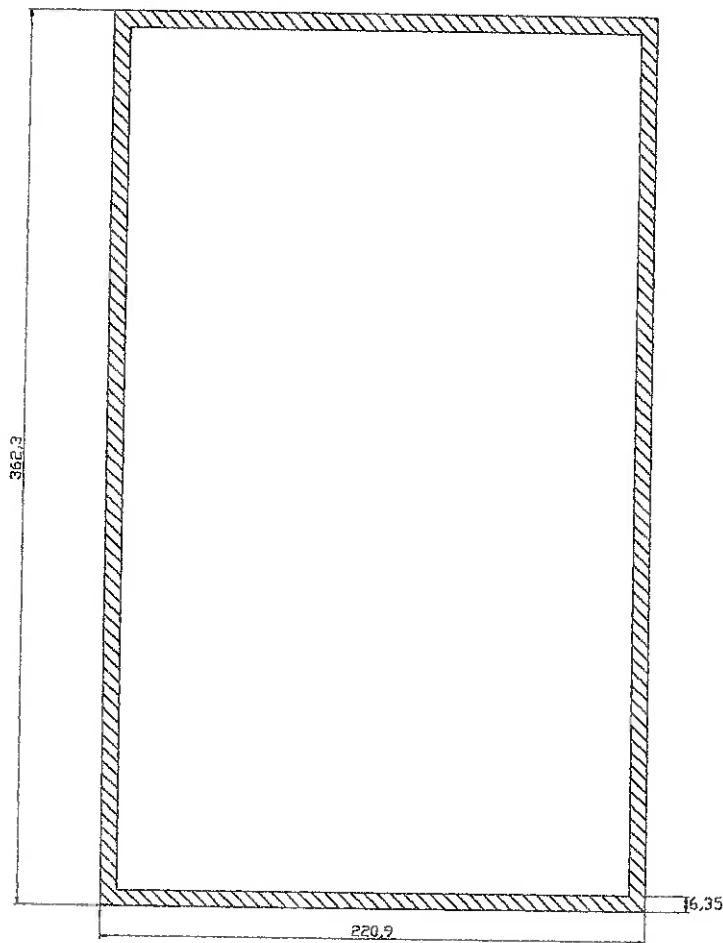


Figura 20: Seção transversal da caixa

3.7.1 Cálculo da Flange

A tensão de cisalhamento numa seção transversal submetida ao momento torsor pode ser dada por:

$$\tau = \frac{M_t}{W_t}$$

Onde M_t : Momento torsor

W_t : Módulo de resistência à torção

Para uma seção circular,

$$W_t = \frac{I_p}{r_e}$$

onde I_p : Momento de inércia polar

r_e : Raio externo da seção circular

Para efeito de cálculo, a seção transversal da flange será representada por uma seção circular.

O momento de inércia obtido através do AutoCAD é:

$$I_p = 6,0999 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$r_e = 0,065 \text{ m}$, como pode ser observado na *figura 19*.

Como resultado temos $\tau_{\text{solic.}} = 17,84 \text{ MPa}$.

A tensão de escoamento para o aço 1020 é de 324 MPa para tensões normais.

Utilizando-se o círculo de Mohr, verifica-se que:

$$\tau_{\text{max}} = \frac{\sigma_{\text{max}}}{2}$$

Portanto, $\tau_{\text{max}} = 162 \text{ MPa}$.

Verifica-se que obtivemos um coeficiente de segurança 9,1.

3.7.2 Cálculo da Caixa

Como no cálculo da flange, utilizamos a equação:

$$\tau = \frac{M_t}{W_t}$$

Onde M_t : Momento torsor

W_t : Módulo de resistência à torção

Para uma seção transversal retangular maciça,

$$W_t = h \cdot \frac{L^2 (1 + 0,435n)}{3 (1 + 1,3n)}$$

onde: $n = L / h$

L: Comprimento da Caixa

h: Altura da Caixa

Como a caixa possui uma seção transversal vazada, pode-se subtrair uma seção maciça interna da externa, obtendo-se o resultado desejado.

Obtivemos assim $W_t = 5,75 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$.

Consequentemente, $\tau = 2,92 \text{ MPa}$.

De maneira similar ao cálculo da flange, obtem-se um coeficiente de segurança de 55,5.

4. Conclusões

Verificou-se que foram encontradas inúmeras soluções para a otimização da transmissão do veículo, cada qual com muitas variações, dentre as quais procurou-se selecionar a melhor opção.

Para tanto foram utilizadas as matrizes de decisão, que levam em conta todos os aspectos importantes para a seleção, atribuindo um coeficiente para diferenciar a importância de cada um.

Com isso, espera-se que a solução implementada seja a melhor possível.

Apesar de ter sido utilizada esta técnica, verificou-se que uma das características da solução escolhida, o acionamento elétrico, acabou se mostrando inviável após um estudo mais aprofundado, sendo substituído pelo acionamento mecânico. Porém não foi encontrado mais nenhum obstáculo que inviabilizasse o projeto.

Foi construído então um protótipo para identificar possíveis dificuldades na fabricação ou na montagem.

A caixa, a tampa do rolamento, a flange e os eixos foram fabricados em madeira para diminuir os custos e o tempo de fabricação. O garfo e seu eixo foram construídos em aço 1020. Na *figura 21* pode ser observada uma foto do protótipo.



Figura 21

Apesar de não ser possível utilizar este protótipo no veículo, por ter peças de madeira, verificou-se que ele pode ser construído e montado facilmente.

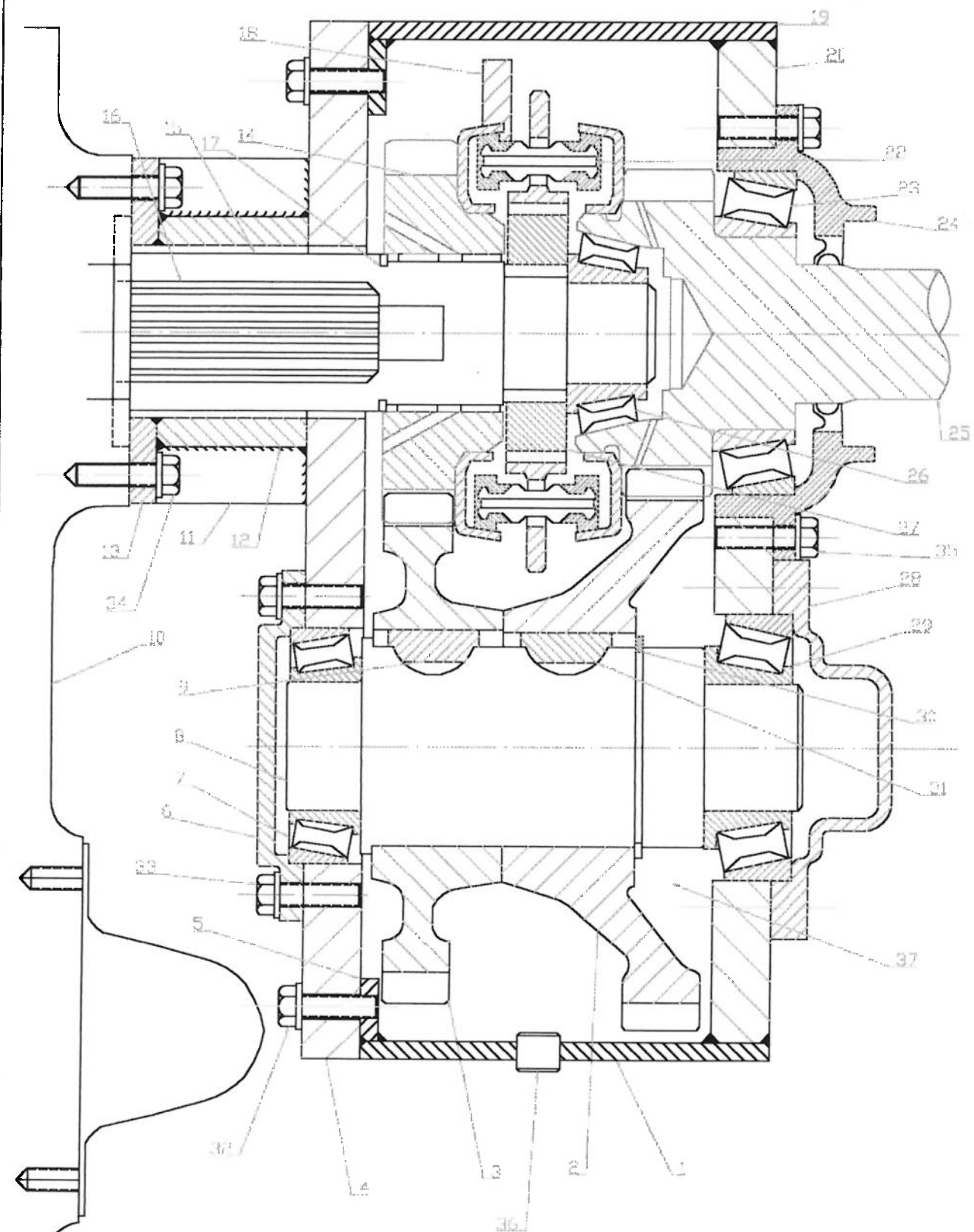
Referências Bibliográficas

JUVINALL, R.C.; MARSHEK, K.M. **Fundamentals of machine component design**. 2. ed. New York, John Wiley and Sons, 1991.

CROUSE, W.H. **Automotive transmissions and power trains, construction, operation and maintenance**. 2. ed. New York, McGraw-Hill, 1959.

ANEXOS

DESENHOS DE CONJUNTO E FABRICAÇÃO



OVERDRIVE - TOYOTA

Escala 1:2

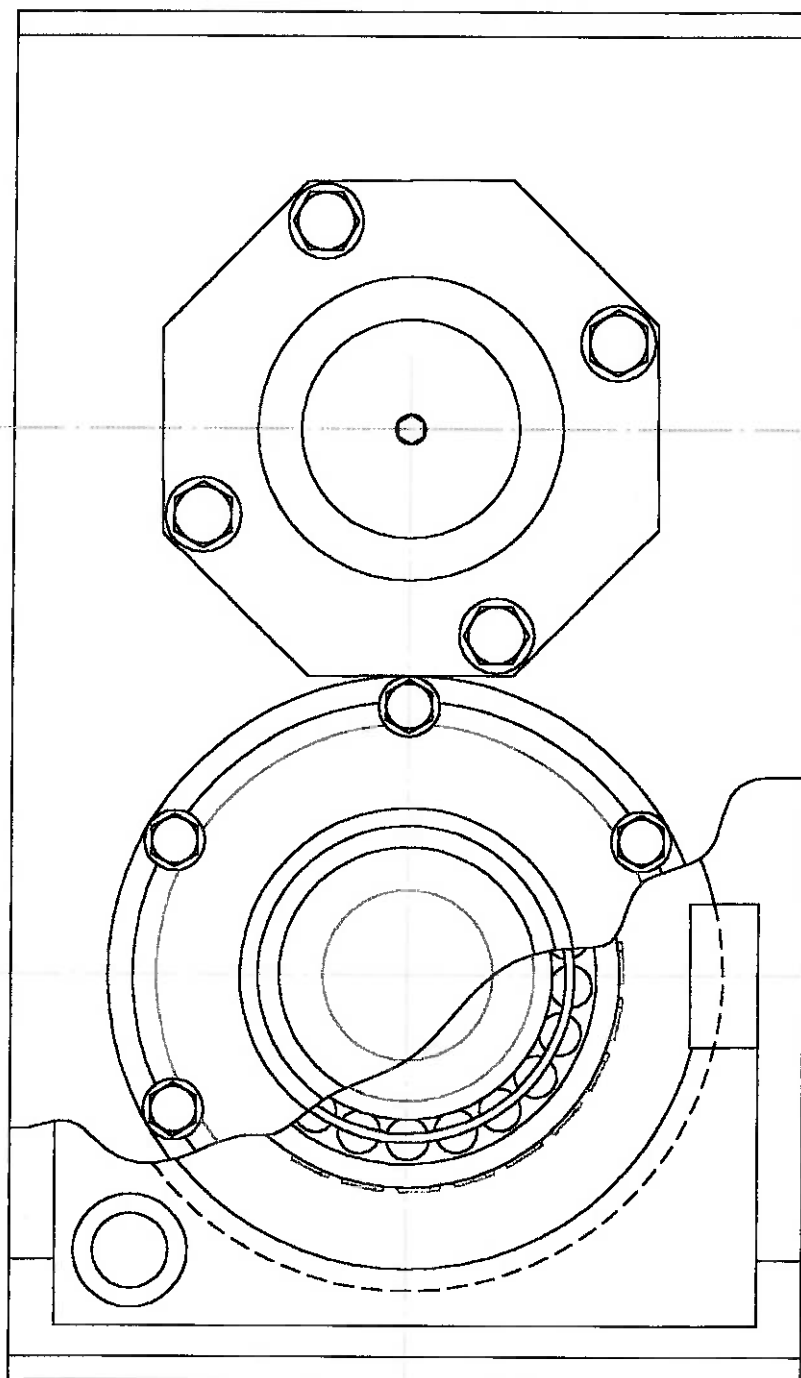
Desenho de Conjunto

(Lista de peças anexa)

37	2	Tampas superior e inferior	AQJ 1020	
36	2	Dujão de óleo 3/4"		
35	6	Parafuso M6 x 30		
34	5	Parafuso M8 x 30		
33	4	Parafuso M8 x 30		
32	8	Parafuso M8 x 25		
31	1	Chaveta		Peça do câmbio EATON
30	1	Anel elástico		Peça do câmbio EATON
29	1	Rolamento		Peça do câmbio EATON
28	1	Tampa do rolamento	AQJ 1020	Conforme desenho de fabricação
27	1	Enlaidado		Peça do câmbio EATON
26	1	Rolamento		Peça do câmbio EATON
25	1	Lixa de caixa		Peça do câmbio EATON
24	1	Tampa do rolamento	AQJ 1020	Conforme desenho de fabricação
23	1	Rolamento		Peça do câmbio EATON
22	1	Conjunto do sincronizador		Peça do câmbio EATON
21	1	Lixa de garfo	AQJ 1020	Conforme desenho de fabricação
20	1	Tampa lateral	AQJ 1020	Conforme desenho de fabricação
19	1	Tampa lateral	AQJ 1020	Conforme desenho de fabricação
18	1	Garfo	AQJ 1020	Conforme desenho de fabricação
17	1	Anel elástico		Peça do câmbio EATON
16	1	Eixo		Eixo do veículo
15	1	Eixo piloto		Peça do câmbio EATON
14	1	Engrenagem		Peça do câmbio EATON
13	1	Tampa da flange	AQJ 1045	Conforme desenho de fabricação
12	1	Tubo da flange	AQJ 1045	Conforme desenho de fabricação
11	1	Abra da flange	AQJ 1045	Conforme desenho de fabricação
10	1	Caixa 4X4		Peça do autorôvel
9	1	Chaveta		Peça do câmbio EATON
8	1	Eixo secundário	AQJ 1045	Conforme desenho de fabricação
7	1	Rolamento		Peça do câmbio EATON
6	1	Tampa do rolamento	AQJ 1020	Conforme desenho de fabricação
5	1	Abra	AQJ 1020	Conforme desenho de fabricação
4	1	Tampa lado acoplamento	AQJ 1020	Conforme desenho de fabricação
3	1	Engrenagem		Peça do câmbio EATON
2	1	Engrenagem		Peça do câmbio EATON
1	1	Tampa lateral	AQJ 1020	Conforme desenho de fabricação
P. S.	Q. T. D.	DE NOMINAÇÃO	MATERIAL	COMENTÁRIOS

OVERDRIVE - TOYOTA

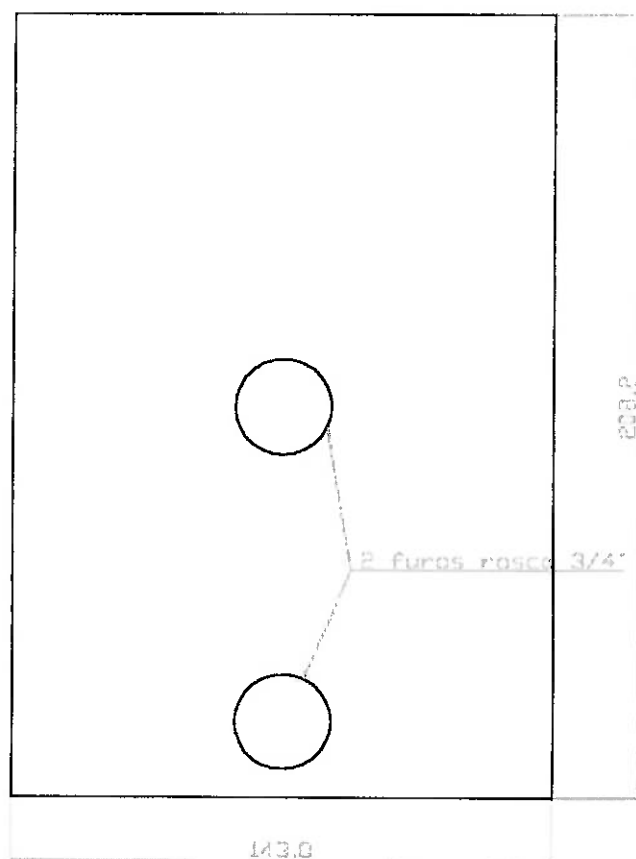
Lista de peças



OVERDRIVE - TOYOTA

Escala 1:2

Vista lateral c/ corte - Lado cardã



Espessura 1/4"

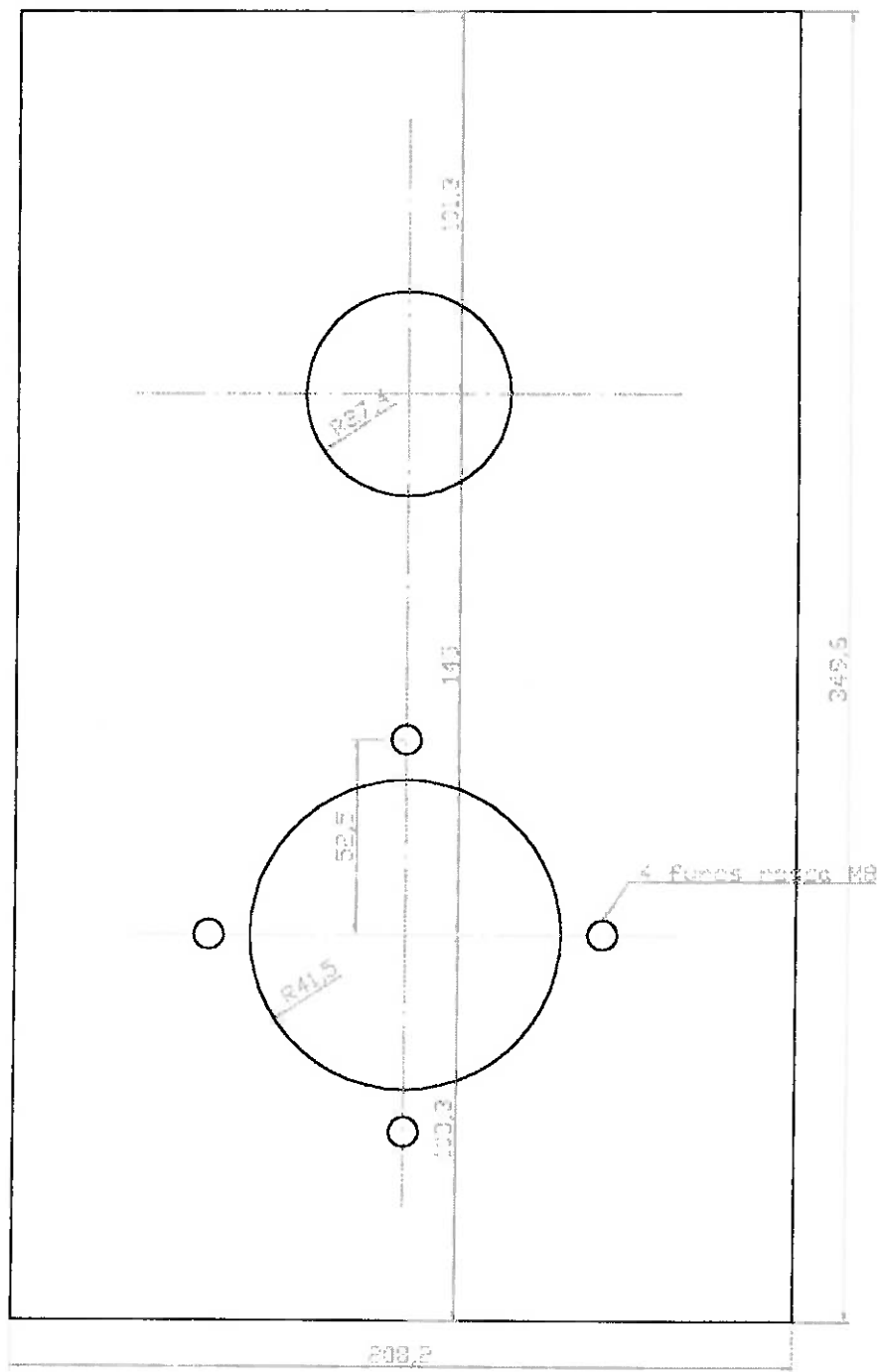
MATERIAL
AÇO 1020

OVERDRIVE - TOYOTA

Escala 1:2

Tampa lateral

Qtd.	Nº
1	1



MATERIAL
AÇO 1020

OVERDRIVE - TOYOTA

Escala 1:2

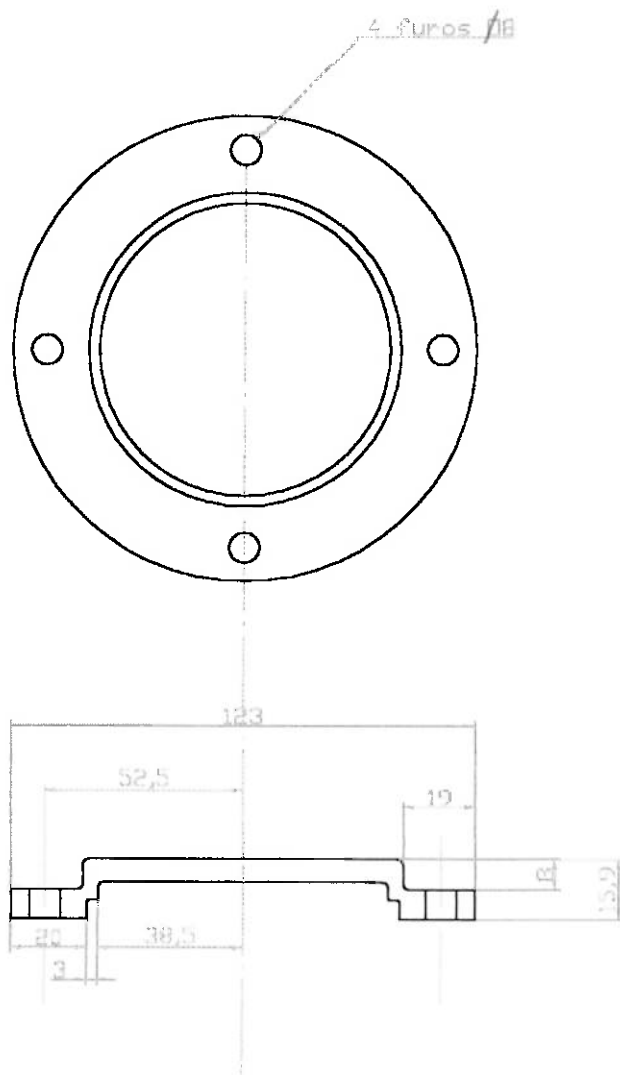
Tampa lado acoplamento

Qtd.

1

Nº

4



MATERIAL
AÇO 1020

OVERDRIVE - TOYOTA

Escala 1:2

Tampa do rolamento

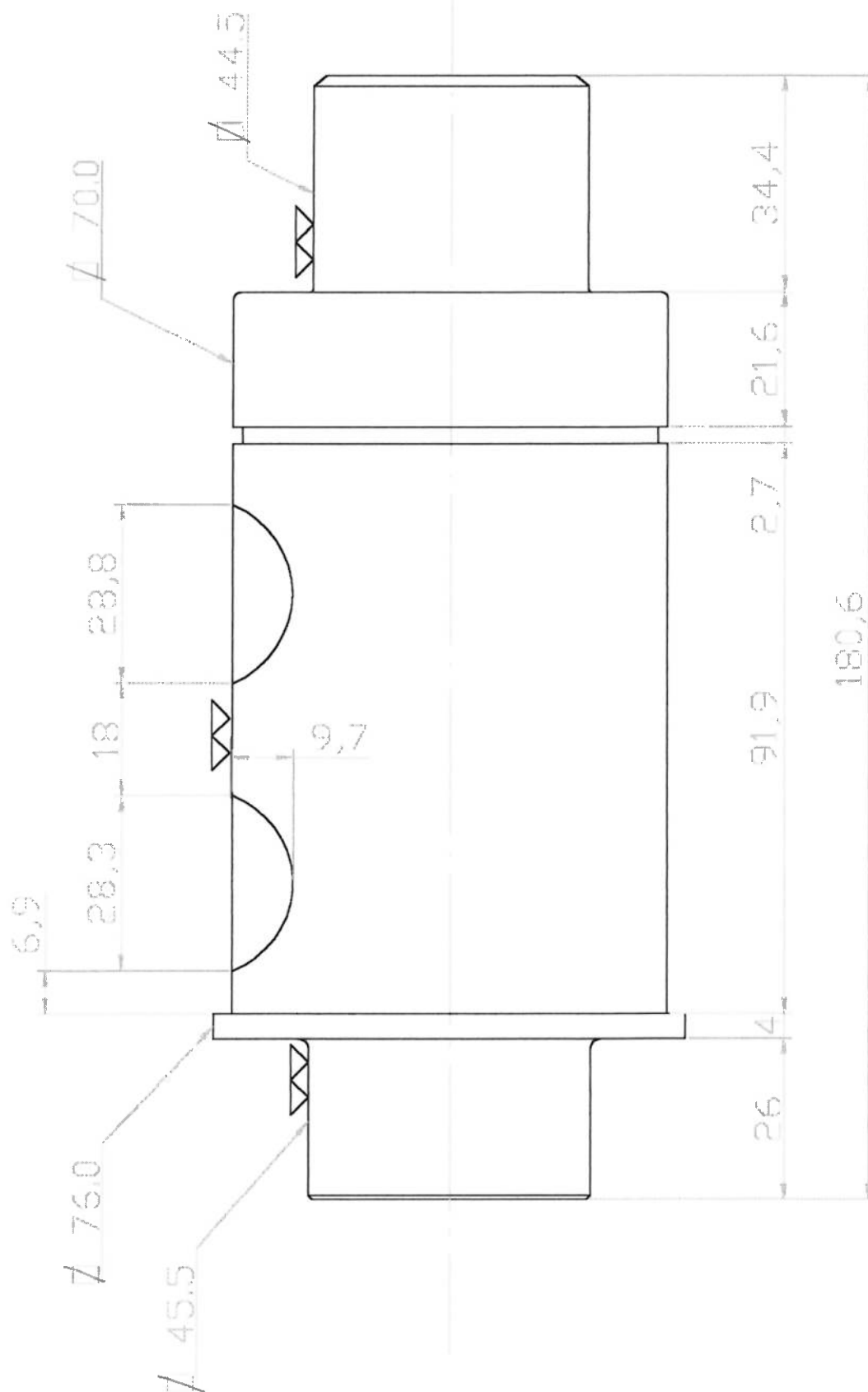
Qtd.

1

Nº

6

Largura do rasgo de
chaveta: 10mm



MATERIAL
AÇO 1045

OVERDRIVE - TOYOTA

Escala 1:1

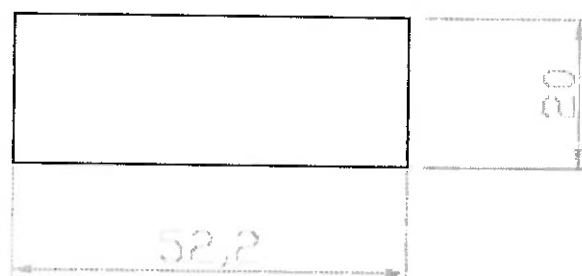
Eixo secundário

Qtd.

1

Nº

8



MATERIAL

AÇO 1045

OVERDRIVE - TOYOTA

Abas da flange

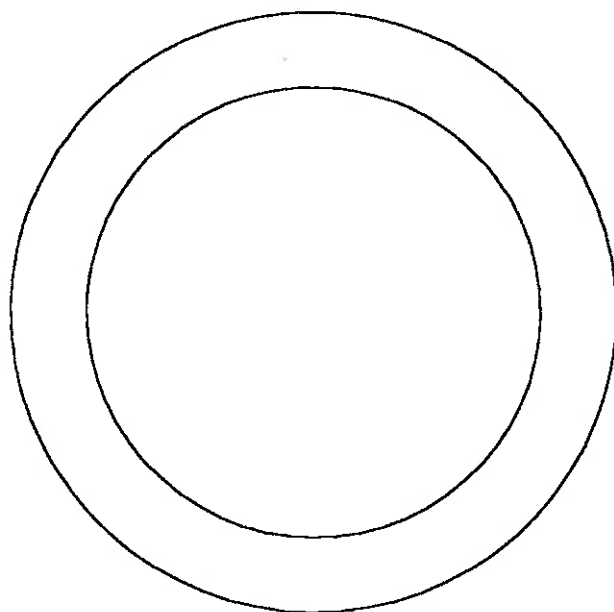
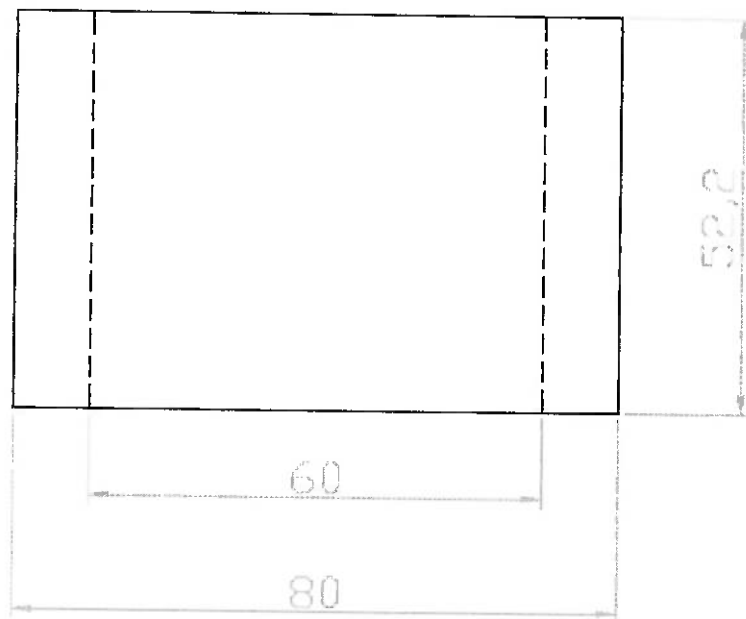
Escala 1:1

Qtd.

5

Nº

11



MATERIAL
AÇO 1045

OVERDRIVE - TOYOTA

Escala 1:1

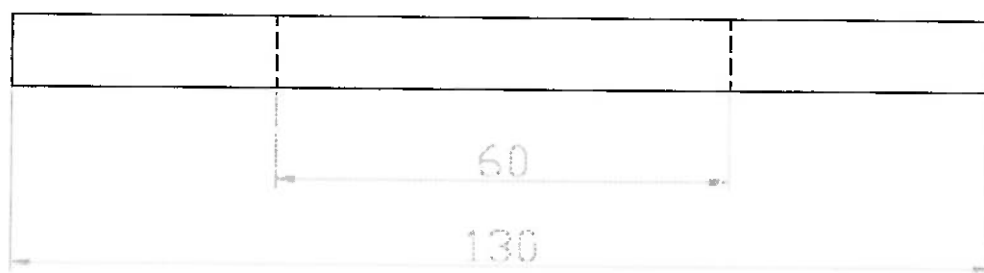
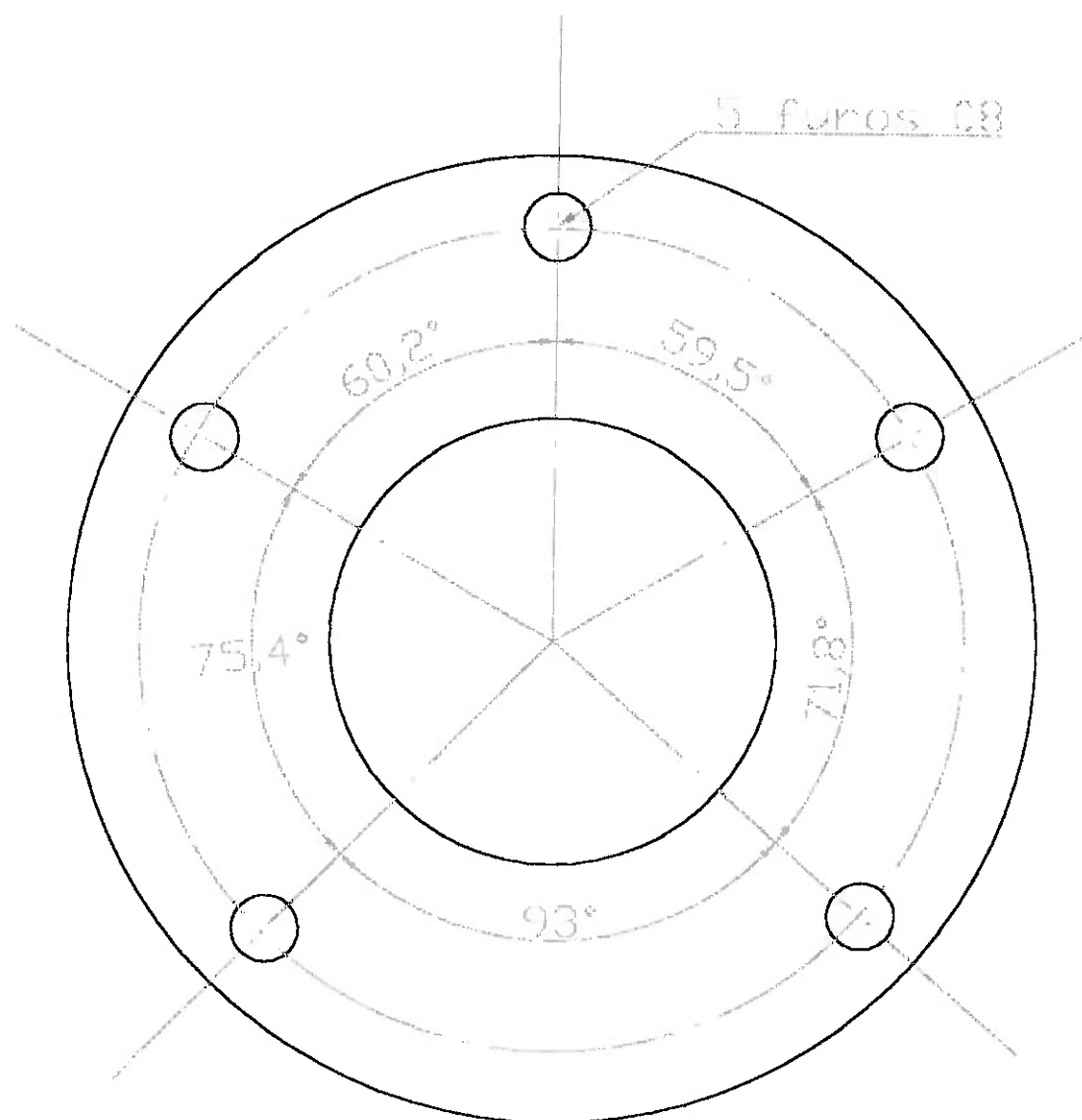
Tubo da Flange

Qtd.

1

Nº

12



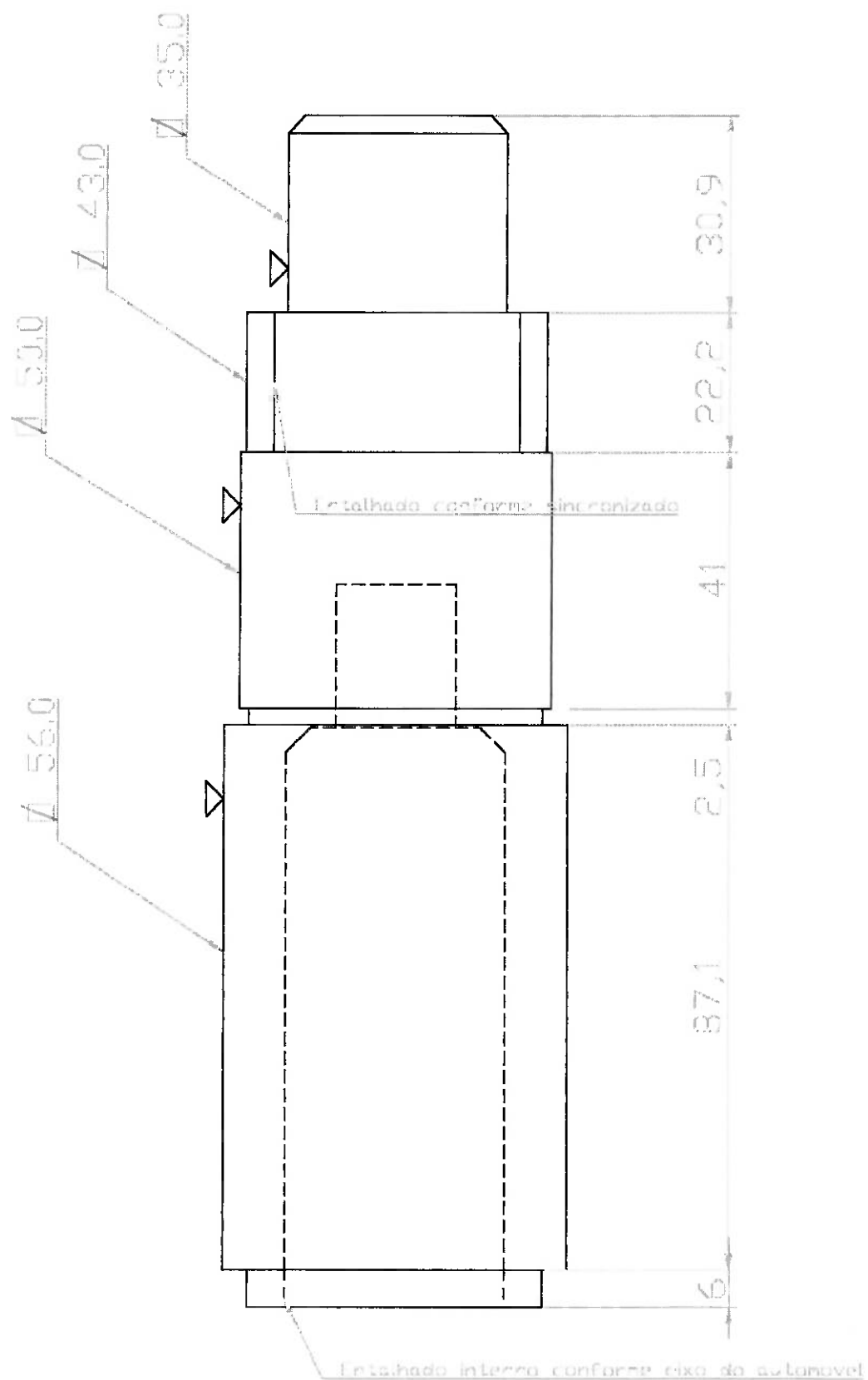
MATERIAL
AÇO 1045

OVERDRIVE - TOYOTA

Escala 1:1

Flange do acoplamento

Qtd. 1 Nº 13



MATERIAL
AÇO 1045

OVERDRIVE - TOYOTA

Escala 1:1

Eixo piloto

Qtd.

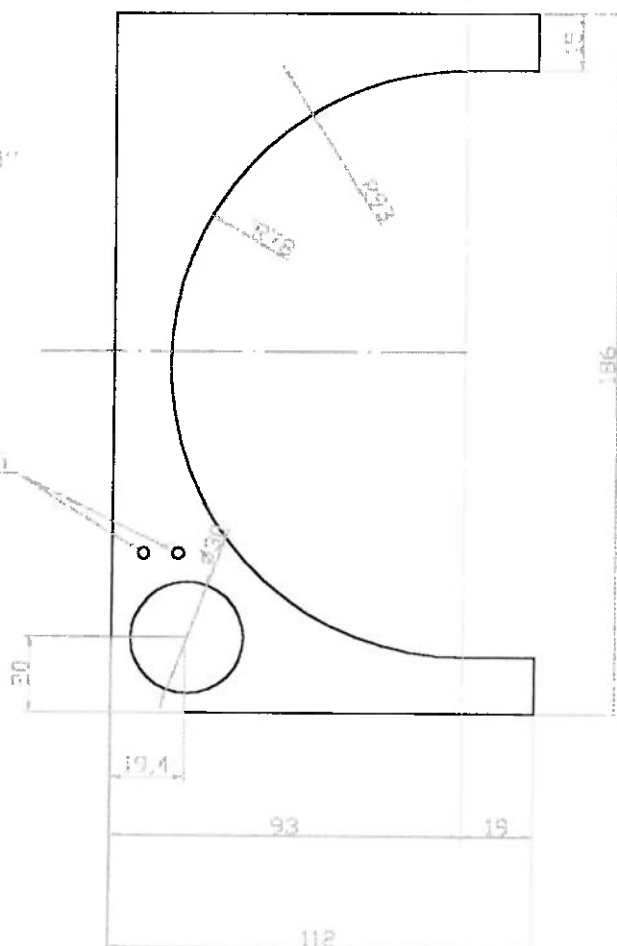
1

Nº

15

Espessura 3/8"

2 Furos $\varnothing 1,3$



MATERIAL

AÇO 1020

OVERDRIVE - TOYOTA

Garfo

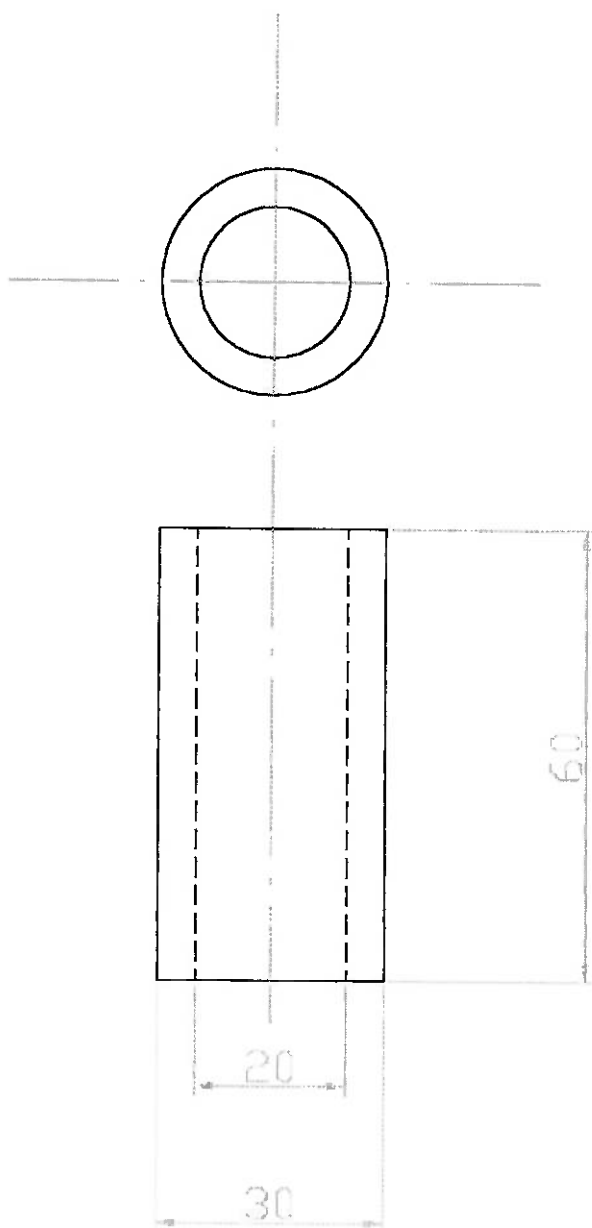
Escala 1:2

Qtd.

1

Nº

18-a



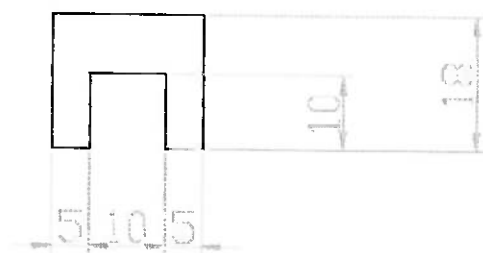
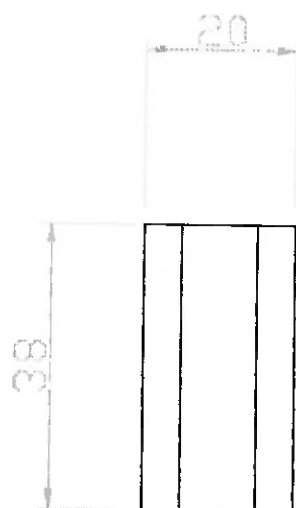
MATERIAL
AÇO 1020

OVERDRIVE - TOYOTA

Escala 1:1

Guia do garfo

Qtd. 2 Nº 18-b



MATERIAL
AÇO 1020

OVERDRIVE - TOYOTA

Escala 1:1

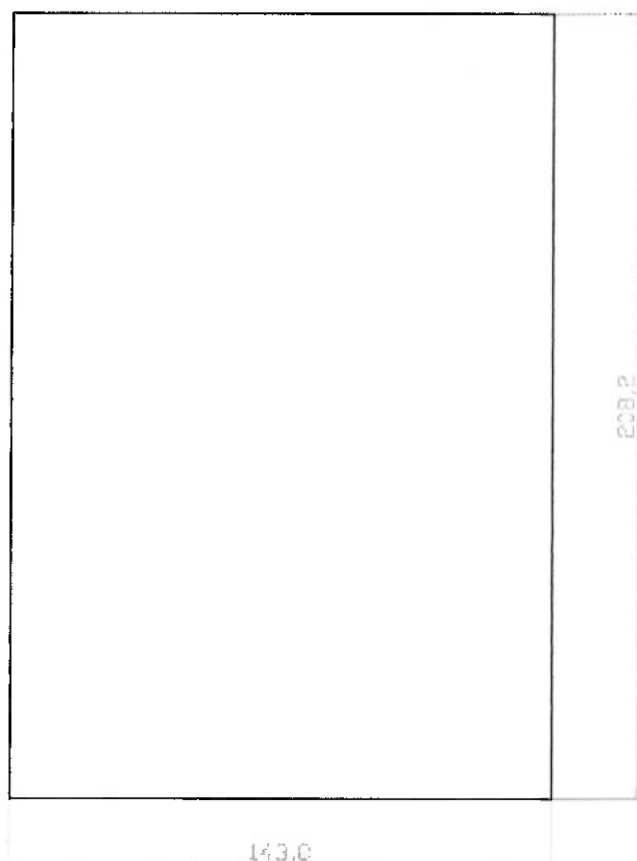
Guia do sincronizador

Qtd.

2

Nº

18-C



Espessura: 1/4"

MATERIAL

AÇO 1020

OVERDRIVE - TOYOTA

Tampa lateral

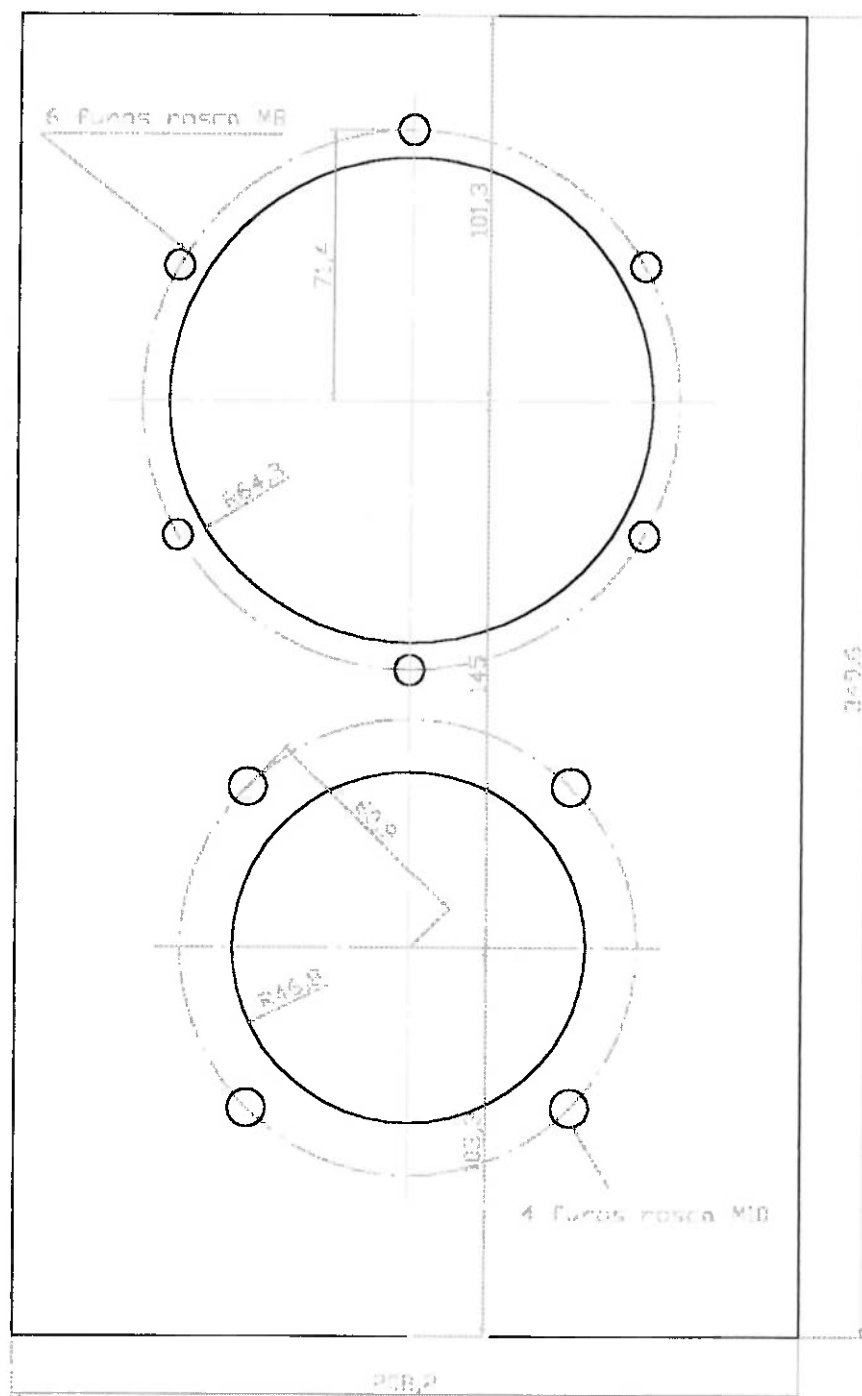
Escala 1:2

Qtd.

1

Nº

19



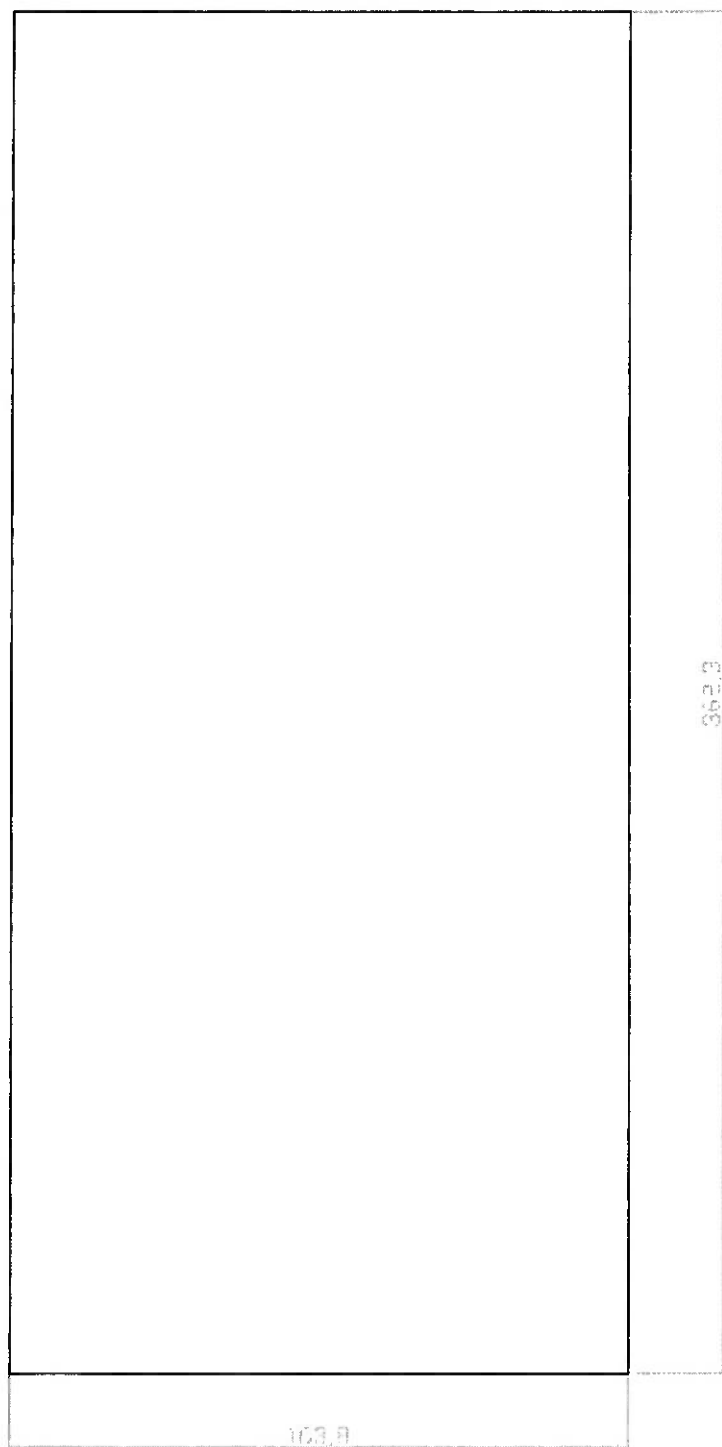
MATERIAL
AÇO 1020

OVERDRIVE - TOYOTA

Tampa lado cardã

Escala 1:2

Qtd. 1 N° 20



Escessura: 1/4"

MATERIAL
AÇO 1020

OVERDRIVE - TOYOTA

Escala 1:2

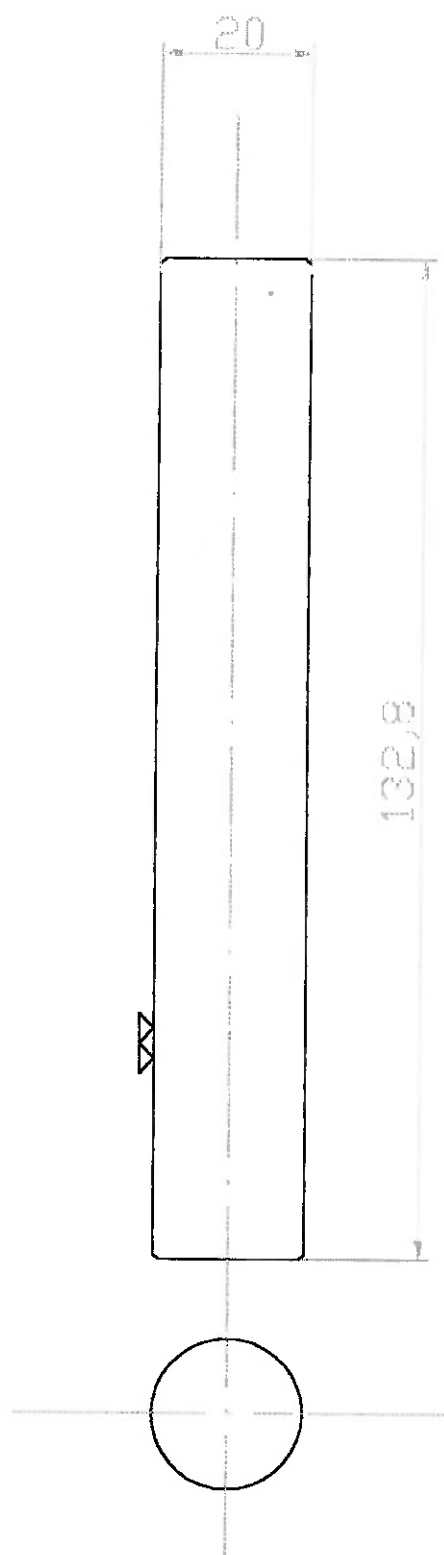
Tampas superior e inferior

Qtd.

1

Nº

37



MATERIAL
AÇO 1020

OVERDRIVE - TOYOTA

Escala 1:1

Eixo do garfo

Qtd.

1

Nº

21