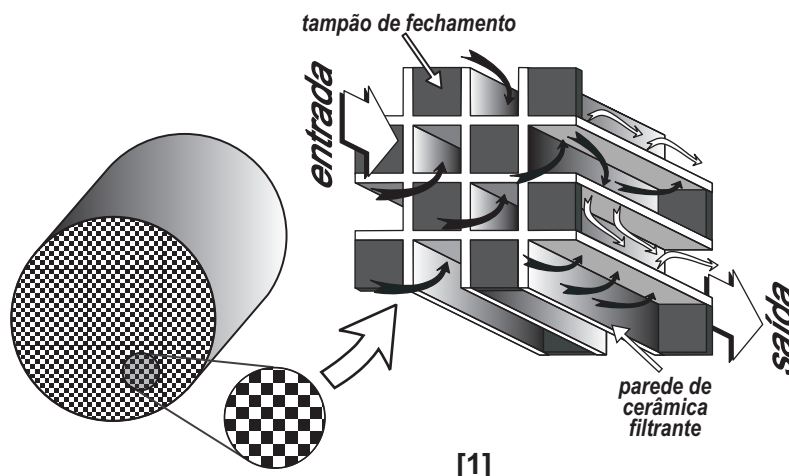


Este dispositivo, utilizado no sistema de pós-tratamento diesel, tem por objetivo a eliminação ou redução do material particulado presente nos gases de escape. Em operação, as partículas são separadas dos gases de escape utilizando filtros de cerâmica porosa. Como mostra a figura [1], estes filtros apresentam uma grande quantidade de canais com paredes de 0,3 a 0,4 mm de espessura e 15 a 50 canais por cm². Os canais adjacentes estão fechados (por tampões) em extremos opostos. Os gases devem atravessar as paredes porosas onde ficam retidas as partículas. Os filtros conseguem reter partículas entre 0,01 e 0,1 mm de diâmetro as que devem ser eliminadas já que o seu acúmulo provoca o entupimento do filtro. Portanto, é necessário, periodicamente, elevar a temperatura interna do filtro com o objetivo de provocar a combustão das partículas retidas. O processo de regeneração pode ser automático, iniciado pelo próprio sistema ou estacionário, comandado através do equipamento de teste ("scanner"), com o veículo parado.



REGENERAÇÃO

As tecnologias de regeneração atualmente utilizadas se enquadram em uma das seguintes categorias:

- ▶ *Aumento da temperatura dos gases de escape comandado pela UC através do mecanismo de pós-injeção na câmara de combustão ou no coletor de escape.*
- ▶ *Filtro de particulado catalisado. O agente catalisador está incorporado nas paredes do filtro.*
- ▶ *Filtro de particulado de regeneração contínua. Um catalisador oxidante está associado ao filtro.*
- ▶ *Combustível catalisado. O agente catalisador é adicionado, como aditivo, ao combustível.*

O processo de regeneração pode ser **automático** - comandado de forma autônoma pela UC do motor - ou **estacionário** - sob solicitação do operador, com o veículo parado.

REGENERAÇÃO AUTOMÁTICA

Os filtros têm uma capacidade limitada de acumular particulado pelo que todos os sistemas implementam mecanismos de limpeza dos mesmos, de forma periódica ou contínua, para evitar o entupimento. Um filtro demasiadamente carregado de partículas pode provocar danos ao motor, em função de contrapressão excessiva, ou até, ser, ele próprio danificado.

O processo de eliminação do particulado denomina-se "**regeneração do filtro**" e consiste na oxidação ou combustão das partículas de carbono [C] e de hidrocarbonetos [HC] adsorvido nas mesmas.

Como será analisado adiante, no caso da regeneração não-contínua, a mesma deve ser realizada antes que o filtro atinja a "**carga crítica**", a qual se caracteriza por aquela quantidade máxima de partículas armazenadas, que se ultrapassada, pode provocar um aumento descontrolado da temperatura interna do filtro, podendo atingir 1000°C ou mais, o que resultará na sua degradação ou destruição. Com a tecnologia atual, a temperatura máxima na entrada do filtro não deve superar 650°C.

Em função do material utilizado, a carga crítica pode estar entre 5 a 10 gr de particulado por litro de volume do filtro.

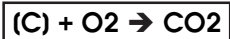
Portanto, o monitoramento da contrapressão no escape, através de um sensor de pressão na entrada do filtro é de fundamental importância para o correto funcionamento. Também, pode ser utilizado um sensor de pressão diferencial que monitora a diferença de pressão entre a de entrada do filtro e a de saída.

CAPÍTULO 16 - Filtro de Particulado

Existem dois métodos básicos de regeneração para a remoção das partículas:

1. **Combustão com oxigênio (O₂)**. Para a regeneração é utilizado o oxigênio presente nos gases de escape diesel que é resultante da combustão de mistura pobre.

Requer que a temperatura dos gases, na entrada do filtro, seja da ordem de 550°C a 650°C ou de 400°C quando utilizado um agente catalisador no combustível (combustível catalisado).



2. **Combustão com dióxido de nitrogênio (NO₂)**. A temperatura de combustão diminui para 250°C, aproximadamente. O NO₂ deve ser gerado a partir do NO presente nos óxidos de nitrogênio (NO_x) dos gases de escape. A composição do NO_x é de, aproximadamente, 10% de NO₂ e 90% de NO.



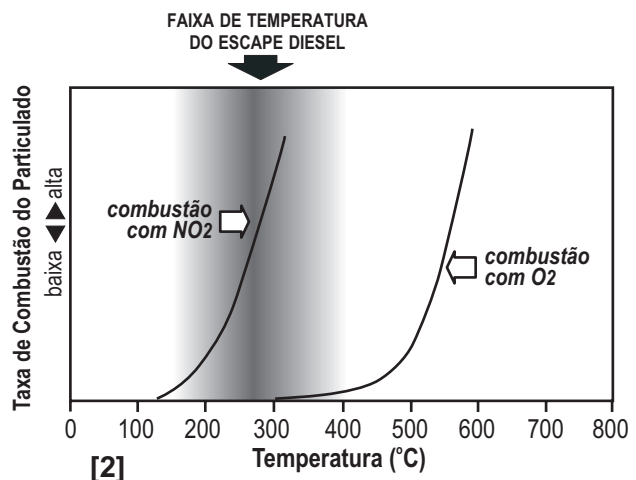
Como mencionado acima, espontaneamente, sem o auxílio de nenhum outro mecanismo de ativação, a oxidação (combustão) do carbono [C] com o excesso de O₂ presente nos gases de escape diesel, resultado do funcionamento com mistura pobre, acontece em torno de 550°C ou 600°C.

Tais temperaturas são difíceis de serem atingidas em funcionamento normal já que estão fora da faixa, como mostra a figura [2].

Assim, foi necessário desenvolver sistemas de pós-tratamento que permitam regenerar o filtro de forma previsível.

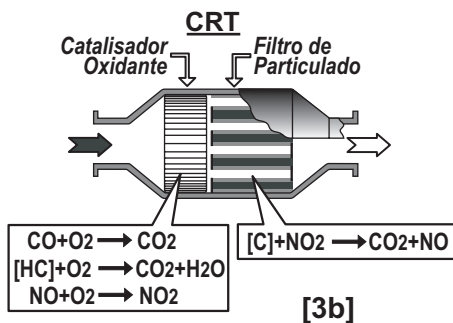
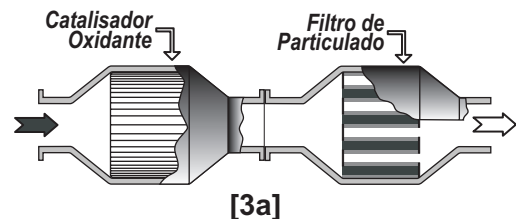


Um fator importante a ser considerado com relação à regeneração, é a temperatura dos gases de escape na entrada do filtro de particulado. Esta pode variar bastante em função do tipo de veículo (passeio, comercial leve ou pesado) e o regime de rotação (marcha lenta, carga parcial, plena carga). Observar também, que a presença de turboalimentação contribui para diminuir a temperatura dos gases na entrada do filtro de particulado. Em condições normais (carga parcial), a temperatura está na faixa de 150-350 °C. Em trânsito urbano, inferior a 300°C.



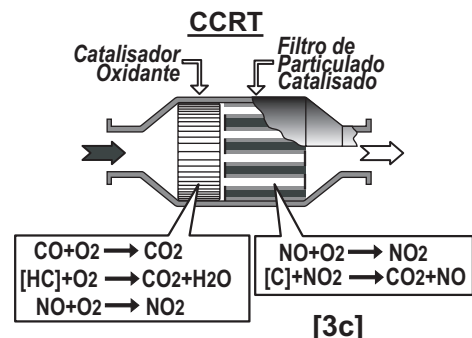
A figura [3] apresenta as configurações básicas de filtros de particulado:

- **Configuração inicial (fig.[3a]):** O catalisador oxidante converte o HC e CO em H₂O e CO₂. Também, converte o NO em NO₂ o que facilita a regeneração.



- **Segunda geração (Fig.[3b]): CRT (Continuously Regenerating Trap ou filtro de regeneração contínua).** O catalisador oxidante é integrado ao filtro de particulado e permite a regeneração contínua. Segundo o fabricante, e utilizando um processo patenteado, consegue reduzir HC, CO e particulado em 90%. O processo oxida o particulado na presença de NO₂, a uma temperatura inferior àquela requerida quando o oxigênio é o agente oxidante.

- **Terceira geração (Fig.[3c]): CCRT (Catalysed Continuously Regenerating Trap ou filtro catalisado de regeneração contínua).** É uma evolução da anterior incorporando agentes catalisadores na cerâmica do filtro o que permite que o NO gerado nele, seja re-oxidado, se transformando novamente em NO₂, e a seguir, reaja com mais partículas. Isto permite a regeneração contínua do filtro nos casos de temperatura muito baixa dos gases de escape ou de baixa proporção de NO_x com relação ao material particulado.



REGENERAÇÃO ATIVA e PASSIVA

Conceitualmente, os métodos de regeneração podem ser classificados em *regeneração passiva* e *regeneração ativa*.

■ Regeneração Passiva

Os sistemas passivos são aqueles capazes de auto-regenerar-se utilizando só os gases de escape. A regeneração passiva consiste em provocar a reação do **C** com dióxido de nitrogênio (**NO₂**) presente nos gases de escape resultantes da queima de mistura pobre.



Como mostra a figura [2], a oxidação ocorre, aproximadamente, a partir dos 250°C, o que se configura como fator positivo, já que é a temperatura dos gases de escape da maioria dos motores diesel, sob carga.

O dióxido de nitrogênio é mais efetivo que o oxigênio na combustão do particulado e isto a mais baixa temperatura. Mas, o **NO₂** deve ser gerado a partir do **NO**, que é aproximadamente, 90% do **NO_x** presente nos gases de escape diesel.

Portanto, para assegurar que o processo de regeneração seja contínuo, estes sistemas possuem um catalisador oxidante antes do filtro ou bem, incorporado ao mesmo, para garantir o **NO₂** necessário à combustão do particulado.

Lembrar que um efeito secundário no catalisador oxidante, na presença de excesso de oxigênio (funcionamento na condição de mistura pobre), é a oxidação do monóxido de nitrogênio (**NO**) formando dióxido de nitrogênio (**NO₂**). (ver item *Catalisador Oxidante* no capítulo 14)

Por sua vez, o catalisador oxidante contribui também, para converter o **CO** e o **HC** em **CO₂** e **H₂O**.

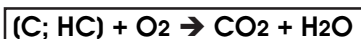
O monóxido de nitrogênio (**NO**) resultante do processo de regeneração, e o **NO₂** não utilizado na regeneração, passam, na seqüência, por um processo de redução num catalisador de **NO_x** (de armazenamento/redução ou SCR) que libera nitrogênio livre (**N₂**) no escapamento.

Para máxima eficiência, o combustível deve possuir baixo teor de enxofre e para garantir a regeneração contínua, a relação entre a massa de **NO₂** e a de particulado deve ser 8:1 ou superior.

O mecanismo de regeneração passiva é indicado para os casos em que há necessidade de implementar sistemas de pós-tratamento em projeto de motor já existente. Isto, em função de não requerer nenhuma modificação para ser integrado. Como será analisado adiante, os sistemas de regeneração ativa implicam na existência de um controle eletrônico que já deve ser previsto na fase de projeto. Os sistemas passivos só dependem do condicionamento de temperatura dos gases de escape.

■ Regeneração Ativa

Consiste em provocar a combustão do particulado (principalmente **C** com algo de **HC** adsorvido) com o **O₂** presente nos gases de escape.



Em princípio, a regeneração ativa é utilizada quando a temperatura dos gases não é a necessária para a combustão do particulado acumulado.

Durante o ciclo de regeneração ativa, caso não haja suficiente **O₂** no catalisador oxidante, pode verificar-se aumento nas emissões de **CO**.

Por outro lado, durante o ciclo de regeneração é desativada a re-circulação de gases de escape (EGR) podendo resultar no aumento das emissões de **NO_x**.

Os sistemas ativos requerem para seu funcionamento, de um controle eletrônico associado pelo que devem ser considerados já na fase de projeto do motor.

No entanto, ainda no caso da regeneração ativa, será desejável maximizar o uso da regeneração passiva quanto possível, já que esta última ao contrário da ativa, não requer energia adicional para sua ação.

Um exemplo disto é o filtro **CRT** (do inglês: **C**ontinuous **R**egenerating **T**rap ou filtro de regeneração contínua) utilizado, entre outros, em alguns motores diesel da Volkswagen. Assim que o volume de partículas retidas supera 30% da carga crítica, o filtro entra no processo de regeneração contínua que se interrompe assim que o volume cai por debaixo dos 20%. Para a regeneração, é utilizado **NO₂** produzido por um catalisador oxidante integrado no mesmo filtro pelo que a temperatura de combustão está em torno de 300°C. Para os regimes de funcionamento que não permitem atingir essa temperatura, a UC utiliza um mecanismo de regeneração ativa, como a pós-injeção de combustível, recurso este que será analisado a seguir.

Uma evolução do filtro **CRT** é o **CCRT** (do inglês: **C**atalysed **C**ontinuously **R**egenerating **T**rap ou filtro catalisado de regeneração contínua). É um filtro **CRT** ao qual é adicionado um catalisador oxidante (platina) nas paredes do filtro, abaixando ainda mais, a temperatura de combustão do particulado.

Nos sistemas ativos o processo de regeneração é controlado pela UC monitorando o aumento de contrapressão na entrada do filtro ou o diferencial entre a pressão de entrada e a pressão de saída.

CAPÍTULO 16 - Filtro de Particulado

Se assim não for, o filtro continuaria a armazenar material particulado até entupir, tornando o motor inoperante em curto espaço de tempo.

Os procedimentos de regeneração ativa consistem, basicamente, em:

- ▶ **Aumentar** a temperatura dos gases por alguns segundos ou minutos, até atingir 550°C.
- ▶ **Diminuir** a temperatura de auto-ignição das partículas para 450°C utilizando algum meio catalítico.



Praticamente todas as tecnologias de regeneração ativa pressupõem a existência de um catalisador oxidante antes ou no próprio filtro.

As tecnologias de regeneração atualmente utilizadas se servem de um destes mecanismos. São elas:

1. Controle da injeção para aumentar a temperatura dos gases de escape (pós-injeção).
2. Adição de um agente catalisador no combustível.
3. Aplicação de material catalisador diretamente sobre a cerâmica do filtro. São os *filtros catalisados*.



Ainda que pouco utilizado atualmente, existem aplicações em que a regeneração é obtida aquecendo eletricamente o filtro a aproximadamente, 800°C.

1. Pós-injeção. A maioria destas técnicas opera elevando a temperatura dos gases a aproximadamente, 550°C, condição em que o particulado entra rapidamente em combustão. Para isto, periodicamente, o conteúdo de **HC** dos gases de escape é aumentado com algum destes mecanismos:

- ▶ Com pós-injeção no motor
- ▶ Com pós-injeção diretamente no escapamento

A figura [4a] mostra a configuração básica de um sistema com regeneração ativa. A figura [4b] apresenta o gráfico do processo de regeneração ao longo de um período de 1200 segundos; com o eixo de temperatura à esquerda e o de pressão diferencial (contra-pressão) à direita.

0 - 200 seg

A temperatura no sistema está em torno dos 260°C e o diferencial de pressão em 0,08 bar.

200 - 400 seg

Combustível é injetado antes do catalisador ou a mistura é enriquecida com pós-injeção.

A temperatura antes do catalisador permanece no patamar anterior, mas, a temperatura após o catalisador e após o filtro sobe rapidamente, para 600°C.

O diferencial de pressão (contra-pressão) também aumenta em função do aumento do fluxo de gases provocado pela combustão no catalisador.

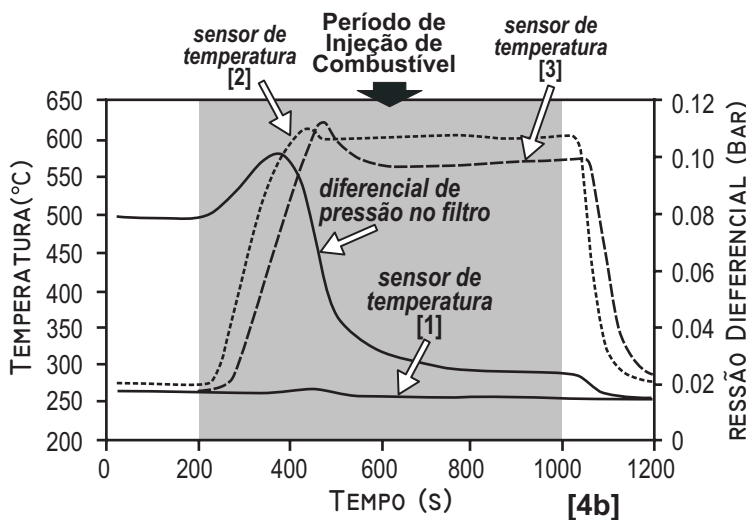
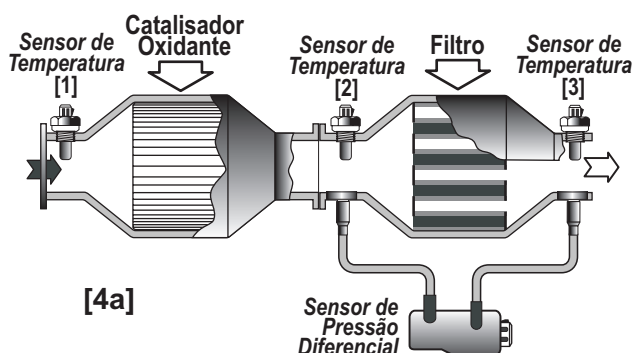
400 - 1000 seg

Quando a temperatura no filtro atinge 600°C, o particulado entra em combustão e é expelido na forma de gás. Com isto, a contra-pressão cai acentuadamente.

Após 1000 seg

Assim que a injeção extra é suprimida, a temperatura retorna ao nível de 260°C e o efeito de contra-pressão provocado pela combustão do particulado, cessa.

Como no caso da regeneração passiva, estes sistemas requerem um catalisador oxidante antes do filtro ou incorporado a ele, cujo objetivo é a combustão do combustível extra para elevar temperatura dos gases.



Os mecanismos utilizados para enriquecer os gases de escape são:

a) **Pós-injeção no motor.** O aumento da temperatura é obtido agindo sobre a fase de injeção. A injeção principal é atrasada e é introduzida uma pós-injeção já no ciclo de expansão. O combustível da pós-injeção pode queimar parcialmente na câmara e o resto no conversor ou só entrar em combustão no catalisador oxidante. Para uma descrição detalhada do mecanismo de pós-injeção, ver o *Capítulo 9*. O ciclo de regeneração dura entre 10 e 15 minutos e é ativado a intervalos de 300 a 800 km de rodagem em função da informação do sensor de contrapressão.

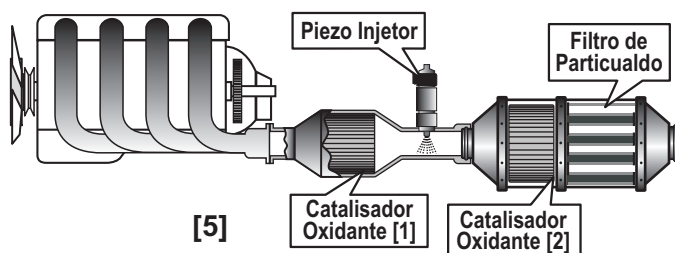
O filtro inicia automaticamente o processo de regeneração se o veículo roda a 130 km/h por alguns minutos evitando assim a necessidade da pós-injeção.

O filtro pode ainda, possuir uma camada de platina (filtro catalisado) que promove a diminuição da temperatura de oxidação das partículas.

b) **Pós-injeção no escapamento** antes filtro de particulado. Similar à pós-injeção no motor, este mecanismo tem a função de elevar a temperatura dos gases até a faixa de 550-600°C necessários à queima do particulado.

A figura [5] ilustra de forma simplificada, uma configuração utilizada pela Renault em veículos de passeio e comerciais leves.

Observar que não estão considerados nela, os sensores de temperatura e de pressão necessários ao gerenciamento do sistema e que estão presentes na implementação real.



O **catalisador oxidante [1]** converte o **CO** e **HC** durante o funcionamento normal. Na fase de regeneração do filtro, combustível extra é injetado através do piezo injetor.

Nesta condição, o **catalisador oxidante [2]** cumpre a função de queimar o combustível de pós-injeção promovendo o aumento da temperatura dos gases que entram no filtro.

A pós-injeção no escapamento tem a vantagem que pode ser implementada sem modificações no gerenciamento do motor.

2. **Combustível catalisado.** Solução de pós-tratamento utilizada em veículos de passeio e comerciais leves que tem como base a adição de pequenas quantidades de metais catalisadores (cério, ferro) ao combustível (entre 4 e 20 ppm). A combustão da mistura ar/combustível juntamente com o aditivo resulta na formação de material particulado catalisado que contribui para a diminuição da temperatura de oxidação de 600°C para 450°C ou até para a faixa de 300-350°C, dependendo do metal catalisador utilizado. Atualmente, os dois aditivos mais difundidos são: *Eolys* (a base de cério) e *Satacen* (a base de ferro).

Uma característica relevante é que o processo não produz emissão adicional de NO₂. Por sua vez, no caso do Satacen, a adição do agente catalítico torna o combustível mais tolerante ao conteúdo de enxofre, o que permite o uso de diesel com teor de enxofre superior a 50 ppm.

Após a fase de regeneração, o aditivo catalisador fica retido no filtro, na forma de cinzas, as que são retiradas por um processo de lavagem, durante a manutenção do sistema de pós-tratamento.

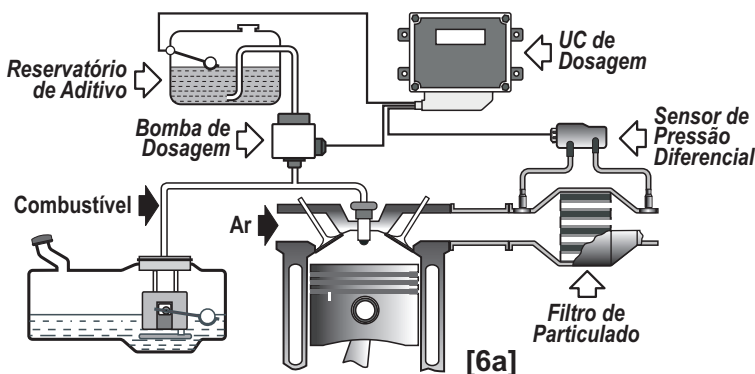
No entanto, só o uso de combustível catalisado não assegura a regeneração do filtro em todas as condições de funcionamento do motor. O controle da temperatura é um fator crítico no processo de regeneração: se aumenta além do limite, coloca em risco a integridade do filtro; se não é atingida a temperatura necessária à regeneração, o filtro pode entupir.

Para contornar esta última situação, deve-se recorrer à regeneração ativa através do mecanismo de pós-injeção.

● EXEMPLO I

A figura [6a] mostra o esquemático de um sistema de regeneração por combustível catalisado, no qual o aditivo (Satacen) é injetado diretamente na linha de combustível.

Desta forma, só há adição do mesmo quando necessário. Para isso, o sistema dispõe de uma unidade de dosagem dedicada. Quando o diferencial de pressão atinge a carga crítica, a UC de dosagem aciona a bomba de dosagem na medida do necessário. Como resultante do processo de combustão, forma-se material particulado "catalisado" que, no filtro, queima a uma temperatura compatível com a dos gases de escape.



● EXEMPLO 2

A figura [6b] mostra o sistema de pós-tratamento utilizado pela Peugeot/Citroen em veículos diesel de passeio.

O aditivo, Eolys neste caso, é armazenado num reservatório adjacente ao principal de combustível. Uma pequena quantidade de aditivo é injetada em proporção ao volume de combustível adicionado durante o reabastecimento. No caso analisado, o reservatório de aditivo tem capacidade suficiente para 80.000 km.

Operação

Com o motor funcionando, o agente catalisador, contido no aditivo, é retido no filtro juntamente com o material particulado já que não há processo de regeneração em andamento, em função da temperatura dos gases de escape estar na faixa de 150-200°C.

Quando a UC detecta a condição de “carga crítica” do filtro de particulado (com base na informação do sensor de pressão diferencial), inicia o processo de regeneração ativa que consiste em elevar a temperatura dos gases de escape, na entrada do filtro, para 450°C. Isto, através do mecanismo de **pós-injeção** durante o ciclo de combustão, já na fase de expansão.

A seguir, o combustível não queimado na câmara, resultante da pós-injeção, entra em combustão no catalisador oxidante com o que, a temperatura supera os 450°C necessários ao processo de regeneração. Após a regeneração, estes aditivos catalisadores formam cinzas juntamente com resíduos de óleo lubrificante, que obstruem progressivamente o filtro e aumentam a contrapressão no escape.

Reparar que o sistema possui também, EGR que contribui para o controle das emissões de **NOx**.

- Filtro catalisado.** Outro mecanismo, que permite uma regeneração segura e contínua, sem necessidade de aditivos, é a aplicação de revestimento de platina (que funciona como agente catalisador) sobre a cerâmica porosa do filtro (tecnologia CCRT). Desta forma, o HC residual continua a ser oxidado dentro do filtro aumentando a sua temperatura e permitindo a continuação do processo de regeneração (combustão do particulado). Como resultado, diminui a temperatura mínima necessária dos gases na entrada do filtro para a faixa de 300°C a 450°C. Como consequência, diminui também, a quantidade necessária de combustível de pós-injeção.

■ REGENERAÇÃO ESTACIONÁRIA

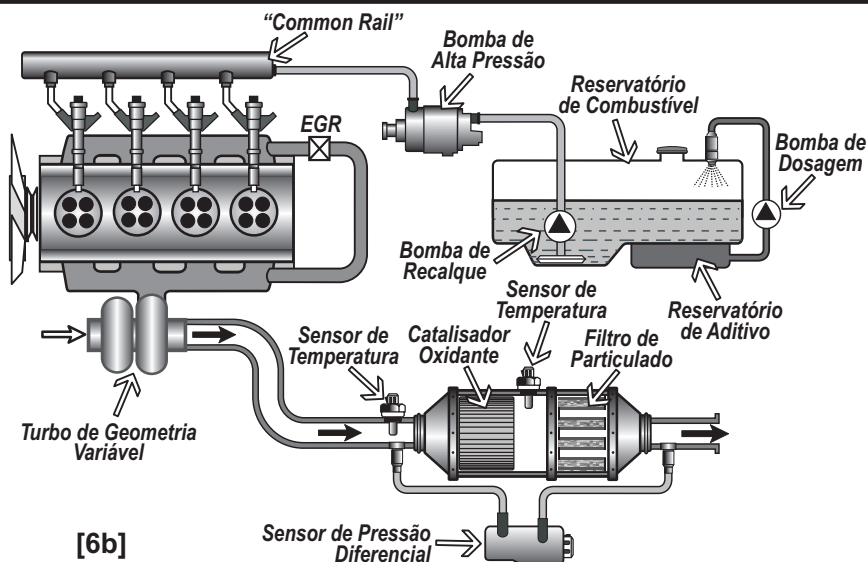
Para o caso em que, durante a operação normal do veículo, não for possível a regeneração automática, os fabricantes oferecem a possibilidade de realizar o processo com o veículo parado, utilizando o **equipamento de diagnóstico** ou um **interruptor de solicitação** dedicado. Uma condição importante é que este procedimento só pode ser executado na ausência de códigos de falha relacionados com o filtro de particulado. Em função de não existir uma padronização, a regeneração estacionária deve ser realizada seguindo as instruções particulares de cada fabricante.

CINZAS

Uma pequena parte do particulado não é queimada; são as denominadas “cinzas” cuja fonte pode ser:

- ▶ Aditivos presentes no óleo lubrificante
- ▶ Aditivos metálicos catalisadores adicionados ao combustível e utilizados na regeneração.

As cinzas devem ser retiradas através de limpeza mecânica (água sob pressão) do filtro, a intervalos que variam de 80.000 km a 120.000 km rodados. No entanto, alguns fabricantes já desenvolveram filtros cuja vida útil é similar à do veículo.



[6b]