

INJEÇÃO DIRETA DE COMBUSTÍVEL EM CICLO OTTO GDI - GASOLINE DIRECT INJECTION

MEC 014 - Motores de Combustão Interna

Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Juiz de
Fora

Capítulo 8 Parte II

Motores de Combustão Interna
Volume I
Franco Brunetti

Agenda

- ̄ PRIMEIRA PARTE: Introdução
- ̄ SEGUNDA PARTE: Requisitos de Combustão e Formação de Mistura
- ̄ TERCEIRA PARTE: Sistema de Injeção Direta de Combustível.
- ̄ QUARTA PARTE: Controle de Combustão.
- ̄ QUINTA PARTE: Emissões de Poluentes.
- ̄ SEXTA PARTE: Conclusões.

PRIMEIRA PARTE

INTRODUÇÃO

- 1) Volkswagen move up! 1.0 TSI - R\$ 54.350
- 2) Volkswagen Polo Comfortline 1.0 TSI - R\$ 65.190
- 3) Ford Fiesta SEL 1.0 EcoBoost - R\$ 66.090
- 4) Volkswagen Golf Comfortline 1.0 TSI - R\$ 77.247
- 5) Chevrolet Tracker LT 1.4 Turbo - R\$ 82.990
- 6) Peugeot 208 GT 1.6 THP - R\$ 84.490
- 7) Peugeot 308 Griffe 1.6 THP - R\$ 84.990 e
408 Griffe 1.6 THP - R\$ 84.990
- 8) Peugeot 2008 Griffe 1.6 THP - R\$ 89.990
- 9) Citroën C4 Lounge Tendance 1.6 THP - R\$ 90.990

Introdução

Sistema de Injeção

Port Fuel
Injection - PFI

Gasolina

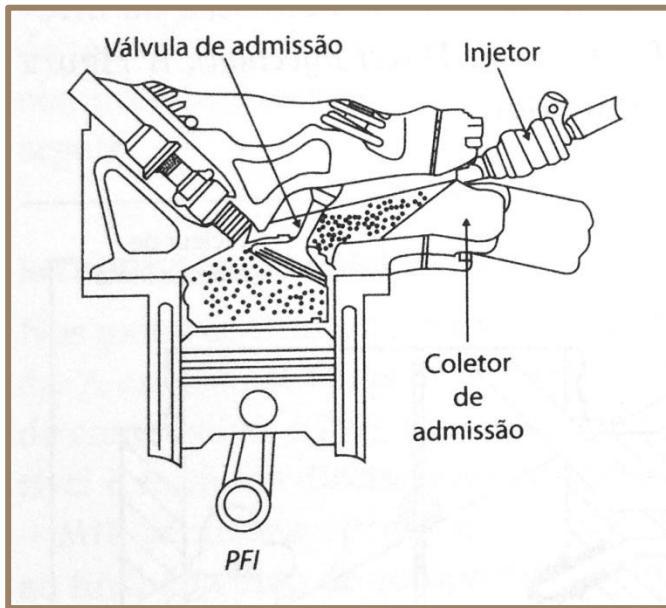
Direct
Injetcion -
GDI

Década de 90
Maior taxa de
compressão e
maior eficiência

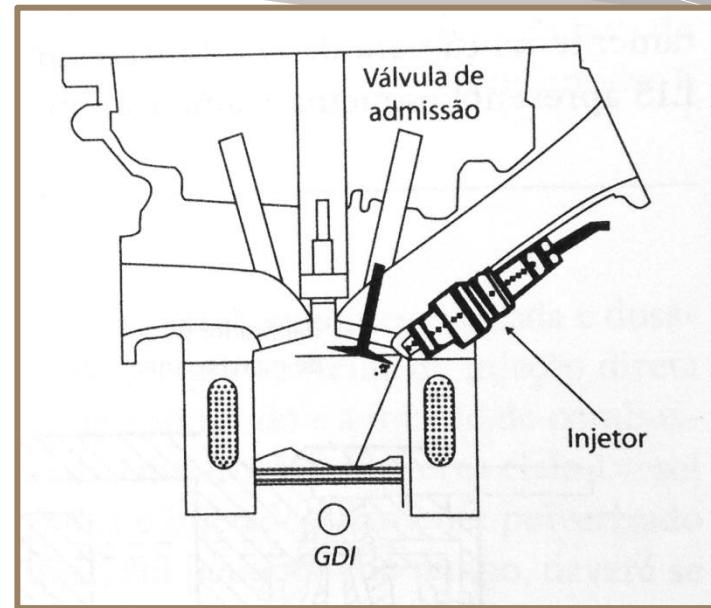
Mistura
homogênea
ou
estratificada

Injeção no
tempo de
admissão ou
compressão

Introdução

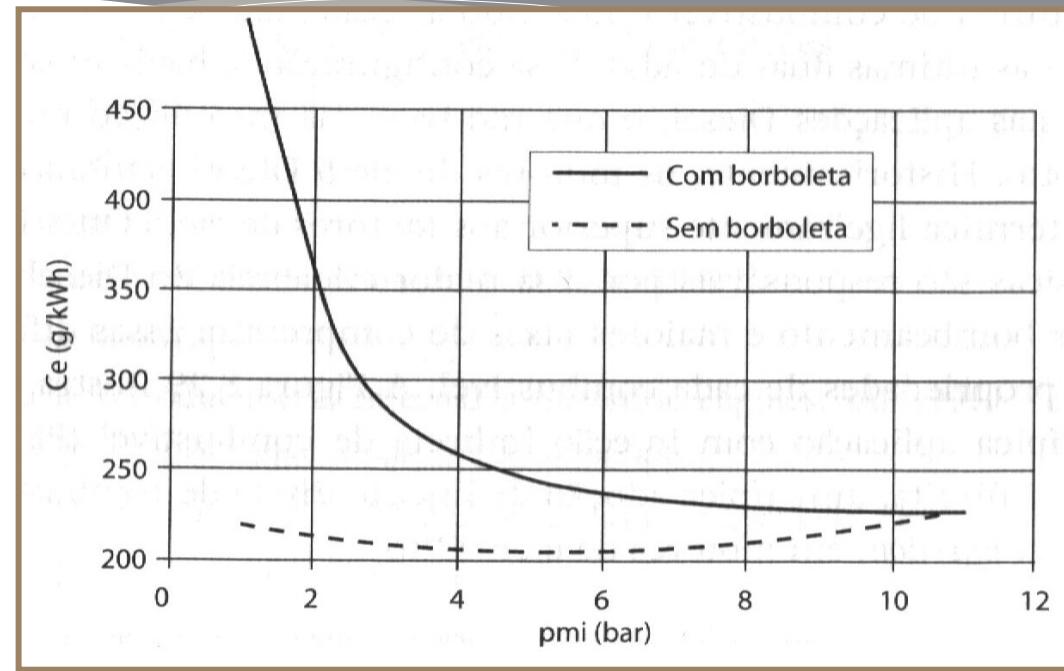


Port Fuel
Injection - PFI



Gasoline
Direct
Injection - GDI

Introdução



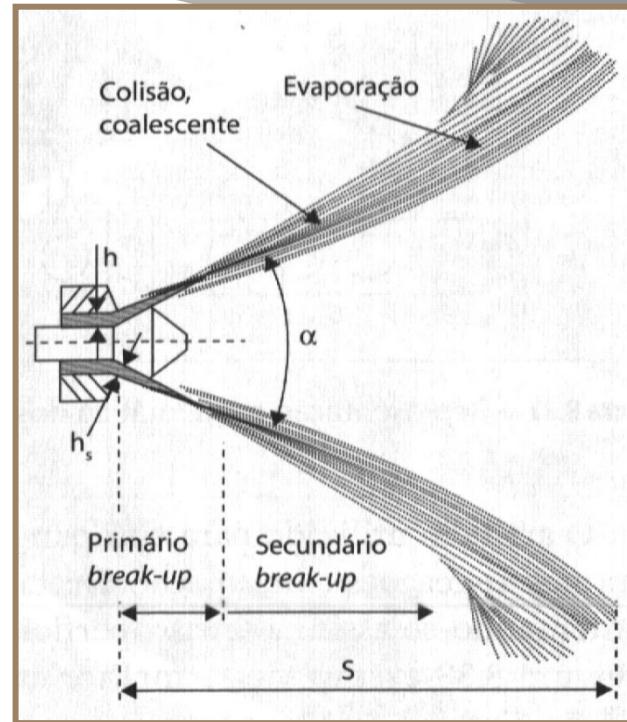
Menor perda de bombeamento;
modulação do torque pelo
combustível injetado (fácil no
Diesel, difícil no Otto)

Introdução

- Maior taxa de compressão – limitada pela resistência à detonação do combustível.
- Mais de uma injeção no ciclo – menor temperatura no interior da câmara de combustão.
- Controle mais preciso da mistura ar-combustível por não haver deposição de combustível nas paredes do coletor de admissão e cabeçote.
- Combustível dosado de acordo com o ar dentro do cilindro – bom em variação abrupta de carga

Requisitos de Combustão e Formação de Mistura

Mecanismo de Atomização do Spray



Jato ou folha líquida
 α - ângulo do cone.
 S - penetração.

Requisitos de Combustão e Formação de Mistura

Mecanismo de Atomização do Spray

A velocidade do líquido é proporcional a diferença de pressão sistema/cilindro.

A velocidade relativa induz instabilidades que leva o filme/jato à desintegração.

As gotas continuam a sofrer quebras por efeitos aerodinâmicos.

A tensão superficial aumenta com a diminuição do diâmetro, mas a velocidade relativa também aumenta.

As gotas podem coalescer com o choque.

Gotas evaporam ao trocar calor com o ambiente.

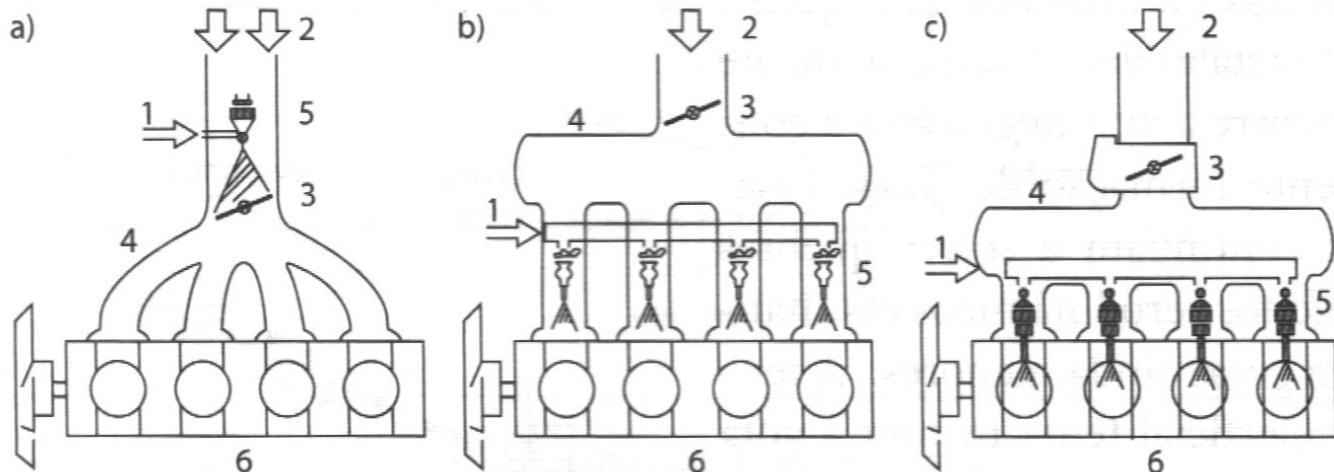
Requisitos de Combustão e Formação de Mistura

Atomização do Combustível

Representação esquemática dos sistemas de injeção

a) injeção central, b) injeção individual, c) injeção direta de gasolina.

1) combustível, 2) ar, 3) borboleta de aceleração, 4) coletor de admissão, 5) válvula injetora, 6) motor.



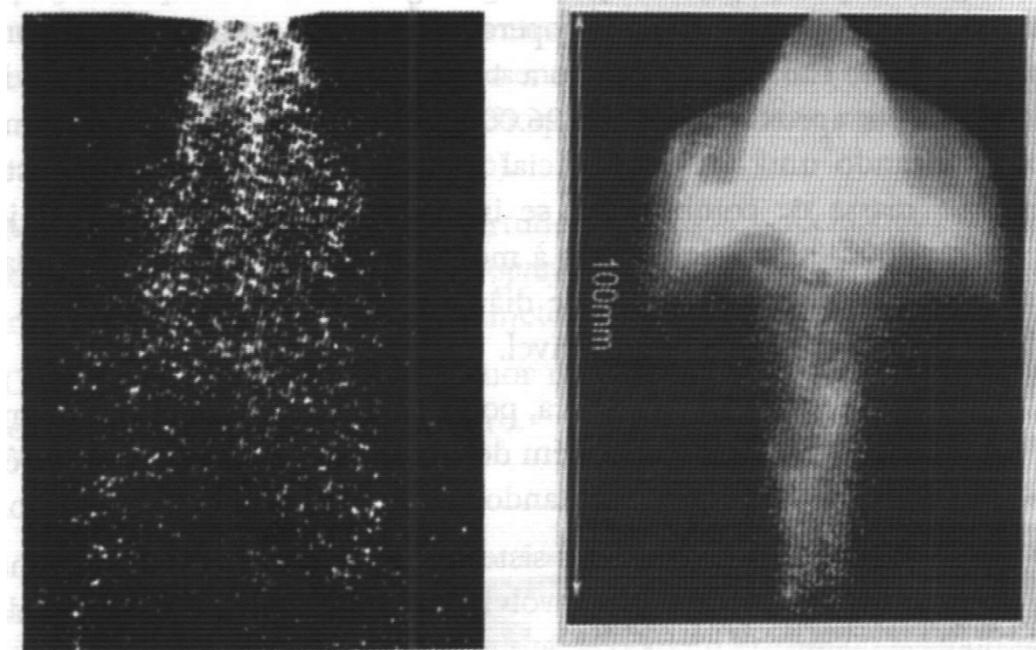
O ponto de injeção é determinante na formação da mistura. Quanto mais próximo da câmara melhor controle da mistura, porém menos tempo para a sua formação.

Injeção direta requer melhor atomização para compensar o menor tempo

Requisitos de Combustão e Formação de Mistura

Atomização do Combustível

PFI



GDI

Maior pressão de injeção, maior atomização.
Maior atomização, maior área de contato combustível-ar.
Injetor com maior tecnologia.

Requisitos de Combustão e Formação de Mistura

Atomização do Combustível

$$SMD \approx \frac{1}{\sqrt{P_{inj} - P_{cyl}}}$$

SMD - Sauter mean diameter

P_{inj} - pressão de injeção de combustível

P_{cyl} - pressão na câmara de combustão

	PFI	GDI	Diesel
Pressão de injeção (bar) SMD (μm)	2.5 – 4.5 85 – 200	40 – 130 14 – 24	500 – 2000 8

Requisitos de Combustão e Formação de Mistura

Atomização do Combustível

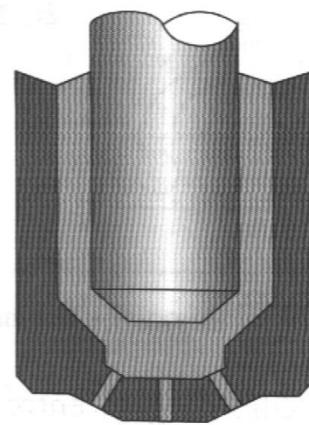
Uma massa de 10 mg de gasolina (massa aproximada para um ciclo de combustão de um motor operando em baixa carga) injetada por um sistema de injeção indireta, operando a **4 bar** de pressão à montante do injetor, é dividida em aproximadamente **26.000 partículas** de **100 µm** de diâmetro médio, totalizando uma área superficial total de **840 mm²** de combustível. Essa mesma massa de combustível, se injetada por um sistema de injeção direta operando a **130 bar** de pressão à montante do injetor, será dividida em **8.000.000 de partículas** de **15 µm** de diâmetro médio, totalizando uma área superficial de **5600 mm²** de combustível.

A maior área superficial é benéfica, pois aumenta a transferência de massa da gota por efeitos aerodinâmicos, além de aumentar a área para transferência de calor do meio para a gota.

Requisitos de Combustão e Formação de Mistura

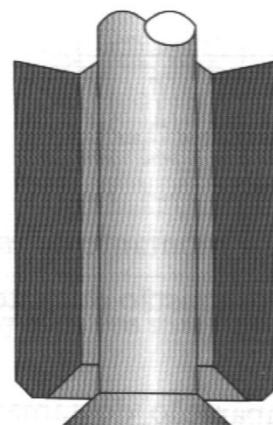
Atomização do Combustível

Tipos de Injetores

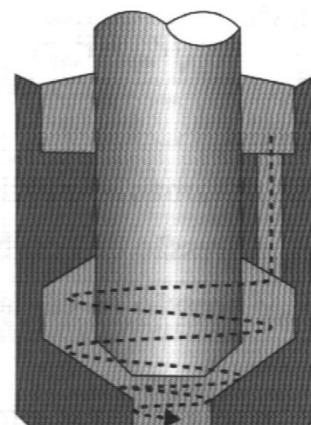


Bocal multifuros

Full Cone



Bocal de abertura
interna
externa



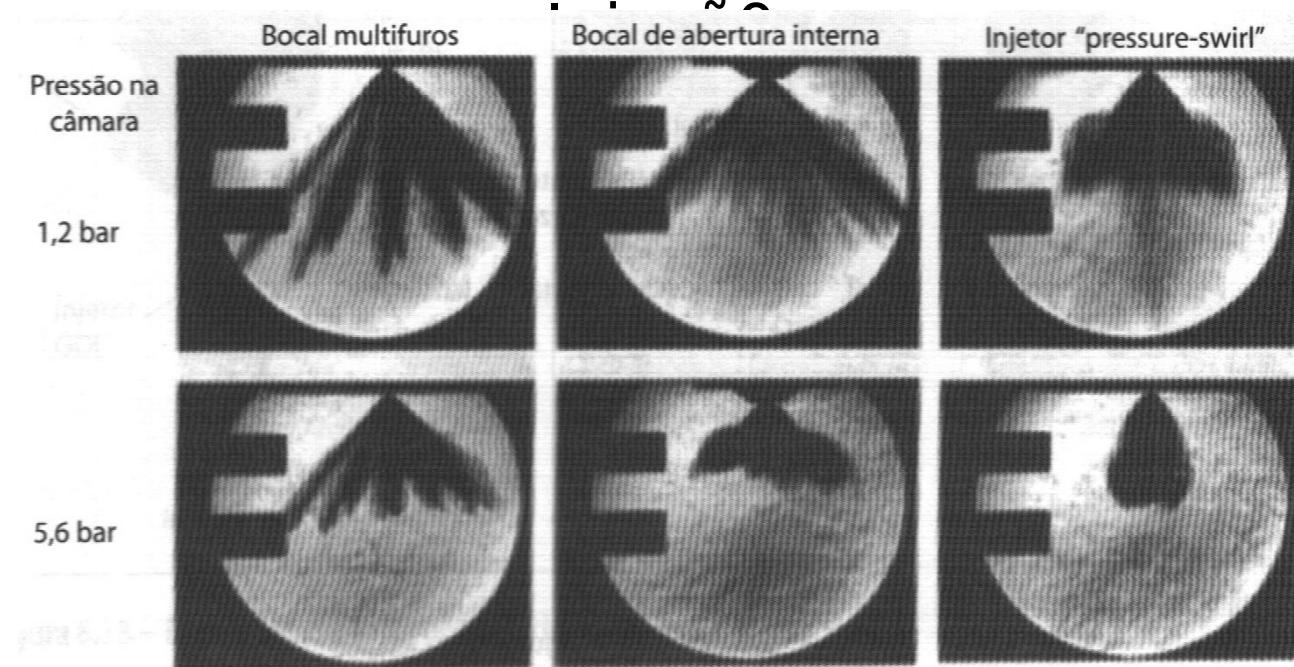
Injetor "pressure-swirl" de
abertura interna

Hollow Cone

Requisitos de Combustão e Formação de Mistura

Atomização do Combustível

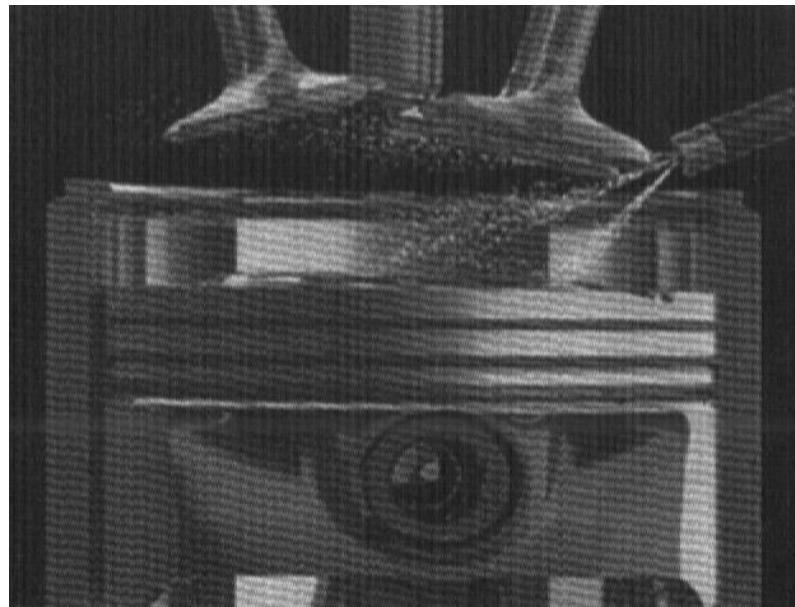
Qualidade da



Requisitos de Combustão e Formação de Mistura

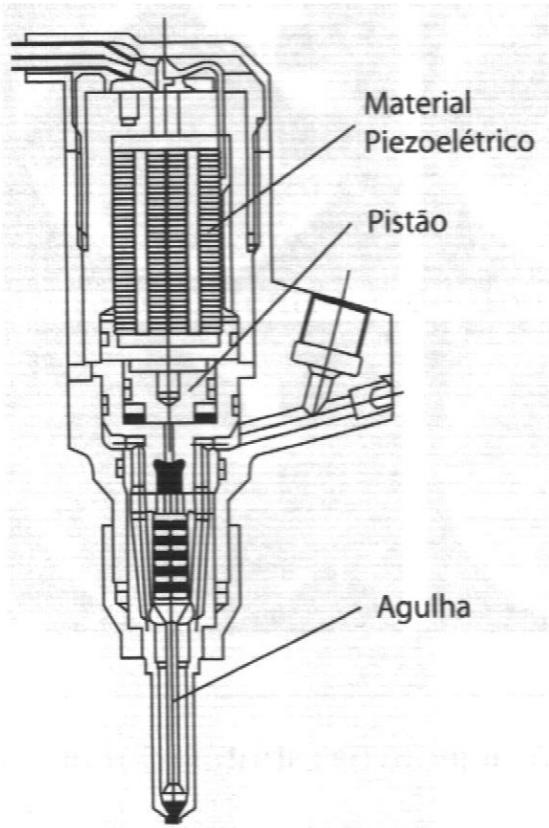
Atomização do Combustível

O injetor multifuros facilita a aplicação lateral



Requisitos de Combustão e Formação de Mistura

Atomização do Combustível



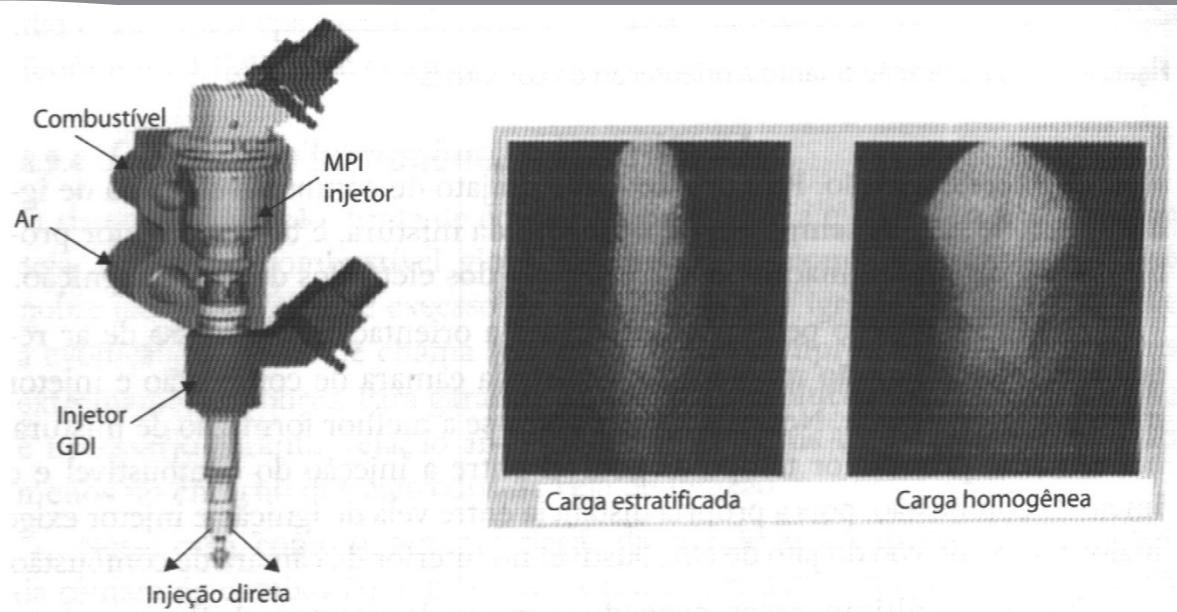
Abertura do injetor

- Solenoide
- Piezoelettrico

Piezoelettrico da ordem de 10 vezes mais rápido que o solenoide, permitindo mais injeções por ciclo (melhor atomização), consome menos energia, mas é mais caro.

Requisitos de Combustão e Formação de Mistura

Atomização do Combustível

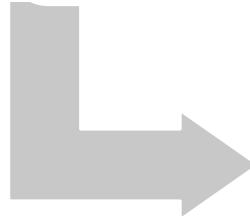
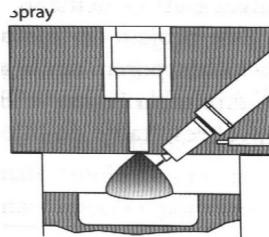


Pulse-pressurized air-assisted injector

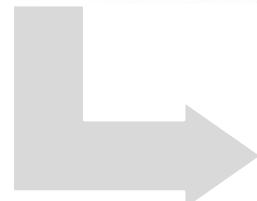
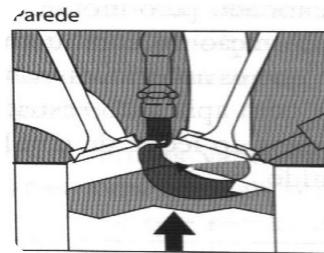
- em desenvolvimento.
- injetor convencional usado na injeção indireta (menor pressão).
 - necessário um compressor de ar.
 - melhor atomização

Requisitos de Combustão e Formação de Mistura

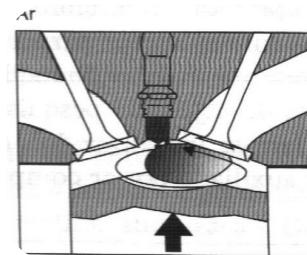
Orientação da Combustão



- spray-guided
- Combustão orientada pelo jato de combustível.
- Sofre menor influência da turbulência do interior da câmara.
- Injetor localizado próximo a vela.
- Menor tempo para formação da mistura.
- Carbonização da vela de ignição.



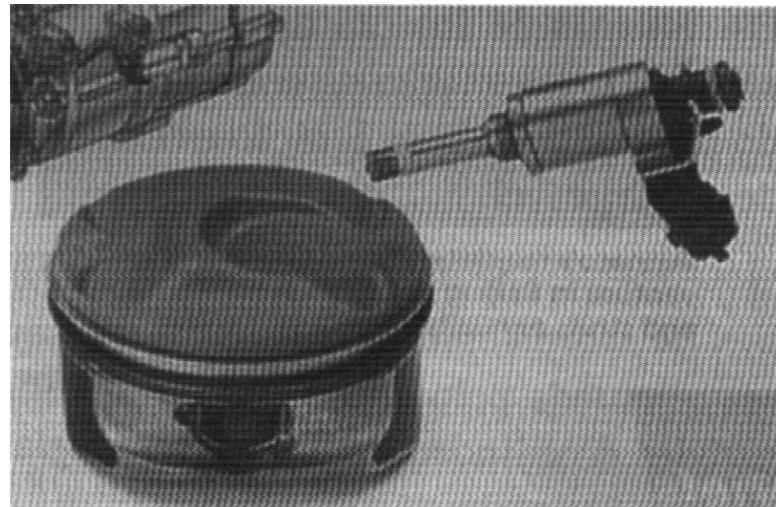
- Wall-guided.
- Combustão guiada pela cabeça do pistão e parede do cilindro.
- Vela no centro e injetor na lateral.
- Maior distância vela-injetor.
- Maior tempo de formação da mistura.



- Air-guided.
- Combustão guiada pela massa de ar deslocada no interior da câmara.
- Injeção mais cedo, a estabilidade é pior, mas reduz a deposição de combustível na cabeça do pistão e na parede.

Requisitos de Combustão e Formação de Mistura

Orientação da Combustão



Os arranjos dependem muito da forma da cabeça do pistão, que direcionará a mistura aos eletrodos da vela.

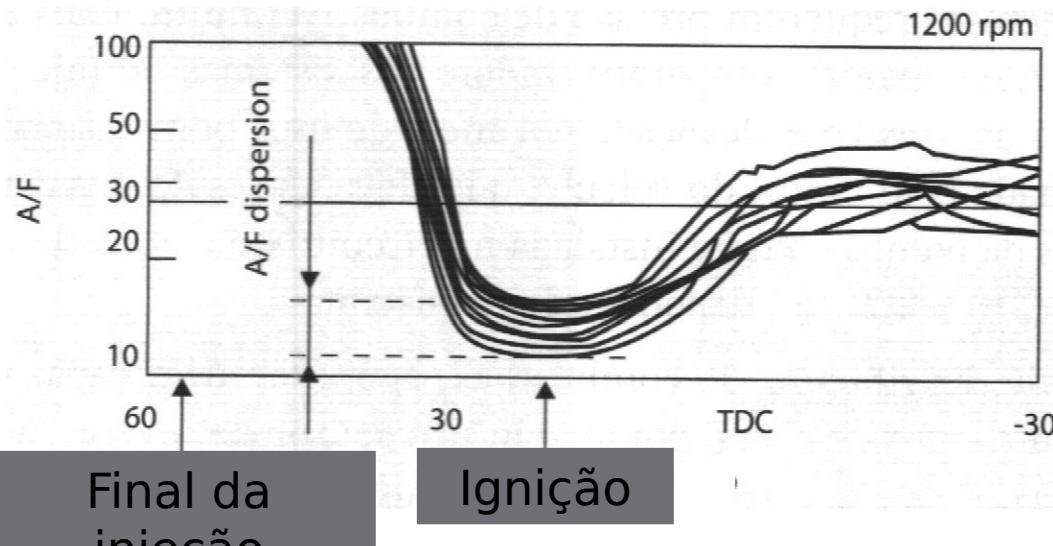
Requisitos de Combustão e Formação de Mistura

Combustão Homogênea e Estratificada

Queima estratificada (late injection): relação ar-combustível global pobre, acima de 20% de excesso de ar.

Para garantir a ignição e a evolução da frente de chama é necessário relação ar-combustível próxima a estequiométrica pelo menos perto da vela.

A figura mostra A/F no entorno da vela.



Requisitos de Combustão e Formação de Mistura

Combustão Homogênea e Estratificada

QUEIMA ESTRATIFICADA

- Controle altamente complexo.
- Extremamente sensível às características dos combustíveis.
 - Dependente do desenho dos componentes.
 - Dependente do regime de operação do motor.
- Sensível ao desgaste e ao mau funcionamento do sistema de injeção.
 - Dificuldade no controle de emissões de poluentes.

SISTEMA DE INJEÇÃO DIRETA DE COMBUSTÍVEL

Diferenças para um sistema convencional:

- Os injetores precisam suportar condições de temperatura e pressão do interior da câmara.
 - Existência de uma bomba secundária.
 - Pressão de combustível entre 10 a 40 vezes maior.
- Sistema de combustível dividido em circuito de baixa e de alta pressão.

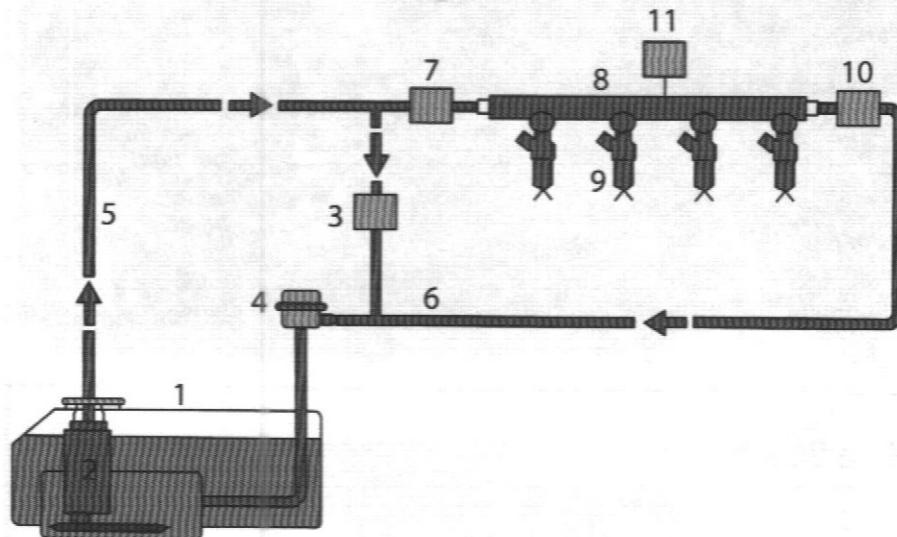
Saída da bomba elétrica – 4 bar.

Saída da bomba de alta pressão – 40 a 200 bar.

SISTEMA DE INJEÇÃO DIRETA DE COMBUSTÍVEL

Sistema Bosch MED Motronic

Fornecimento de combustível para um sistema GDI
(exemplo com retorno de combustível e regulador de pressão)



Círculo de baixa pressão (primária)

1. Tanque de combustível
2. Bomba elétrica de combustível com limitador de pressão e filtro
3. Válvula de desligamento
4. Regulador de pressão
5. Linha de combustível

Círculo de alta pressão

6. Linha de retorno de combustível
7. Bomba de alta pressão
8. Galeria de combustível
9. Injetor de alta pressão
10. Válvula de controle de pressão
11. Sensor de pressão de combustível

SISTEMA DE INJEÇÃO DIRETA DE COMBUSTÍVEL



SISTEMA DE INJEÇÃO DIRETA DE COMBUSTÍVEL

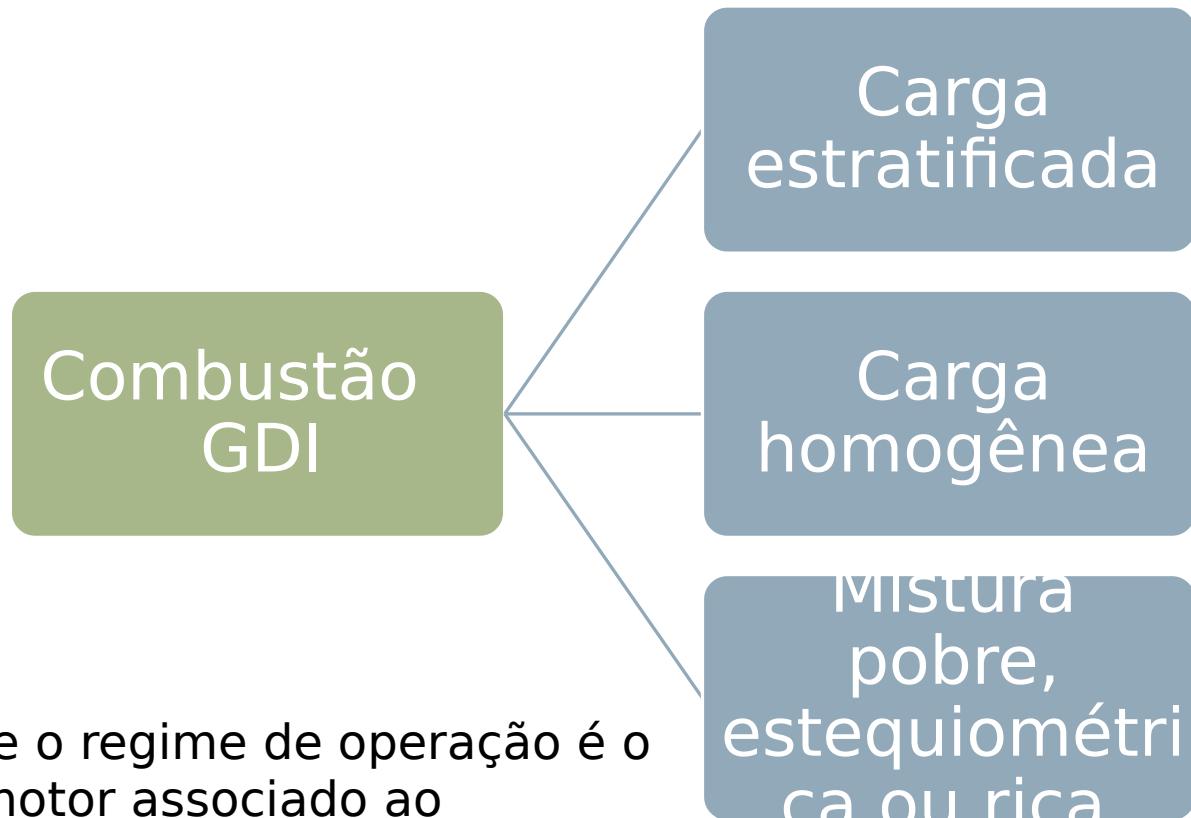


SISTEMA DE INJEÇÃO DIRETA DE COMBUSTÍVEL



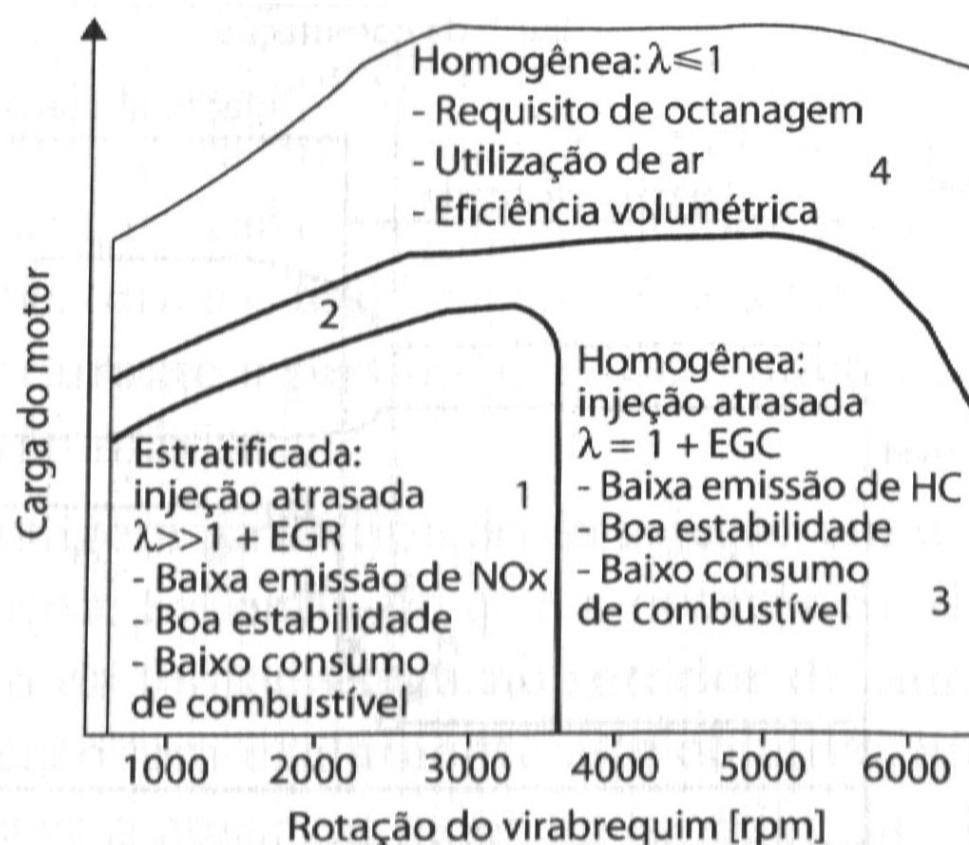
CONTROLE DA COMBUSTÃO

Mapa Característico de Combustão



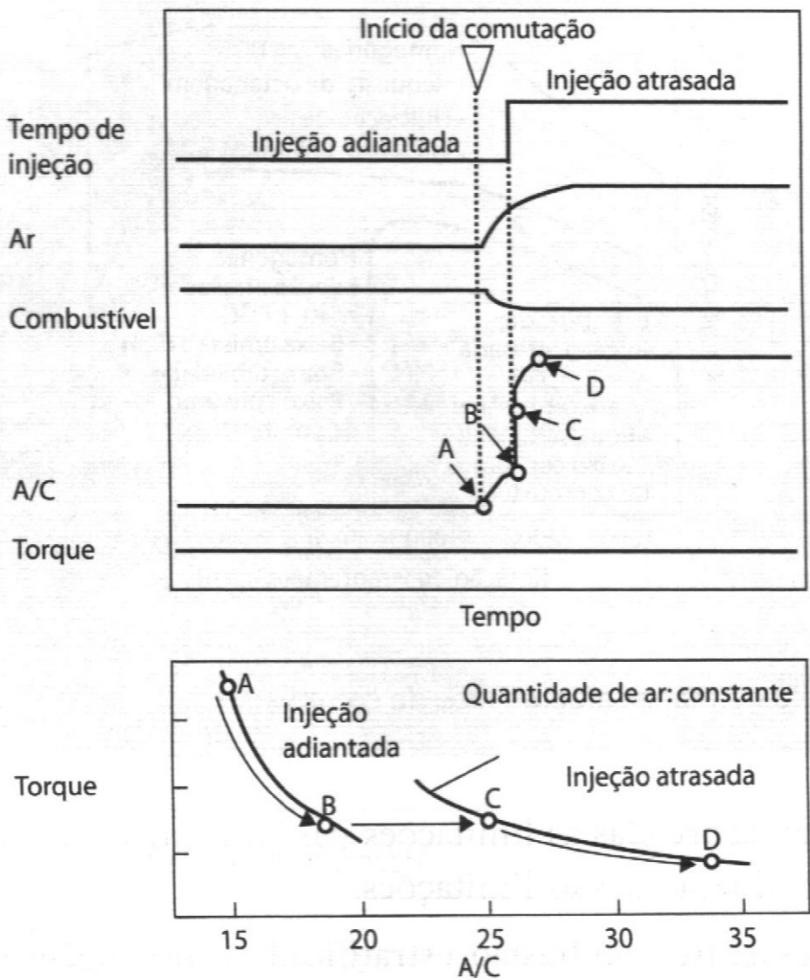
CONTROLE DA COMBUSTÃO

Mapa Característico de Combustão



CONTROLE DA COMBUSTÃO

Mapa Característico de Combustão



Estratégia de transição entre
combustão homogênea e
estratificada – região 2.

1. A é homogênea – torque elevado.
2. A-B empobrecimento da mistura pela abertura da borboleta.
3. B-C aplica-se uma injeção estratificada.
4. D totalmente estratificada, com borboleta totalmente aberta.

Região 3 – a alta rotação requer
estequiometria para
estabilidade.

CONTROLE DA COMBUSTÃO

Injeção em dois estágios

CDI permite a divisão da massa injetada de combustível em mais de uma injeção.

No máximo duas, pois nas fases de abertura e fechamento do injetor a atomização é deficiente.

A vantagem obtida é uma maior resistência à detonação, devido a diminuição de temperatura.

A primeira injeção absorve calor da câmara.

A divisão de massas entre as injeções deve ser estudada detalhadamente.

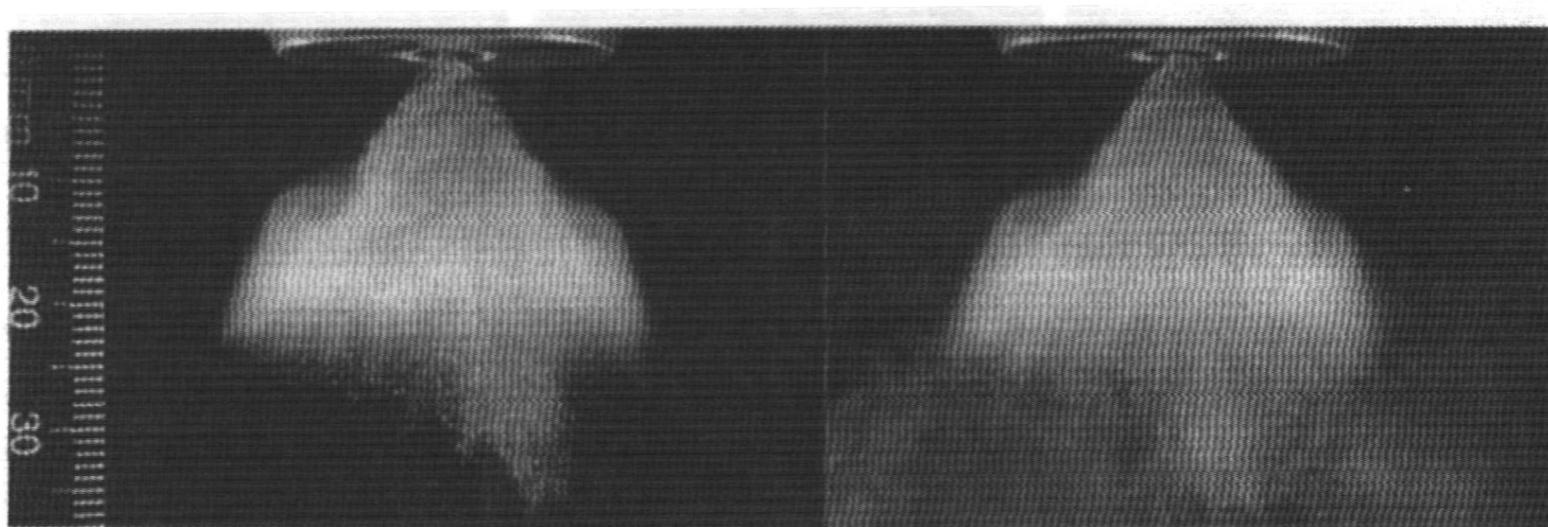
A estratégia permite a adoção de maiores taxas de compressão.

Permite ainda a (pós)injeção de combustível com a válvula de escapamento aberta, com a finalidade de aquecimento do

CONTROLE DA COMBUSTÃO

Injeção em dois estágios

Comparativo de atomização entre uma (à esquerda) ou duas injeções. Intervalo de 5 ms entre as injeções.



CONTROLE DA COMBUSTÃO

Partida a Frio

é um grande desafio no
desenvolvimento de motores de combustão interna.

Os injetores dos GDI's operam com pressões maiores das que as fornecidas pela bomba elétrica. A elevação de pressão é feita pela bomba mecânica.

Nos primeiros ciclos de combustão, logo após a partida, a bomba mecânica está operando aquém do ideal, portanto a pressão de injeção é baixa.

A atomização é prejudicada, aumentando o risco de deposição de combustível na vela e nas paredes do cilindro, dificultando a partida e o aquecimento.

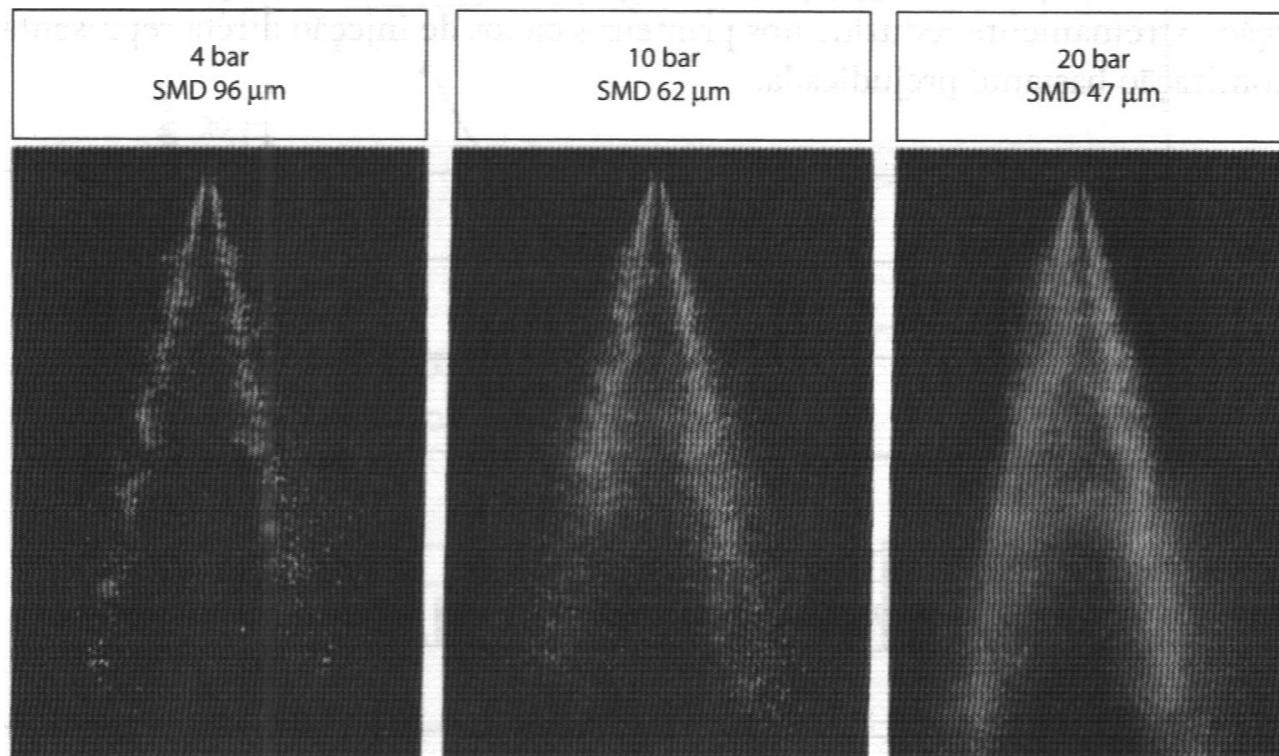
Maior quantidade de combustível deve ser injetada, aumentando as emissões e o risco de contaminação do óleo lubrificante.

Apesar das dificuldades, os GDI's apresentam vantagem no total de massa de combustível injetado quando comparados com

CONTROLE DA COMBUSTÃO

Partida a Frio

Influência da pressão de injeção na qualidade da atomização.

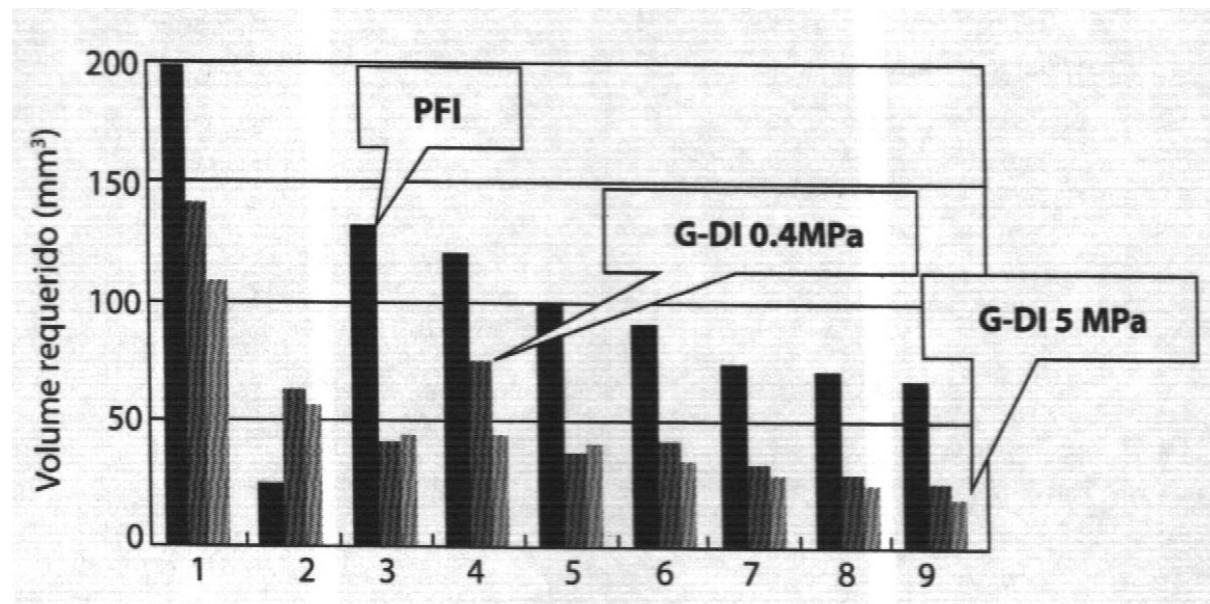


CONTROLE DA COMBUSTÃO

Partida a Frio

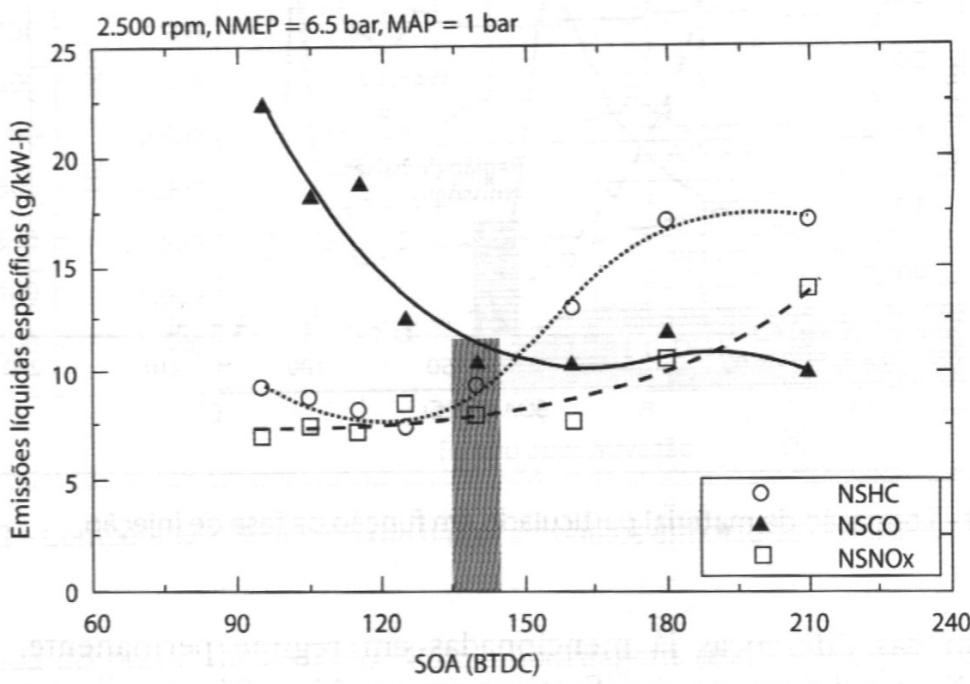
Nove primeiros ciclos na partida - o GDI requer menos massa de combustível.

A massa adicional do injeção indireta é devida a formação de filme nas paredes do coletor.



EMISSÃO DE POLUENTES

Formação de Poluentes

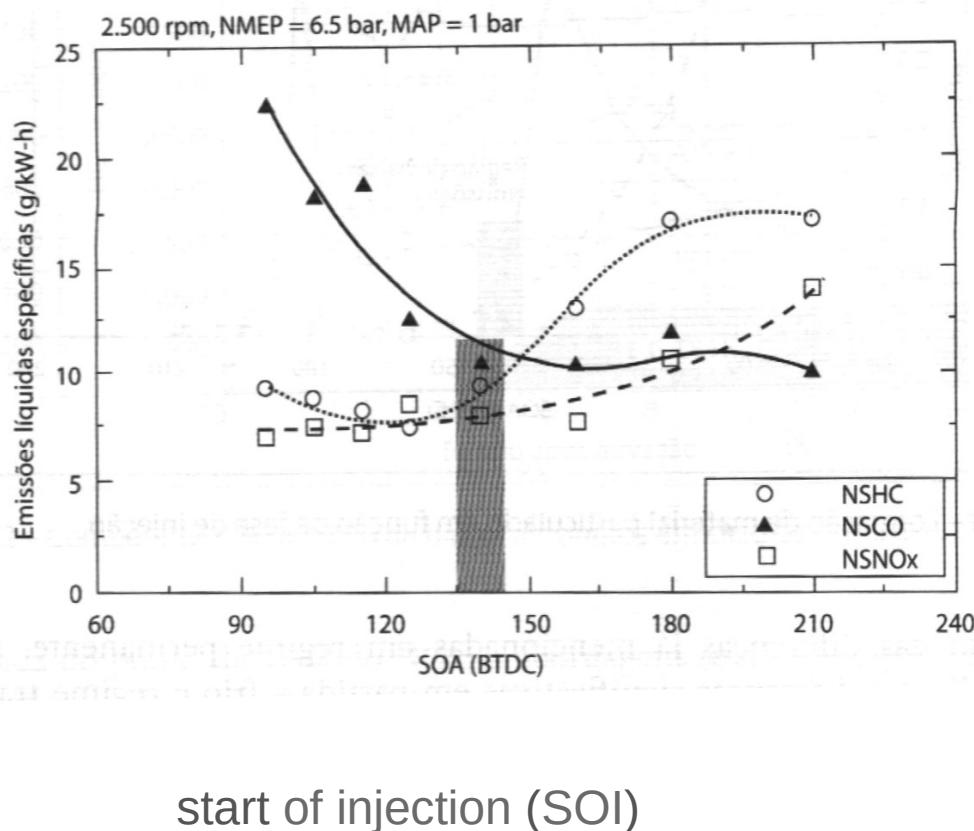


Formação em GDI totalmente diferente dos injeção indireta.
Injeção indireta: relação ar – combustível.
GDI: relação ar-combustível e diferença angular injeção- centelha.

Secondary organic aerosol (SOA) ???????

EMISSÃO DE POLUENTES

Formação de Poluentes



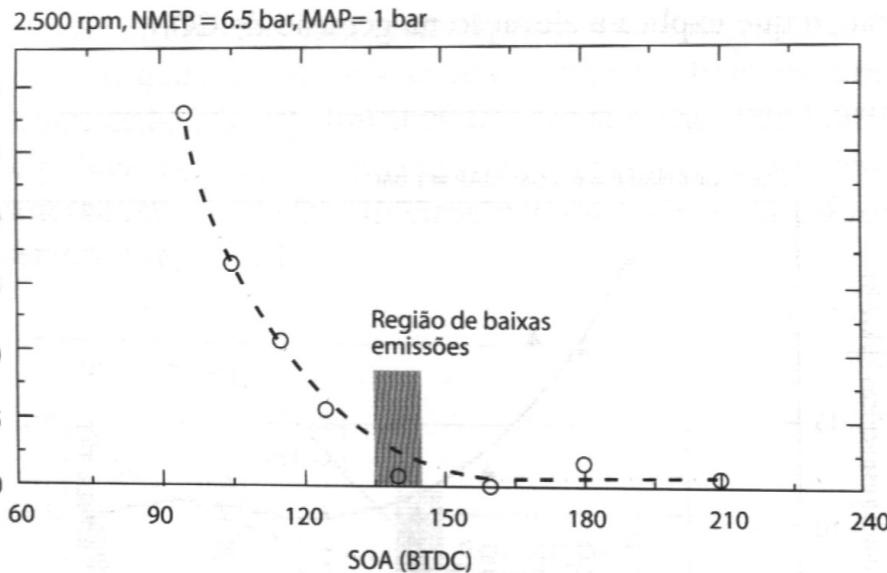
CO – pequenas diferenças angulares maior emissão, devido a deficiência de formação da mistura, dado o tempo reduzido, incorrendo em mistura rica no início.

HC – grandes diferenças angulares, maior emissão devido a diluição do combustível com consequente instabilidade da combustão, dada a menor velocidade de chama, e geração de HC.

NOx – grandes diferenças angulares, maiores temperaturas, mais formação

EMISSÃO DE POLUENTES

Formação de Poluentes

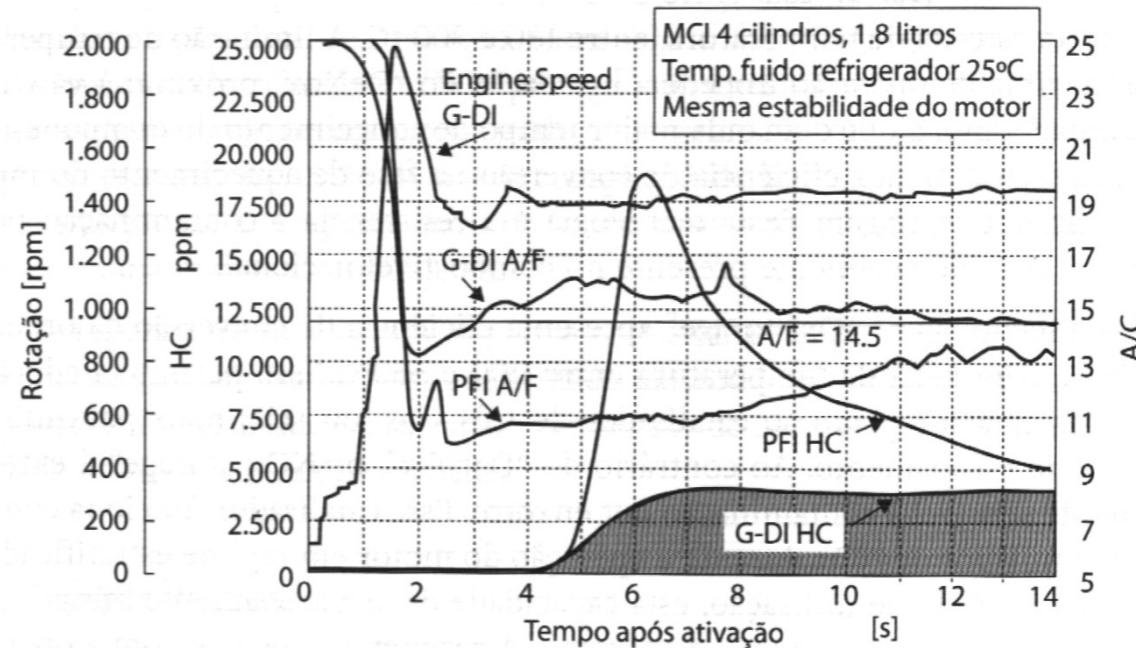


Novidade: nos GDI's existe a emissão de particulados (fuligem).
A formação de particulados acompanha a formação de CO.

EMISSÃO DE POLUENTES

Formação de Poluentes

Comparando a emissão de HC dos GDI's com a dos injeção indireta , durante a partida e transitórios, como não existe condensação nas paredes dos dutos de admissão, existe ganhos significativos para os GDI's, ainda que com a baixa pressão de injeção. A GDI permite mistura estequiométrica.



EMISSÃO DE POLUENTES

Formação de Poluentes

NOx — a formação se dá principalmente na combustão estratificada.

A tecnologia viável para o abatimento é a adoção da EGR. A recirculação dos gases de exaustão (inertes com baixo oxigênio) promove a redução do pico de temperatura de

EMISSÃO DE POLUENTES

Pós-tratamento de Poluentes

Com gônea, estequiométrica, mesmo tratamento da injeção indireta, ou seja, simples catalisador de três vias.

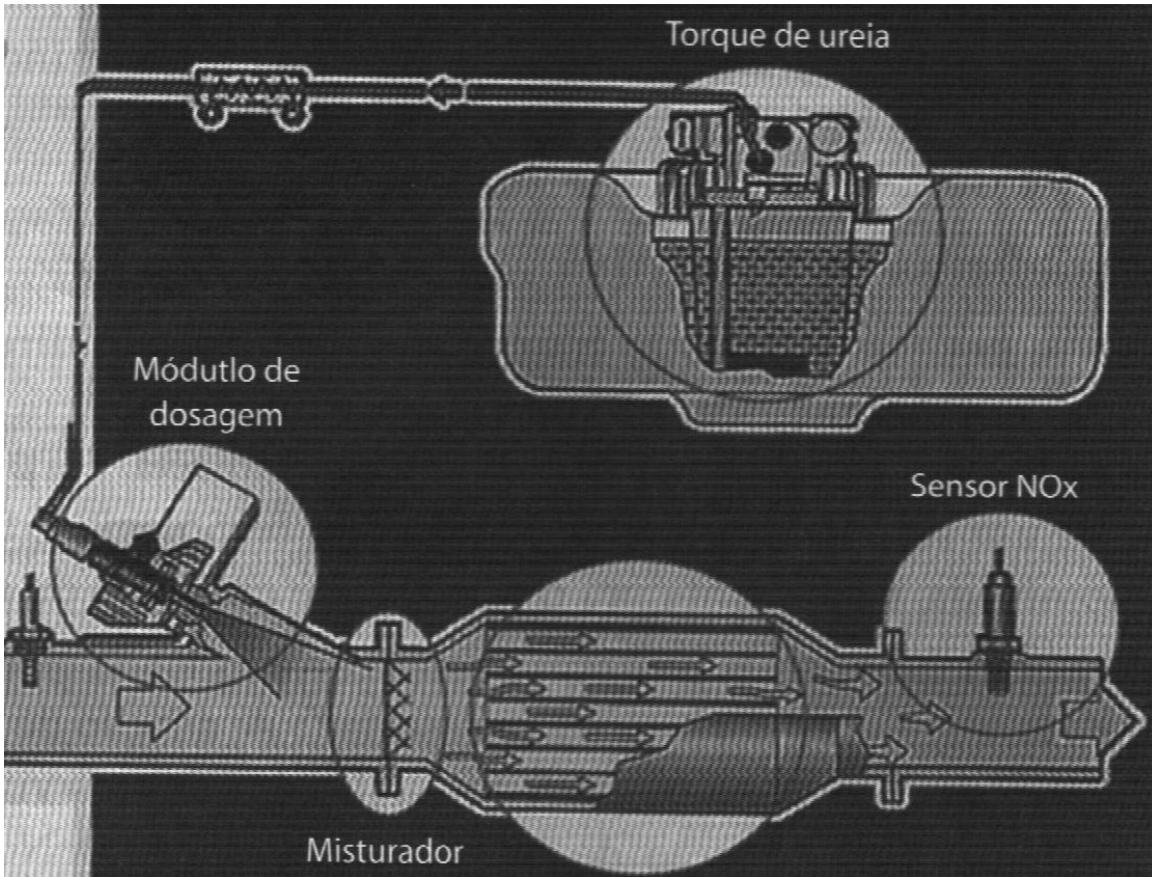
O desafio: queima estratificada – necessidade de sistema específico para tratamento de NOx mais o três vias.

Três tecnologias para redução de NOx:

1. “DeNox” – mais simples e menos eficiente; cara por usar platina; eficiência de conversão 30 a 50%; faixa temperatura 180 a 300 °C (baixa); tem como vantagem a resistência a contaminação por enxofre.
2. NOx storage – eficiência de conversão 90%; faixa de temperatura 200 a 550 °C; sensível a contaminação por enxofre; acumula NOx em operação estratificada e se regenera em operação com mistura rica.
3. SCR (selective catalysis reduction) – eficiência de conversão 70%; faixa de temperatura 200 a 550 °C; resistente ao enxofre; mais complexo e necessidade do uso do redutor

EMISSÃO DE POLUENTES

Pós-tratamento de Poluentes



Sistema de conversão
de NOx a base de
ureia.

CONCLUSÕES

GDI já é uma realidade desde a década de 90. O objetivo de atingir a eficiência do Diesel, com a queima estratificada, não foi alcançado. Atualmente têm-se a injeção com queima homogênea que garante cerca de 5% de economia de combustível. Alta complexidade e custo elevado não despertou interesse por parte do consumidor (menos de 25% da produção de veículos na Europa na década de 2000). A tendência de downsizing está indicando um maior uso de GDI, dada a maior eficiência térmica e o controle da temperatura (pós-injeção) permitindo maior controle do turbocompressor.

No Brasil, somente os modelos de luxo importados e adaptados para o uso da E27. O mercado de carros populares não estará disposto a arcar com o custo.

O uso com etanol dificulta a aplicação de injeção direta, sobretudo pela dificuldade de partida a frio. A atomização do etanol é mais difícil, devido a maior tensão superficial, injeção de maior quantidade volumétrica, a maior resistência a detonação são questões a serem levadas em consideração.

FIM